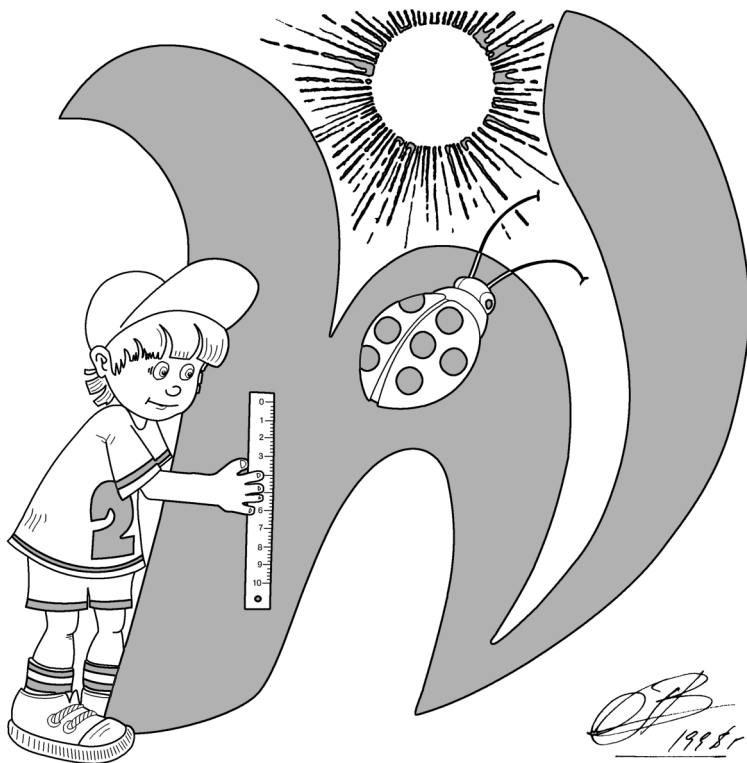


Министерство просвещения Российской Федерации
Центральная предметно-методическая комиссия
Всероссийской олимпиады школьников по физике

LVI Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур



Санкт-Петербург, 2023 г.

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

Авторы задач

9 класс

- **9-Е1.** Сергей Кармазин
- **9-Е2.** Иван Юдин

10 класс

- **10-Е1.** Юрий Черников
- **10-Е2.** Александр Аполонский, Максим Карманов

11 класс

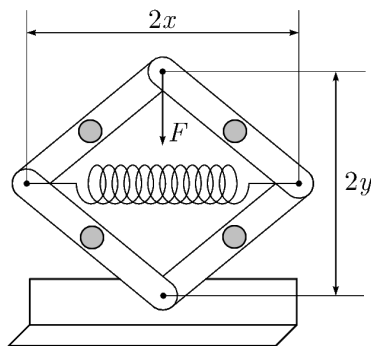
- **11-Е1.** Александр Аполонский
- **11-Е2.** Виталий Шевченко

9 класс

Задача №1. Бистабильная система

Исследуйте механические свойства конструкции в виде ромба с пружиной. К середине каждой стороны ромба прикреплены грузы одинаковой массы. Считайте, что пружина подчиняется закону Гука. Массой пружины по сравнению с массой всей подвижной конструкции можно пренебречь. Используйте следующие обозначения:

- $2y$ — расстояние между верхним и нижним шарнирами конструкции;
- $2x$ — расстояние между левым и правым шарнирами конструкции;
- k — коэффициент жесткости пружины;
- l_0 — расстояние между левым и правым шарнирами конструкции при ненапряженной пружине;
- m — суммарная масса подвижных частей конструкции;
- F — вертикальная сила, которую нужно приложить к верхнему шарниру для обеспечения равновесия конструкции при заданном значении y .



В данной работе погрешности оценивать не нужно.

0. Запишите нечетный номер, указанный в нижней части направляющих конструкции.

1. Снимите с наибольшей точностью зависимость силы F от расстояния y во всем диапазоне возможных значений y . Для каждого измерения F и y укажите соответствующую величину x .

2. Постройте график полученной зависимости $F(y)$.

3. Получите теоретическую зависимость между F и x , y , l_0 , m , k . Запишите эту зависимость в виде $F = \dots$, где выражение справа от знака равенства содержит x , y , l_0 , m , k . При выводе теоретической зависимости трением пренебречь.

4. Используя полученную зависимость $F(x, y, l_0, m, k)$, а также точки экспериментального графика $F(y)$, определите величину l_0 .

5. Обозначьте $W = y(2 - \frac{l_0}{x})$. Проверьте, является ли функция $F = F(W)$ линейной.

6. Постройте график зависимости $F(W)$. С помощью этого графика определите коэффициент жесткости пружины k и массу конструкции m .

Оборудование: механическая система, закрепленная на столе; линейка, бутылка пластиковая 0,5 л массой 19 г, шприц 20 мл, стакан с водой 0,4 л, нитки, динамометр, миллиметровая бумага А4 для построения графиков, салфетки.

Примечание: разбирать механическую систему (отвинчивать гайки, снимать пружину) ЗАПРЕЩЕНО!

Задача №2. Терморезистор

Терморезистор (термистор, термосопротивление) — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого зависит от его температуры. Вам необходимо найти зависимость сопротивления данного терморезистора от его температуры. В процессе исследования терморезистор будет нагреваться, поэтому он закреплен внутри зажима для бумаги. Перед выполнением измерений убедитесь, что терморезистор не касается внутренних поверхностей зажима, а выводы зажаты через изоляцию. В оборудовании используются маркированные резисторы, на которых указана максимальная рассеиваемая мощность и их сопротивление. Например, надпись «5W30RJ» означает: 5 Ватт, 30 Ом. В качестве источника питания используется регулируемый адаптер; индикатор на адаптере не является измерительным прибором. В данной работе погрешности оценивать не нужно.

0. Запишите номер терморезистора, указанный на зажиме, и комнатную температуру, указанную организаторами в аудитории.

1. После изменения параметров цепи температура терморезистора стабилизируется примерно через 2 минуты. Используя выданное оборудование, исследуйте зависимость силы тока, протекающего через терморезистор, от напряжения на нём для стабилизированных состояний терморезистора. Предложите электрические схемы для исследования данной зависимости в диапазонах $(0; 0,10)$ А, $(0,10; 0,40)$ А и $(0,40; 1,0)$ А. Допустимая сила тока через данный терморезистор не должна превышать $I_{max} = 1,0$ А. Мультиметр разрешается использовать только в режиме вольтметра. В процессе проведения эксперимента нельзя допускать, чтобы тепловая мощность тока в резисторе превышала 50% его максимальной мощности.

2. Постройте график исследованной зависимости $I(U)$.

3. Известно, что при температуре 95°C сопротивление выданного терморезистора 3,5 Ом. Найдите, при каких температурах терморезистора его сопротивление равно 2 Ом, 10 Ом и 15 Ом соответственно. Можно считать, что коэффициент теплоотдачи при проведении измерений постоянен.

Оборудование: зажим с терморезистором внутри, мультиметр в режиме вольтметра, спаянные сопротивления и разъём для источника, источник питания (регулируемый адаптер), два провода с крокодилами, миллиметровка для построения графиков.

10 класс

Задача №1. Насыщенный пар

В задаче требуется оценка погрешности

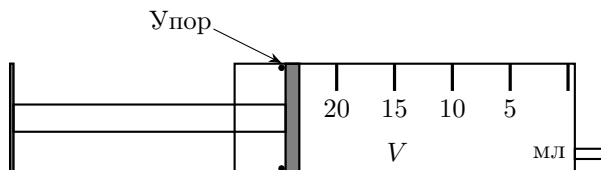
Задание:

1. Укажите в начале отчета номер выданной вам трубки.

С помощью выданного термометра определите комнатную температуру T_0 и запишите ее в отчет по работе.

Наполните шприц номиналом 20 мл воздухом при комнатной температуре до максимального объема (т. е. доведите поршень шприца до упора). Измерьте геометрически объем V воздуха в шприце.

Зажмите шприц в ладони так, чтобы площадь контакта ладони с поверхностью шприца была максимально возможной. Воздух в шприце начнет нагреваться от тепла вашей руки. Обозначим T_h температуру воздуха в шприце через 5 минут после начала нагрева от комнатной температуры. Предложите способ измерения T_h , основанный на использовании газовых законов, и определите величину T_h .



2. Установите поршень большого шприца так, чтобы объем воздуха в нем был максимальным. Во всех последующих экспериментах объем используемого большого шприца также должен быть максимальным.

Соберите установку, позволяющую определить количество испарившейся в большом шприце жидкости по изменению некоторого объема. Поместите в большой шприц каплю жидкости объемом 0,1 - 0,3 мл, не допуская ее растекания по стенкам (капля должна быть локализована). Шприц при этом должен оставаться при комнатной температуре.

Измерьте зависимость давления паров испаряющейся жидкости от времени. Измерение зависимости проводите не менее 6 минут. Установление давления насыщенного пара в шприце занимает много времени из-за того, что площадь капли мала.

После завершения необходимых измерений наклоните шприц так, чтобы капля растеклась по его стенкам. Дождитесь момента, когда давление в шприце перестанет меняться. Рассчитайте величину давления насыщенного пара p_c .

Комнатная температура с момента проведения первого эксперимента могла измениться. Запишите величину комнатной температуры T_c , отвечающее измеренному давлению насыщенного пара.

3. Предположим, что количество молекул, покидающих каплю в единицу времени неизменно, а количество молекул конденсирующихся в единицу времени из газовой фазы пропорционально давлению паров этой жидкости над каплей. Получите теоретическую зависимость давления паров испаряющейся в замкнутом пространстве жидкости от времени. В каких координатах график полученной зависимости будет линейным? Постройте линеаризованный график.

Если получить явное выражение для зависимости давления от времени не удается, предположите координаты, в которых зависимость скорости изменения давления от давления может быть описана линейной функцией.

Примечание: Если малые приращения da и db величин a и b связаны соотношением следующего вида: $\frac{da}{a} = k \cdot db$, где $k = \text{const}$, то связь между большими приращениями этих величин рассчитывается по формуле: $\Delta(\ln a) = k \cdot \Delta b$.

4. Постройте измеренную в пункте 2 зависимость в координатах, предложенных в пункте 3, на миллиметровой бумаге. Сделай вывод, выполняется ли модель испарения жидкости, описанная в пункте 3, для измеренных вами данных.

5. Не разбирая установку, зажмите шприц с помещенной в него жидкостью в руку. Измерьте давление насыщенного пара в шприце при температуре T_h .

6. По полученным данным определите давление насыщенного пара неизвестной жидкости при температуре 28°C .

Оборудование: 9 шприцев номиналом 20 мл (без игл), шприц номиналом 5 мл с иглой с неизвестной жидкостью - по запросу шприц может быть дополнительно наполнен жидкостью (не более 3 раз), шприц номиналом 1 мл (без иглы), трубка силиконовая, скотч, рулетка, секундомер, термометр, салфетки для поддержания рабочего места в чистоте.

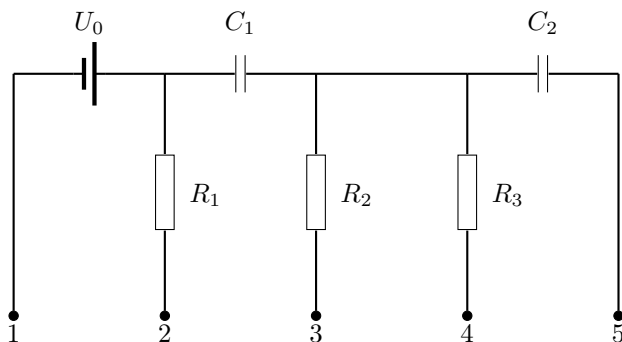
Примечание:

1. Скорость диффузии паров неизвестной жидкости по выданной трубке крайне мала. Примите атмосферное давление равным $p_0 = (102 \pm 1)$ кПа.
2. Вам выдано достаточно большое количество шприцев номиналом 20 мл, чтобы для каждого эксперимента использовать новый, без следов неизвестной жидкости.
3. Секундомер используйте в режиме часов, поскольку в данной работе достаточно точности измерения времени в 1 секунду.
4. Считайте, что погрешность нанесения шкалы на шприцы номиналом 20 мл составляет 0,1 мл.
5. У выданных вам термометров сдвинута шкала, поэтому на корпусе каждого указана поправка к его показаниям. Если написано +1, то реальная температура на один градус выше показаний термометра.

Задача №2. Необычные мосты

В задаче требуется оценка погрешности

В компанию по ремонту электроники принесли блок управления сигнализацией, который работал некорректно. В результате диагностики подозрения пали на один из чипов (микросхем), электрическая схема которого представлена на рисунке.



Задание:

1. Укажите в начале отчета номер выданной вам модели чипа. С помощью имеющегося оборудования проверьте соответствие параметров чипа табличным.

Контрольные параметры:

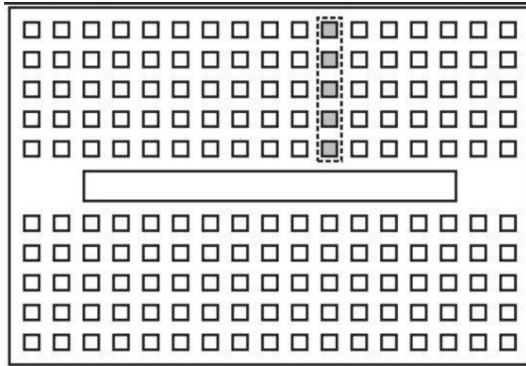
- напряжение источника $U_0 = (3,2 \pm 0,2)$ В;
- сопротивление резистора $R_1 = (4,7 \pm 0,4)$ кОм;
- сопротивление резистора $R_2 = (13 \pm 1)$ кОм;
- сопротивление резистора $R_3 = (40 \pm 3)$ кОм;
- отношение ёмкостей $C_2/C_1 = (3,3 \pm 0,7)$.

Оборудование: мультиметр с проводами для макетной платы, потенциометр, модель чипа с 5 выводами, макетная плата, соединительные провода 4 шт.

Важно! На конце вывода №1 модели чипа размещен защитный прозрачный скотч, который необходимо удалить перед началом работы. Соединительные провода выданы шлейфом, при необходимости вы можете отделить их друг от друга.

Погрешность мультиметра считайте равной 1% от измеряемой величины, но не менее 3 единиц последнего разряда. Источник можно считать идеальным. Про внутреннее сопротивление мультиметра в режимах вольтметра и амперметра ничего не известно.

Примечание: макетная плата используется для соединения проводов и подключения различных элементов. Каждые пять соседних гнёзд макетной платы, расположенные в одном столбце, внутри платы соединены между собой. Например, соединены выводы, отмеченные серым на рисунке.



11 класс

Задача №1. Звук в сосуде

Оборудование

- цилиндрическая полипропиленовая трубка
- мерный цилиндр (объем 100 мл)
- мерный цилиндр (объем 50 мл, диаметр 22,5 мм)
- стакан с водой (200 мл)
- компьютер с установленной программой анализа звукового спектра
- встроенный в компьютер микрофон
- миллиметровая бумага А4 для построения графиков.

Теоретическая справка

При распространении звуковых волн в газе частицы воздуха колеблются вдоль направления распространения звуковой волны (продольные волны). Это приводит к локальным изменениям плотности газа ρ и его давления p . В гармонических звуковых волнах, распространяющихся вдоль оси Ox , изменение давления Δp по отношению к равновесному зависит от координаты x и от времени t по закону

$$\Delta p(x,t) = p_0 \cos(\omega t \pm kx), \quad (1)$$

где p_0 — амплитуда колебаний давления.

Знаки «+» и «-» в аргументе косинуса соответствуют двум направлениям распространения волны («-» в положительном направлении, «+» в отрицательном). Частота колебаний f , циклическая частота ω , волновое число k , длина волны λ , скорость звука c связаны соотношениями

$$\omega = 2\pi f, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad c = \lambda f.$$

Уравнение (1) представляет собой уравнение плоской бегущей волны. В случае взаимодействия или интерференции двух встречных плоских волн возникает колебательный процесс, который называется *стоячей волной*. При сложении уравнений для двух бегущих навстречу волн одинаковой амплитуды получается уравнение стоячей волны

$$\Delta p(x,t) = 2p_0 \cos(kx) \cos(\omega t).$$

Здесь выражение $2p_0 \cos(kx)$ представляет собой амплитуду колебаний давления в точке пространства с координатой x . В точках, координаты которых удовлетворяют условию $|\cos(kx)| = 1$ или

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm n\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения. Такие точки называются *пучностями* волны и их координаты равны $x_{\text{п}} = \pm n \frac{\lambda}{2}$. В точках, для которых $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = 0$ или

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

амплитуда колебаний равна нулю. Такие точки называются узлами стоячей волны и их координаты равны $x_{\text{у}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$. Отметим, что точки, соответствующие узлам давления являются *пучностями* перемещений частиц среды, в которой возбуждена стоячая волна. Наоборот, в точках с пучностями давлений наблюдаются узлы волны для перемещений частиц. Звуковые волны в газах обычно представляют сумму колебаний с множеством различных частот. Одной из основных характеристик звуковых колебаний является *спектр*. Под спектром понимают совокупность гармонических колебаний различных частот, на которые может быть разложено сложное колебательное движение. График спектра представляет собой функцию, описывающую зависимость амплитуды *гармоник* от их частот. Один из интересных объектов при изучении звуковых колебаний — резонатор в виде трубы, заполненной воздухом открытой с обоих концов, либо закрытой с одного конца. Воздух, ограниченный объемом трубы, является колебательной системой. Как любая колебательная система, выведенный из положения равновесия воздух внутри трубы совершает свободные колебания, называемые собственными или нормальными колебаниями. Частоты, на которых система совершает нормальные колебания, называются собственными частотами или нормальными модами. При возбуждении звуковых колебаний у открытого конца трубы воздух в трубе совершает колебания с частотами, соответствующими собственным. Спектр собственных колебаний зависит от того, открыт или закрыт второй край трубы. Если оба конца трубы открыты, то в трубе возникают стоячие волны, для которых узлы давления располагаются на концах трубы. Длина таких волн соответствует условию

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где L — длина трубы. Для закрытой с одного конца трубы стоячие волны характеризуются пучностью давления (узлом для смещения частиц) на закрытом конце трубы и узлом давления на открытом. В этом случае связь между длиной трубы и длиной волны определяется выражением

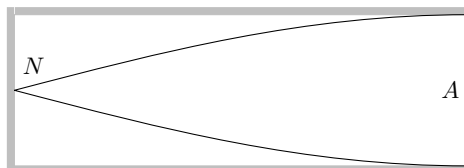
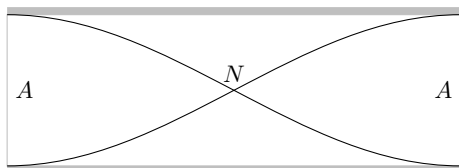
$$L = n \frac{\lambda}{4}, \quad (n = 1, 3, 5, \dots).$$

Для наглядности ниже представлены схемы первых гармоник для открытой и закрытой труб. Гармоника, соответствующая самой низкой собственной частоте

(самой большой длине волны) называется основным (нулевым) обертоном, далее с увеличением частоты следуют первый, второй и так далее обертона. На схемах представлены стоячие волны смещения частиц. Буквы N на схемах соответствуют нулевому смещению частиц (узлам стоячей волны смещения), буквы A — максимальной амплитуде стоячей волны смещения.

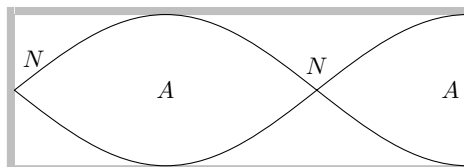
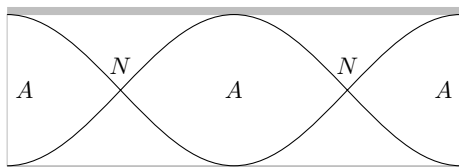
Открытая труба

Закрытая труба



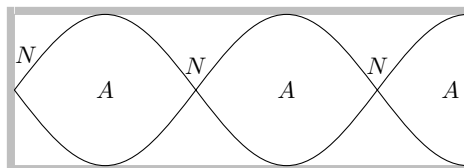
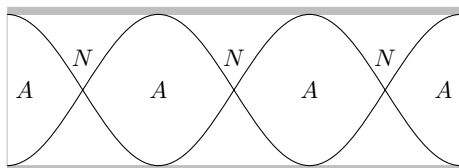
Основной резонанс

Основной резонанс



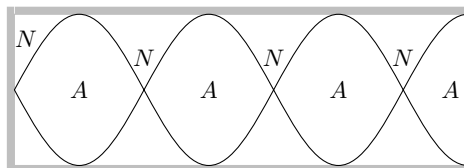
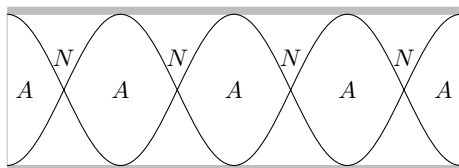
Первый обертон

Первый обертон



Второй обертон

Второй обертон



Третий обертон

Третий обертон

Рисунок 1

В нашей работе при анализе спектра звука в цилиндрических трубах предла-

гается использовать программу Audacity, установленную на Вашем компьютере. Для возбуждения звуковых колебаний следует продуть воздух вблизи открытого конца трубки. Делать нужно это так, чтобы получалось достаточно громко.

Проделайте несколько измерений для выявления лучших условий, дающих хорошую картину пиков. Старайтесь располагать цилиндры и трубку поблизости с компьютером, но не направляйте поток воздуха на сам компьютер. Для начала записи нажмите на характерную красную кнопку и остановите после 5-10 секунд непрерывного выдувания.

Для анализа спектра нужно выделить либо всю дорожку либо ее часть и выбрать в меню следующий пункт (см. рисунок 2):

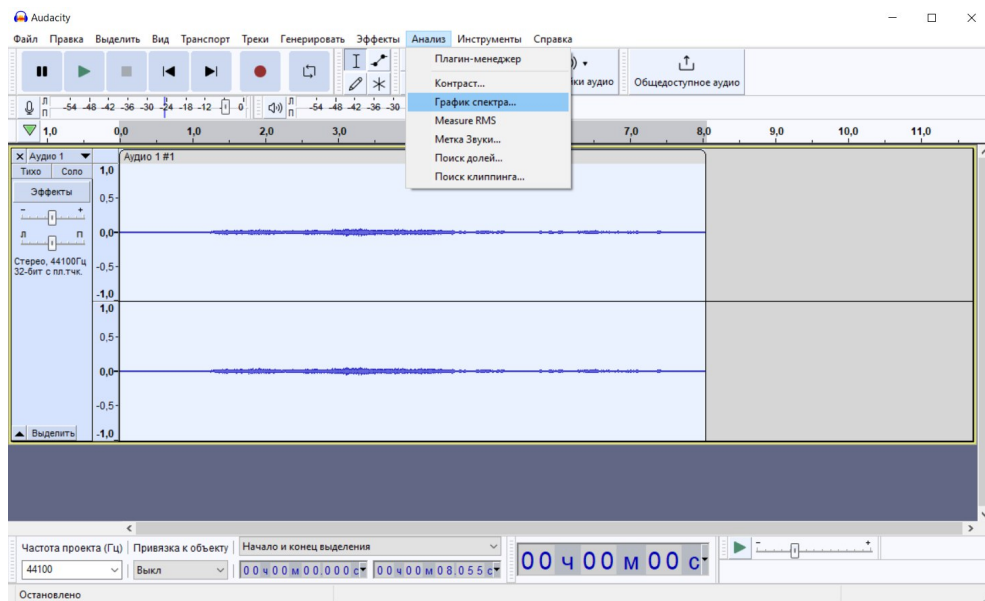


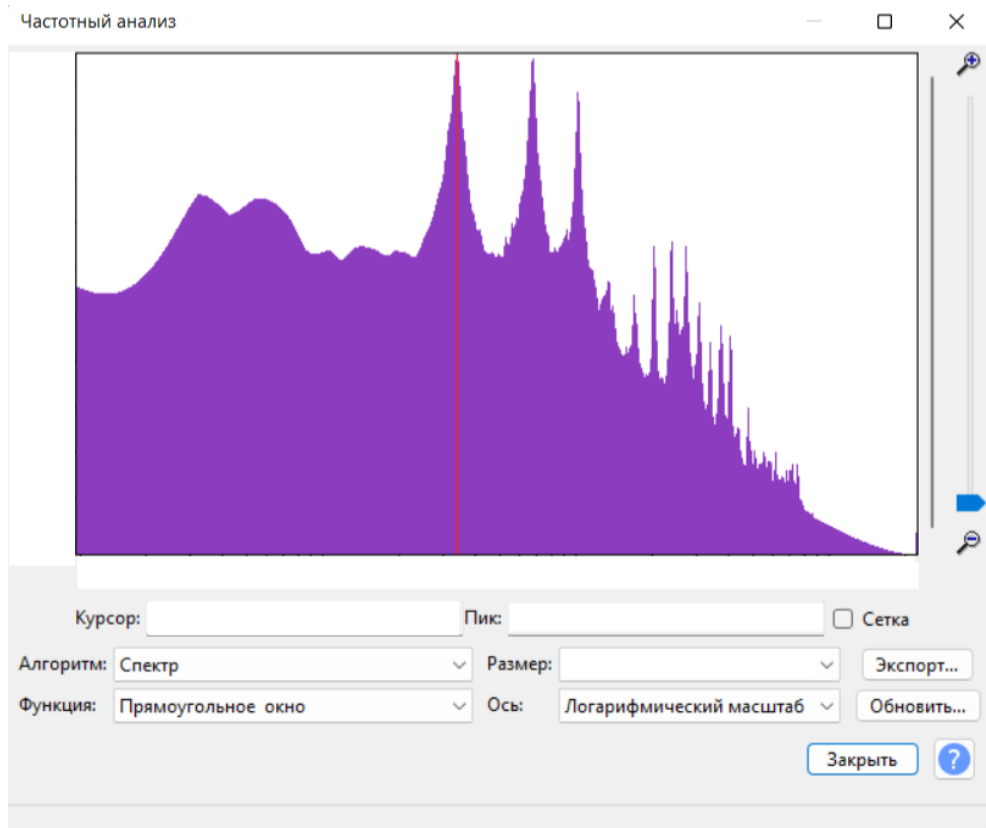
Рисунок 2

На рисунке 3 в качестве примера представлен спектр звукового сигнала, зарегистрированный при продувании воздуха вблизи открытого конца трубки, полученный с помощью этой программы.

На графике хорошо выделяются пики, соответствующие частотам стоячих волн в цилиндре. Чтобы понять каким значениям n в формулах (2) и (3) они соответствуют, воспользуйтесь приблизительным значением скорости звука $c = 340$ м/с.

Один из параметров, который вы можете регулировать для получения оптимальной картины — «Размер», который отвечает за степень дискретизации

спектра: при уменьшении **Размера** пики сглаживаются и снижается точность определения положения их максимума, а при большом **Размере** появляются дополнительные пики, не соответствующие резонансным частотам.



1. Создайте папку на рабочем столе, назвав ее, используя следующий шаблон: ААММ (АА — номер аудитории, например 03 или 12, ММ — номер вашего места, например 05 или 13). Получите спектр звуковых колебаний в трубке ПВХ, длина которой $L = (50,0 \pm 0,4)$ см, при открытых концах. Сохраните его, нажав на кнопку «Экспорт», в созданную вами папку, назвав файл по шаблону 1ЕХ, где Х — порядковый номер спектра в данном пункте задачи. Для этого пункта требуется выполнить серию измерений (не менее 3). **Внимание!** Сохраняйте только те спектры, которые будут использованы в решении. Все используемые вами данные должны быть подтверждены файлом со спектром, только они будут оценены. Используя представления о спектре стоячих волн, возникающих в

трубке, уточните скорость звука в воздухе при температуре помещения. Строить график в этом и в следующем пунктах не нужно.

2. Повторите п.1 для трубки с одним закрытым концом. Спектры для этого пункта сохраняйте по шаблону 2EX, где X — порядковый номер спектра в данном пункте задачи. Сравните полученные результаты и оцените их погрешность. Для этого пункта требуется выполнить серию измерений (не менее 3).

3. Исследуйте изменение спектра стоячих волн, возникающих в мерном цилиндре (100 мл) в зависимости от объёма воды в нём. Для этого рассматривайте только один из пиков, соответствующий основному резонансу. Спектры для этого пункта сохраняйте по шаблону 3EX, где X — порядковый номер спектра в данном пункте задачи. Предложите график зависимости измеряемых величин, по данным которого определите высоту H и внутренний диаметр D мерного цилиндра и оцените погрешность полученных результатов. Измерения проводите в пределах шкалы мерного цилиндра, не менее 5 значений.

4. Вообще говоря, частоты стоячих волн в цилиндрах зависят не только от длины цилиндра, но и от его диаметра. Узлы и пучности располагаются не точно по краям цилиндров. Эмпирические исследования показывают, что с неплохой точностью эффективная длина цилиндра $L_{\text{эфф}}$ может быть получена при использовании формулы

$$L_{\text{эфф}} = L + \beta \cdot D,$$

где D — внутренний диаметр цилиндра, β — безразмерный коэффициент.

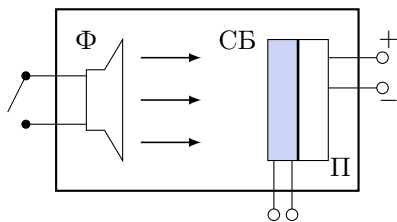
Исследуйте зависимость $L_{\text{эфф}}$ для мерного цилиндра объемом 50 мл при разных объёмах воды в нём. Для этого рассматривайте только один из пиков, соответствующий основному резонансу. Спектры для этого пункта сохраняйте по шаблону 4EX, где X — порядковый номер спектра в данном пункте задачи. Измерения проводите в пределах шкалы мерного цилиндра, не менее 5 значений. Оцените погрешность полученных величин.

5. Используя полученные экспериментальные данные, постройте график зависимости, по которому определите значение β в формуле для $L_{\text{эфф}}$. В вычислениях используйте полученную ранее скорость звука.

Если же выполнить первый пункт не удалось, то примите скорость звука равной $c = 340$ м/с. Укажите это в решении.

Задача №2. Солнечные батареи

В настоящее время доля солнечных батарей в выработке электроэнергии быстро увеличивается. Это объясняет повышенный интерес к эффективности солнечных батарей и влияющим на неё факторам. Одним из таких факторов является температура. В



данной работе предлагается исследовать влияние температуры на эффективность преобразования энергии светового излучения в электрическую энергию для небольшой солнечной батареи.

Перечень оборудования: бокс с фонариком (Ф), солнечной батареей (СБ), элементом Пельтье (П) и разъемами для их подключения (см. рис.), мультиметр, потенциометр с максимальным сопротивлением 10 кОм, регулируемый источник питания для элемента Пельтье, два провода крокодил-крокодил, миллиметровая бумага.

Комментарии к оборудованию

Элемент Пельтье: элемент Пельтье представляет собой термоэлектрический полупроводниковый преобразователь, между двумя поверхностями которого возникает разность температур при протекании через него электрического тока. В данной работе предлагается использовать элемент Пельтье только для нагрева СБ. Контакты элемента Пельтье (красный и черный провода) через специальный разъем подключаются к регулируемому блоку питания. *Перед включением питания элемента Пельтье убедитесь, что регулятор напряжения находится в крайнем левом положении.*

Фонарик: в качестве источника света используется светодиодный фонарик. Фонарик включается при нажатии кнопки переключателя. Питание фонарика осуществляется от USB ноутбука.

Солнечная батарея: полупроводниковое устройство, преобразующее энергию света в электрическую. При освещении СБ между ее контактами возникает напряжение. Контакты СБ — два провода одинакового цвета с залуженными концами. Их подключение производится с помощью проводов крокодил-крокодил. На боксе приводится номер экспериментальной установки, *который необходимо написать в начале работы*, а также угловой коэффициент в зависимости напряжения холостого хода U_{xx} от температуры СБ ($\Delta U_{xx}/\Delta T$). Обратите внимание, что с ростом температуры величина U_{xx} *снижается*.

Регулирование и определение температуры СБ: Температуру предлагается регулировать при помощи элемента Пельтье посредством изменения напряжения на его выводах. Крепление СБ на поверхность элемент Пельтье осуществляется с помощью хорошо проводящего тепло термоскотча. Для определения температуры СБ используется линейность зависимости напряжения холостого хода от температуры $U_{xx}(T)$ (за U_{xx} принимается напряжение на СБ при разомкнутых контактах и включенном фонарике) в диапазоне температур от -10°C до $+70^\circ\text{C}$. *Если при включении фонарика напряжение U_{xx} ниже 0,5 В обратитесь к дежурному.*

Задание

1. Изменяя сопротивление нагрузки (потенциометра) при температуре помещения, исследуйте зависимость мощности СБ, отдаваемой во внешнюю цепь, от сопротивления нагрузки $P(R)$. Приведите график этой зависимости (не менее 15

точек). Определите максимальную мощность. Температура в помещении будет задана дополнительно. Порядок измерений следующий:

- при выключенном фонарике установите определенное сопротивление потенциометра,
- включите фонарик и как можно быстрее произведите измерение,
- после измерения напряжения сразу выключите фонарик.

Если фонарик не выключать, то будет происходить дополнительный нагрев СБ.

2. Исследуйте зависимость **максимальной** мощности СБ, отдаваемой во внешнюю цепь, от температуры СБ (не менее 4-х значений температуры, включая комнатную). Постройте график зависимости максимальной мощности СБ от температуры $P_{max}(T)$. Графики зависимости мощности от сопротивления нагрузки для отдельных серий измерения (как в п.1) строить **не обязательно**. Необходимое количество точек для нахождения $P_{max}(T)$ определите самостоятельно. Приведите использованные экспериментальные данные. Изменение температуры должно осуществляться путем изменения напряжения на элементе Пельтье. Имейте в виду, что равновесная температура при заданном напряжении устанавливается довольно долго (до 20 минут). Об установлении равновесия можно судить по прекращению значимых изменений напряжения холостого хода СБ (U_{xx}). Если вы после измерений при высоких температурах захотите повторить измерения при более низкой температуре, охлаждение также может занять значительное время. Учитывайте это, планируя эксперимент. Рекомендуемый диапазон изменения напряжения на выводах элемента Пельтье от 3 В до 6 В. Примерное значение напряжения отображается на блоке питания элемента Пельтье. **Не превышайте рекомендуемое напряжение! В противном случае элемент Пельтье может выйти из строя. Замена элемента не предусмотрена.**

3. В линейном приближении определите угловой коэффициент зависимости $P_{max}(T)$.

4. В предложенной ниже таблице приведены средние дневные температуры в Сочи и в Чите за период весна-лето и суммарные инсоляции тех же городов за тот же период времени. Под инсоляцией в данном случае понимается суммарная энергия солнечного излучения, приходящаяся на единицу площади (за определенный период). Предположим, что в Сочи и в Чите расположены две одинаковые СБ, которые используются оптимальным способом. Найдите отношение энергий, которые вырабатываются этими батареями в Сочи и в Чите за период с марта по август. Считайте, что вырабатываемая энергия СБ при заданной температуре прямо пропорциональна инсоляции. Используйте данные таблицы и результаты ваших измерений зависимости максимальной мощности СБ от температуры, эту зависимость считайте линейной в рассматриваемом диапазоне температур. Приведите формулы, которые вы использовали для вычисле-

ний. Сравните отношение энергий с отношением суммарных инсоляций.

Сочи, 43,6° с.ш.	Средняя дневная темпе- ратура, °С	Суммарная инсоляция опти- мально располо- женной площадки за ме- сяц, кВт · час/м ²	Чита, 52,0° с.ш.	Средняя дневная темпе- ратура, °С	Суммарная инсоляция опти- мально располо- женной площадки за ме- сяц, кВт · час/м ²
Март	11,0	123,6	Март	-1,0	158,4
Апрель	14,9	138,6	Апрель	5,5	165,6
Май	20,2	176,7	Май	14,6	173,7
Июнь	25,0	203,7	Июнь	21,1	169,2
Июль	27,8	212,7	Июль	24,3	153,9
Август	28,8	188,7	Август	20,7	140,7

Возможные решения

Задача №9-Е1. Бистабильная система

В нижней части направляющих конструкции найдем два числа (четное и нечетное), в бланк ответов запишем нечетное, которое служит для однозначной идентификации установки, на которой проводились измерения.

Для измерения требуемой силы F существует два способа. Можно использовать динамометр во всем диапазоне изменения y . Однако этот способ имеет недостатки. Из-за габаритов конструкции сложно обеспечить вертикальность приложенной силы; точность измерений зависит в том числе и от цены деления динамометра. Поэтому будем использовать бутылку, привязанную на нити. В бутылку с помощью шприца будем наливать известный объем воды и таким образом регулировать силу с большей точностью.

Величину $2y$ будем измерять линейкой, а соответствующую величину $2x$ можно либо измерять непосредственно, а можно вычислять по теореме Пифагора, предварительно измерив сторону ромба $a = 190$ мм. Следует обратить внимание, что пружина имеет начальное сжатие, и ее длина начинает увеличиваться только после превышения силой F определенного значения.

Заметим, что каждому значению силы F соответствует два положения равновесия – верхнее устойчивое и нижнее неустойчивое. Поэтому целесообразно для каждой массы бутылки с водой сразу измерять оба значения y – верхнее и нижнее.

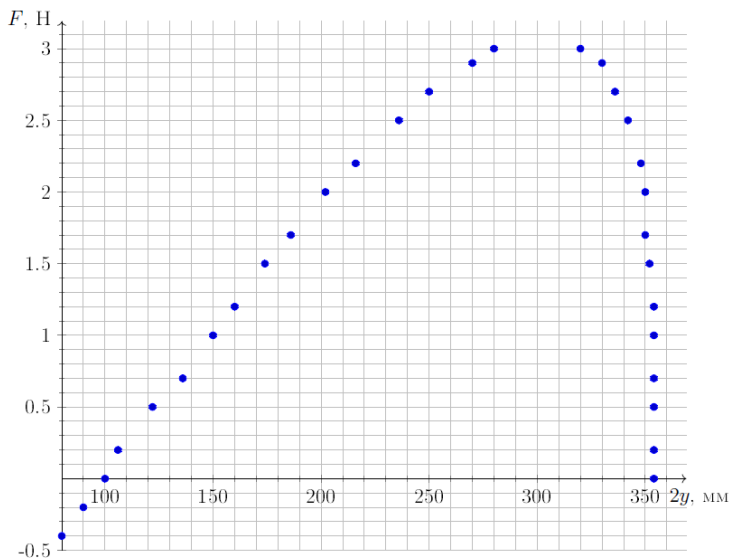
При измерениях ниже неустойчивого положения равновесия, которое реализуется при $F = 0$ и при $y < 50$ мм, направление силы F изменяется. Для удержания системы в положении равновесия силу F необходимо прикладывать вверх и измерять ее динамометром.

Снимем зависимость $F(y, x)$. Ниже приведена таблица измерений.

F , Н	$2y_{\text{в}}$, мм	$y_{\text{в}}$, мм	$x_{\text{в}}$, мм	$2y_{\text{н}}$, мм	$y_{\text{н}}$, мм	$x_{\text{н}}$, мм
0	354	177	69	100	50	183
0,2	354	177	69	106	53	182
0,5	354	177	69	122	61	180
0,7	354	177	69	136	68	177
1,0	354	177	69	150	75	174
1,2	354	177	69	160	80	172
1,5	352	176	72	174	87	168
1,7	350	175	74	186	98	162
2,0	350	175	74	202	101	160
2,2	348	174	76	216	108	156
2,5	342	171	83	236	118	149

F , Н	$2y_B$, мм	y_B , мм	x_B , мм	$2y_H$, мм	y_H , мм	x_H , мм
2,7	336	168	88	250	125	143
2,9	330	165	94	270	135	134
3,0	320	160	102	280	140	128
-0,2				90	45	185
-0,4				80	40	186

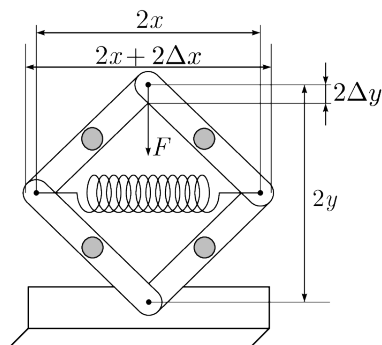
На рисунке представлен график зависимости, построенной по результатам проведенных измерений.



Существует два равноценных метода вычисления силы F : через статическое равновесие и через метод виртуальных перемещений. Воспользуемся последним.

Если вертикальная диагональ ромба уменьшится на величину $2\Delta y$, то центр масс системы опустится на величину Δy , а горизонтальная диагональ ромба (дополнительное растяжение пружины) увеличится на $2\Delta x$.

При незначительном отклонении системы от положения равновесия суммарная работа всех внешних сил равна нулю:



$$F \cdot 2\Delta y + mg \cdot \Delta y - k(2x - l_0) \cdot 2\Delta x = 0 \quad (1)$$

Пусть сторона ромба равна

$$x^2 + y^2 = a^2, \quad (2)$$

тогда

$$(x + \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 = a^2. \quad (3)$$

Раскрывая скобки, вычитая (2) из (3) и пренебрегая слагаемыми второго порядка малости получим, что

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{y}{x}. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (1) приобретает вид

$$F = \frac{k(2x - l_0)y}{x} - \frac{mg}{2} \quad (5)$$

и представляет собой теоретическую зависимость силы F , обеспечивающую равновесное состояние системы, от величин y и x .

Для вычисления l_0 используем две пары значений $(y_{\text{в}}, x_{\text{в}})$ и $(y_{\text{н}}, x_{\text{н}})$, которые получены для верхнего и нижнего равновесия при одной и той же силе F . Сила F должна быть достаточной для того, чтобы пружина начала удлиняться.

Согласно (5)

$$F = \frac{k(2x_{\text{в}} - l_0)y_{\text{в}}}{x_{\text{в}}} - \frac{m_0g}{2} = \frac{k(2x_{\text{н}} - l_0)y_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} - \frac{mg}{2},$$

откуда $l_0 = 2(y_{\text{в}} - y_{\text{н}}) / \left(\frac{y_{\text{в}}}{x_{\text{в}}} - \frac{y_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \right)$.

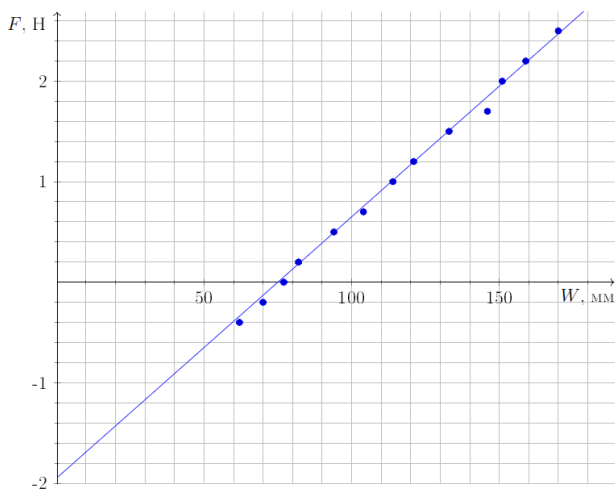
Для расчета используем значения $y_{\text{в}} = 174$ мм, $y_{\text{н}} = 108$ мм, $x_{\text{в}} = 76$ мм, $x_{\text{н}} = 156$ мм, соответствующие $F = 2,2$ Н, и получим $l_0 = 83$ мм. Такое же значение получается, если для расчетов взять другую пару y и x .

Преобразуем выражение (5), получим $F = k \cdot W - \frac{mg}{2}$. Функция $F(W)$ является линейной.

Дополним таблицу измерений столбцом значений W , рассчитанных для нижнего положения равновесия, так как только в этом случае пружина остается растянутой во всем диапазоне измерений.

$F, \text{Н}$	$y_{\text{Н}}, \text{мм}$	$x_{\text{Н}}, \text{мм}$	$W, \text{мм}$
0	50	183	77
0,2	53	182	82
0,5	61	180	94
0,7	68	177	104
1,0	75	174	114
1,2	80	172	121
1,5	87	168	133
1,7	98	162	146
2,0	101	160	151
2,2	108	156	159
2,5	118	149	170
2,7	125	143	
2,9	135	134	
3,0	140	128	
-0,2	45	185	
-0,4	40	186	

Построим график зависимости $F(W)$.



По угловому коэффициенту прямой находим $k = 26 \text{ Н/м}$, а по пересечению с осью ординат $m = 390 \text{ г}$.

Задача №9-Е2. Терморезистор

Запишем температуру в аудитории $T_0 = 22^\circ\text{C}$.

Поворотом ручки регулировки включим адаптер. Вращая ручку, убедимся, что диапазон напряжения работы адаптера от 3,90 В до 12,0 В.

Так как в условии сказано, что при изменении питания терморезистор приходит к стационарному режиму за время порядка двух минут, то после подключения терморезистора в цепь во время снятия измерений разрывать цепь нельзя, это с одной стороны. С другой стороны нас просят снять зависимость напряжения от силы тока, а измерительный прибор, т.е. мультиметр у нас один. Поэтому измерять напряжение на терморезисторе мы будем мультиметром в режиме вольтметра непосредственно с терморезистора, а для получения силы тока, будем измерять напряжение на известном сопротивлении и вычислять силу тока. Рассмотрим различные варианты подключения терморезистора в цепь:

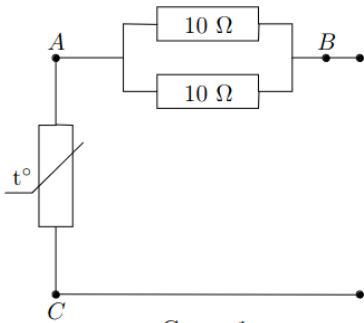


Схема 1.

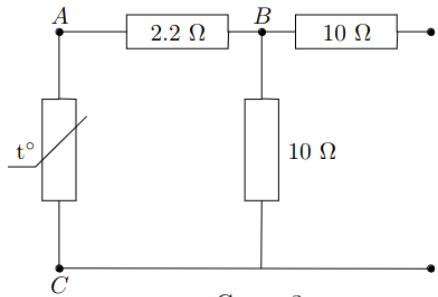


Схема 3.

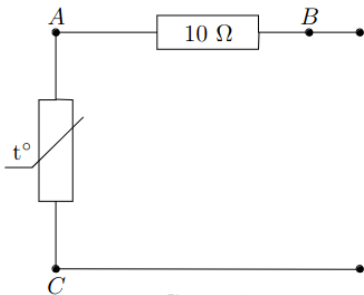


Схема 2.

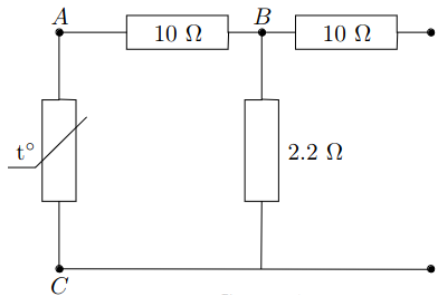


Схема 4.

Самая простая это схема 2, но в условии просят не превышать тепловую мощность тока выше 50 % максимальной мощности, это означает, что через резистор с сопротивлением 10 Ом не должен протекать ток, сила которого больше

$I_{2\max} = \sqrt{\frac{0.5P_{\max}}{R}} \approx 0,71$ А. Такой ток не достаточен для получения искомой зависимости. Схема 1 позволяет пропускать через терморезистор ток до 1 А, не превышая предельной тепловой мощности на резисторах. Минимальный ток, возможный при таком подключении определяется минимальным напряжением, который может выдать регулируемый адаптер. Проводим измерения и записываем в таблицу. Следим за показаниями мультиметра. Когда напряжение перестает изменяться, записываем показания.

Так как для каждой точки необходимо ожидать около 2-х минут, не теряем время, вычисляем силу тока, сопротивление и мощность. Для получения силы тока, текущего через терморезистор, воспользуемся законом Ома $I_{\text{тр}} = \frac{U_{AB}}{5 \text{ Ом}}$.

Для измерения точек с меньшим током воспользуемся схемой 2, тогда $I_{\text{тр}} = \frac{U_{AB}}{10 \text{ Ом}}$. Максимальное значение напряжения выставляем чуть меньше удвоенного напряжения последней точки в схеме 1, что будет соответствовать чуть меньшему току предыдущей схемы.

Последняя точка во второй схеме опять ограничивается минимальным напряжением адаптера. Собираем схему 3, которая представляет собой делитель напряжения. Регулируем адаптер так, чтобы напряжение на резисторе 2,2 Ом было чуть меньше напряжения последней точки схемы 2, умноженного на коэффициент $\frac{2,2}{10}$.

Для получения токов наименьшего значения собираем схему 4. Регулируем адаптер так, чтобы напряжение на резисторе 10 Ом было чуть меньше напряжения последней точки схемы 3, умноженного на коэффициент $\frac{10}{2,2}$.

Таблица экспериментальных и расчётных данных:

Схема	R_{AB} , Ом	U_{AC} , В	U_{AB} , В	I_{tr} , А	R_{tr} , Ом	N_{tr} , Вт	T_{tr} , °С
1	5	1,12	5,03	1,006	1,11	1,127	166
1	5	1,14	4,65	0,930	1,23	1,060	158
1	5	1,18	3,99	0,798	1,48	0,942	143
1	5	1,22	3,54	0,708	1,72	0,864	133
1	5	1,28	3,01	0,602	2,13	0,771	121
1	5	1,32	2,57	0,514	2,57	0,678	110
2	10	1,37	4,52	0,452	3,03	0,619	102
2	10	1,40	3,84	0,384	3,65	0,538	92
2	10	1,41	3,59	0,359	3,93	0,506	88
2	10	1,44	3,00	0,300	4,80	0,432	79
2	10	1,42	2,24	0,224	6,34	0,318	65

Схема	R_{AB} , Ом	U_{AC} , В	U_{AB} , В	I_{tr} , А	R_{tr} , Ом	N_{tr} , Вт	T_{tr} , °С
3	2,2	1,48	0,529	0,240	6,16	0,356	69
3	2,2	1,45	0,394	0,179	8,10	0,260	57
3	2,2	1,35	0,283	0,129	10,5	0,174	47
3	2,2	1,20	0,193	0,088	13,7	0,105	38
4	10	0,90	0,511	0,051	17,6	0,0460	31
4	10	0,80	0,433	0,043	18,5	0,0346	29
4	10	0,41	0,200	0,020	20,5	0,0082	26

Так как в условии задачи предложили считать коэффициент теплоотдачи постоянным применим закон Ньютона-Рихмана:

$$P_{95} = \alpha(95^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}).$$

С другой стороны, рассеиваемая мощность равна

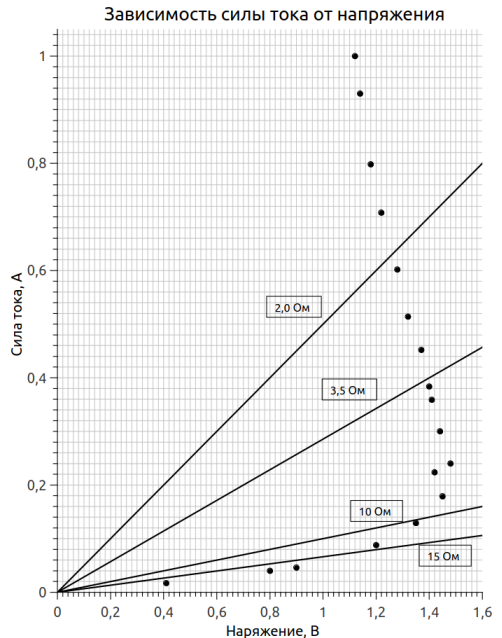
$$P_{95} = I_{3,5}U_{3,5} = 0,40 \text{ А} \cdot 1,4 \text{ В} = 0,56 \text{ Вт},$$

где $I_{3,5}$, $U_{3,5}$ – ток и напряжение в точке пересечения ВАХ резистора 3,5 Ом и найденной зависимости, откуда коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = 0,0077 \frac{\text{Вт}}{^{\circ}\text{C}}.$$

Найдем точки пересечения ВАХ резисторов с номиналами 2 Ом, 10 Ом и 15 Ом с исследуемой зависимостью и получим соответствующие значения тока и напряжения. Их произведение равно мощности, зная коэффициент теплоотдачи и тепловой мощности определим соответствующие температуры:

$$T_{15} = 32^{\circ}\text{C}, \quad T_{10} = 54^{\circ}\text{C}, \quad T_2 = 126^{\circ}\text{C}.$$



Задача №10-Е2. Насыщенный пар

Выдвинем поршень большого шприца в максимальное положение. Длина объема воздуха внутри шприца в этом случае составит $z = (7,9 \pm 0,1)$ см. Длина его шкалы, соответствующая $V_0 = (20,0 \pm 0,1)$ мл, составляет $z_0 = (6,9 \pm 0,1)$ см. Тогда объем воздуха внутри шприца составляет:

$$V = V_0 \frac{z}{z_0} = (22,9 \pm 0,7) \text{ мл.}$$

Оценим погрешность измеренного объема:

$$\Delta V = V_0(\varepsilon_z + \varepsilon_{z_0}) = 0,7 \text{ мл.}$$

Измерим площадь внутреннего сечения трубки. Для этого наберем в шприц объемом 1 мл жидкость. Наденем трубку на шприц, зальем небольшое количество жидкости в трубку, так чтобы поршень шприца встал в положение, соответствующее объему жидкости внутри шприца $v_1 = (1,00 \pm 0,01)$ мл. Сделаем отметку на трубке. Далее закачаем в трубку жидкость до момента, пока поршень не сместится до положения $v_2 = (0,10 \pm 0,01)$ мл. Вновь сделаем отметку на трубке. Измерим расстояние $l = (13,8 \pm 0,1)$ см между отметками на трубке с помощью линейки. Величина поперечного сечения трубки составит:

$$s = \frac{v_1 - v_2}{l} = (6,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$$

Запишем величину комнатной температуры $T_0 = (23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C} \approx 296 \text{ К}$. Соберем установку, изображенную на рисунке.

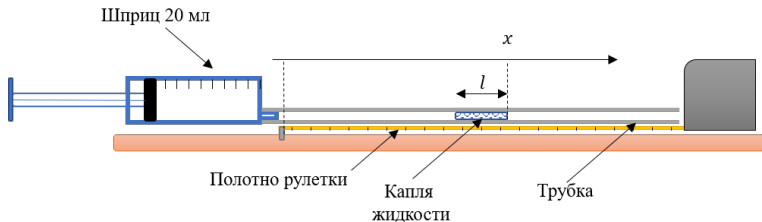


Рис. 1

Для этого закрепим на столе полотно рулетки с помощью скотча. Положим на полотно рулетки трубку, также закрепим ее скотчем. С помощью шприца объемом 1 мл поместим в трубку каплю жидкости на небольшом расстоянии от одного из концов трубки. Вставим в этот конец трубки кончик шприца объемом

20 мл. После подключения шприца к трубке сделаем отметку на трубке, соответствующую дальней от шприца границе капли жидкости. Следить за дальней от шприца границей капли необходимо по причине того, что при движении капли по трубке, капля может дробиться на более мелкие. Последнее приводит к тому, что часть воздуха попадает в пространство между вновь образованными каплями и смещение ближней к шприцу границы не отвечает изменению суммарного объема воздуха. Возьмем шприц в руку и засечем время на секундомере. Капля начнет движение по трубке в направлении от шприца. По прошествии 5 минут вновь сделаем отметку на трубке, соответствующую дальней от шприца границе капли. Измерим расстояние между отметками на трубке $l_d = (10,7 \pm 0,1)$ см. Будем предполагать, что воздух, вышедший из шприца в трубку, имеет температуру окружающей среды. Также известно, что давление внутри шприца и трубки равно атмосферному p_0 . Запишем тогда условие сохранения количества воздуха внутри системы при изменении температуры воздуха в шприце:

$$\frac{p_0(V + V_t)}{T_0} = \frac{p_0(l_d s + V_t)}{T_0} + \frac{p_0 V}{T_h},$$

где V_t - объем воздуха внутри трубки до ее нагрева. Тогда для температуры воздуха внутри шприца после нагрева имеем:

$$T_h = \frac{T_0}{1 - \frac{s l_d}{V}} = 305,3 \text{ K} = (32,3 \pm 1,6) \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для оценки погрешности преобразуем в первом порядке малости:

$$T_h - T_0 = T_0 \frac{s l_d}{V}.$$

Тогда абсолютную погрешность повышения температуры можно рассчитать как:

$$\Delta T_h = \Delta T_0 + (T_h - T_0)(\varepsilon_{T_0} + \varepsilon_s + \varepsilon_{l_d} + \varepsilon_V) = 1,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Отключим от трубки нагретый шприц. Поместим в трубку с помощью шприца объемом 1 мл каплю достаточно большого объема. Расположим каплю при этом достаточно близко к одному из концов трубки. Измерим ее длину $l_0 = (16,0 \pm 0,1)$ см. Подключим к этому концу трубки новый шприц объемом 20 мл. Сделаем отметку на трубке, соответствующую дальней от шприца границе капли, и запишем ее координату $x_0 = (31,5 \pm 0,1)$ см. Подключим к противоположному концу трубки шприц объемом 1 мл, предварительно наполнив его воздухом. Будем нажимать на поршень малого шприца так, чтобы капля начала движение к большому шприцу. Контролируя движение капли с помощью малого шприца, поместим таким образом каплю объемом приблизительно 0,2 мл в большой шприц.

Запустим секундомер. Вернем дальнюю от большого шприца границу капли в прежнее положение, чтобы выровнять давление в большом шприце, и отключим шприц объемом 1 мл от трубки. Капля при этом будет двигаться по трубке в сторону ее открытого конца, так как жидкость в шприце будет испаряться. Измерим зависимость координаты x капли от времени. После завершения измерения зависимости дадим капле растечься по стенкам шприца, подождем еще около минуты и запишем конечное положение капли $x_c = (56,3 \pm 0,1)$ см и ее длины $l = (14,0 \pm 0,1)$ см.

Определим давление насыщенного пара. Давление воздуха внутри системы равно атмосферному и складывается в каждой точке из давления сухого воздуха и давления паров жидкости. В конечном состоянии давление пара во всем объеме системы одинаково. Тогда запишем для этого случая равенство, связанное с постоянством количества сухого воздуха в системе:

$$p_0(V + (x_0 - l_0)s) = (p_0 - p_c)(V - (l_0 - l)s + (x_c - l)s).$$

Откуда для давления насыщенного пара при температуре $T_c = (23 \pm 1)^\circ\text{C}$ получаем:

$$p_c = p_0 \frac{(x_c - x_0)s}{V + (x_c - l_0)s} = (6,5 \pm 0,5) \text{ кПа}.$$

Погрешность установившегося давления рассчитаем, пренебрегая погрешностью слагаемого $(x_c - l_0)s$ по сравнению с объемом шприца V :

$$\Delta p_c = p_c(\varepsilon_{p_0} + \varepsilon_s + \varepsilon_{x_c - x_0}) = 0,5 \text{ кПа}.$$

Заметим, что такое пренебрежение порядками малости не вносит в ответ изменения сравнимого с погрешностью.

Найдем значения давления пара в шприце в промежуточные моменты времени. Пар в трубке можно с большой точностью считать насыщенным. Давление же пара в шприце p еще не вышло на насыщение. Запишем для промежуточного момента времени равенство, связанное с сохранением количества сухого воздуха в системе:

$$p_0(V + (x_0 - l_0)s) = (p_0 - p_c)(x - l)s + (p_0 - p)(V - (l_0 - l)s).$$

Откуда для давления в шприце в промежуточный момент времени получаем:

$$p = \frac{-p_c(x - l)s + p_0(x - x_0)s}{V - (l_0 - l)s}.$$

Рассчитаем давление для каждой координаты и внесем результаты в таблицу.

$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$p, \text{ кПа}$	$\ln \frac{p_c - p}{\text{кПа}}$	$\Delta \ln \frac{p_c - p}{\text{кПа}}$
30	33,0	1,6	1,59	0,02
40	34,0	2,0	1,51	0,02
50	34,8	2,3	1,44	0,02
60	35,5	2,5	1,38	0,02
70	36,3	2,8	1,31	0,03
80	37,0	3,1	1,24	0,03
90	37,5	3,2	1,18	0,03
100	38,1	3,5	1,11	0,03
110	38,6	3,6	1,05	0,03
120	39,0	3,8	1,00	0,03
140	39,8	4,1	0,89	0,04
160	40,5	4,3	0,78	0,04
180	41,0	4,5	0,69	0,04
200	41,5	4,7	0,59	0,05
220	42,0	4,9	0,49	0,05
240	42,4	5,0	0,40	0,05
270	42,6	5,1	0,35	0,06
300	43,0	5,2	0,24	0,06
330	43,4	5,4	0,12	0,07
360	43,6	5,4	0,05	0,07
390	43,8	5,5	-0,02	0,07
420	44,0	5,6	-0,10	0,08

В условии задачи описана модель испарения капли, в которой предполагается, что скорость испарения с поверхности капли постоянна, а скорость конденсации пропорциональна установившемуся над каплей давлению пара. Так как при давлении насыщенного пара концентрация молекул с течением времени над каплей неизменна, то в этот момент скорость испарения равна скорости конден-

сации. В соответствии с этой моделью для скоростей испарения и конденсации имеем:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{испарен}} &= \alpha p_c \\ \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{конденсац}} &= \alpha p', \end{aligned}$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Тогда скорость изменения количества молекул над каплей:

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{испарен}} - \left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{конденсац}} = \alpha(p_c - p).$$

Так как давление пара пропорционально концентрации молекул над жидкостью, то и скорость изменения давления пара над жидкостью пропорциональна скорости изменения количества молекул в газообразной фазе над жидкостью. Тогда для кинетики увеличения давления запишем:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(p_c - p)}{\tau},$$

где τ - некоторая константа, характеризующая скорость испарения.

Полученное дифференциальное уравнение достаточно распространено даже в школьной физике. Например, скорость изменения температуры в стакане с жидкостью, в которую помещен нагреватель постоянной мощности, описывается подобным законом (в случае теплопотерь, описывающихся законом Ньютона–Рихмана). По такому же закону устанавливается напряжение на конденсаторе, при подключении его к источнику постоянного напряжения. Для решения этого уравнения сделаем замену переменных $p' = p_c - p$. Тогда уравнение можно переписать в виде:

$$-\frac{dp'}{dt} = \frac{p'}{\tau}.$$

Разделим переменные и проинтегрируем выражение:

$$\ln \frac{p'}{p'_0} = -\frac{t}{\tau},$$

где $p'_0 = p_c$ - значение переменной p' в начальный момент времени. После обратной замены переменных:

$$\ln \frac{p_c - p}{p_c} = -\frac{t}{\tau}.$$

То есть измеренная ранее зависимость должна быть линейной в координатах $\ln(p_c - p)$ от t .

Пересчитаем ранее полученные значения и построим график в предложенных координатах.

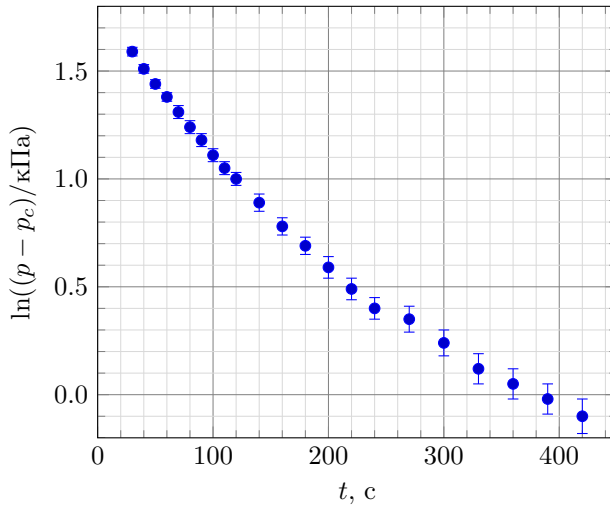


График зависимости разности давления насыщенного пара и давления пара в шприце от времени

Оценим погрешность экспериментальных точек. Для этого запишем расчетную формулу для разности давлений с учетом небольших пренебрежений в знаменателе точных формул.

$$p_c - p = \frac{p_0 s}{V} \left((x_c - x) + \frac{(x_c - x_0)(x - l)s}{V} \right)$$

Погрешность логарифма этой величины равна относительной погрешности самой величины. При этом погрешность множителя $\frac{p_0 s}{V}$ при проверке модели не следует учитывать, так как это значение одинаково для всех точек. Его изменение приведет лишь к смещению всего графика, а не к изменению относительного положения точек. Тогда для погрешности логарифма разницы давлений имеем:

$$\Delta \ln(p_c - p) = \frac{\Delta x_c + \Delta x + \frac{(x_c - x_0)(x - l)s}{V} (\varepsilon_{x_c - x_0} + \varepsilon_{x - l} + \varepsilon_s + \varepsilon_V)}{(x_c - x) + \frac{(x_c - x_0)(x - l)s}{V}}$$

Проведение расчета погрешностей для каждой экспериментальной точки занимает крайне много времени, поэтому достаточно оценить погрешность лишь

приблизительной трех точек графика на границах и в середине измеренного диапазона.

Видно, что точки не описываются прямой линией. Угловой коэффициент графика при малых временах больше, чем в конце. Можно сделать вывод, что предложенная модель не выполняется.

Также экспериментальные точки можно обработать и другим способом. Построим график зависимости давления от времени и проведем к графику касательные в нескольких точках.

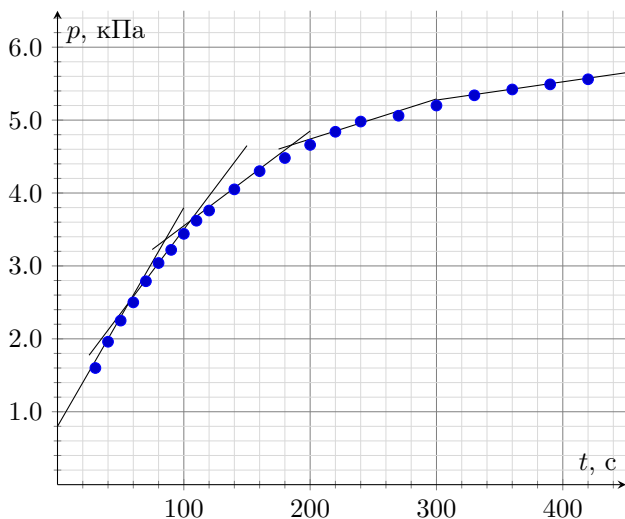


График зависимости давления пара от времени

Рассчитаем угловые коэффициенты касательных. И построим график зависимости производной давления по времени от величины давления.

p , кПа	$\frac{dp}{dt}$, Па/с
2.4	30
3.5	23
4.2	13
4.85	5.5
5.4	2.5

Видно, что построенный график можно описать линейной функцией, что согласуется с предложенной в условии моделью. Однако, экстраполяция графика

График зависимости скорости изменения давления от давления

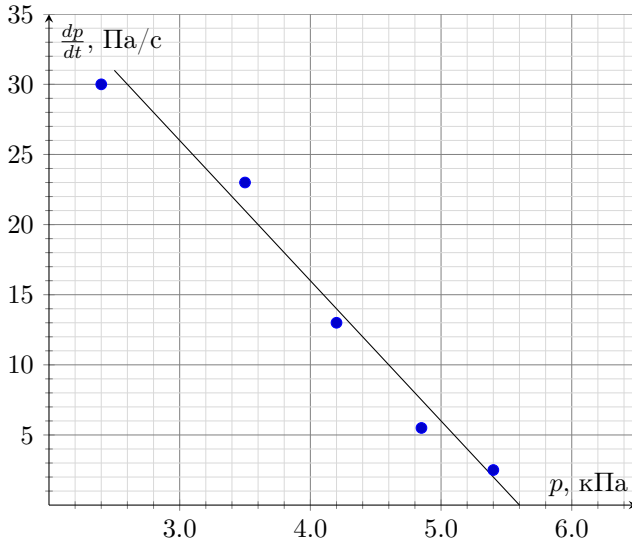


График зависимости скорости изменения давления от давления

показывает, что скорость изменения давления должна оказаться нулевой при давлении в 5.6 кПа, что меньше измеренного давления насыщенного пара. То есть по сути процесс испарения остановиться при давлении, соответствующем меньшей температуре поверхности жидкости.

Положим шприц с насыщенными парами жидкости в руку и вновь засечем время (не будем при этом отключать его от трубки после предыдущего опыта). Капля начнет движение в сторону от шприца. Такое поведение системы обуславливается двумя факторами. Расширением сухого воздуха в шприце за счет изменения его давления и увеличением давления пара жидкости в шприце. Подождем 5 минут и сделаем отметку на трубке. Запишем координату этой отметки $x_h = (78,5 \pm 0,1)$ см. Для записи связи этой координаты с давлением насыщенного пара в системе, будем предполагать, что воздух в шприце находится при температуре T_h , а воздух в трубке при температуре T_c .

$$\frac{p_0(V + (x_0 - l_0)s)}{T_c} = \frac{(p_0 - p_c)(x_h - l)s}{T_c} + \frac{(p_0 - p_h)(V - (l_0 - l)s)}{T_h}$$

Тогда для давления насыщенного пара жидкости при температуре T_h получаем:

$$p_h = p_0 - \frac{T_h p_0 (V + (x_0 - l_0)s) - (p_0 - p_c)(x_h - l)s}{T_c}.$$

Преобразуем формулу к более удобному виду. В первую очередь пренебрежем объемом капли $(l_0 - l)s \approx 0.1$ мл по сравнению с объемом V .

$$p_h = -p_0 \frac{l_d s}{V} + p_0 \frac{T_h (x_h - x_0 + l_0 - l)s}{T_c V} - p_c \frac{T_h (x_h - l)s}{T_c V}.$$

Каждое из слагаемых в сумме связано с определенным процессом, происходящим при нагревании. Так, первое слагаемое, связано с нагреванием сухого воздуха в шприце:

$$p_1 = -p_0 \frac{l_d s}{V} = -(3,1 \pm 0,3) \text{ кПа.}$$

Погрешность этого слагаемого оценим как:

$$\Delta p_1 = |p_1|(\varepsilon_{p_0} + \varepsilon_{l_d} + \varepsilon_s + \varepsilon_V) = 0,3 \text{ кПа.}$$

Второе слагаемое связано с заполнением воздухом трубки:

$$p_2 = p_0 \frac{T_h (x_h - x_0 + l_0 - l)s}{T_c V} = (14,7 \pm 1,3) \text{ кПа.}$$

Погрешность этого слагаемого оценим как:

$$\Delta p_2 = p_2(\varepsilon_{p_0} + \varepsilon_{T_c} + \varepsilon_{T_h} + \varepsilon_{x_h - x_0 + l_0 - l} + \varepsilon_s + \varepsilon_V) = 1,3 \text{ кПа.}$$

Последнее слагаемое связано с тем, что трубка заполняется не сухим, а влажным воздухом.

$$p_3 = -p_c \frac{T_h (x_h - l)s}{T_c V} = -(1,2 \pm 0,2) \text{ кПа.}$$

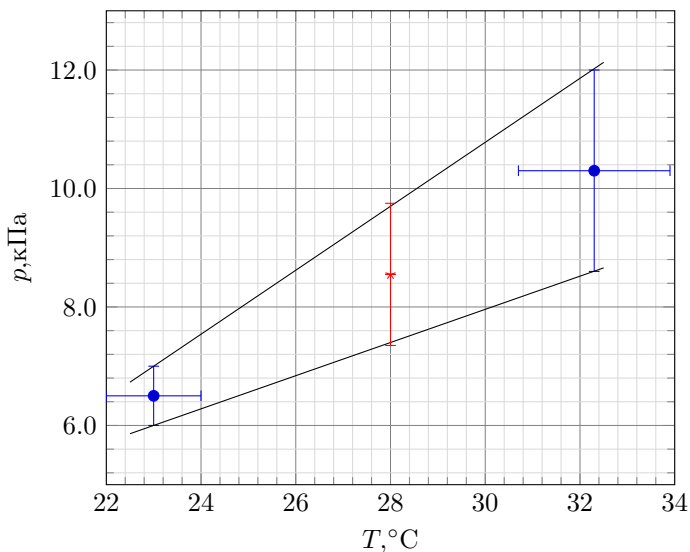
Погрешность этого слагаемого оценим как:

$$\Delta p_3 = p_3(\varepsilon_{p_c} + \varepsilon_{T_c} + \varepsilon_{T_h} + \varepsilon_{x_h - l} + \varepsilon_s + \varepsilon_V) = 0,2 \text{ кПа.}$$

Тогда давление p_h составит:

$$p_h = p_1 + p_2 + p_3 = (10,3 \pm 1,7) \text{ кПа.}$$

Для расчета давления паров жидкости при температуре 28°C воспользуемся графическим методом. Поставим на координатной бумаге точки, соответствующие измеренным величинам $(T_c; p_c)$ и $(T_h; p_h)$. Проведем линии, через измеренные точки, по которым можно оценить значения давления при промежуточных температурах. Окончательно получим:



$$p_{28} = (8,7 \pm 1,2) \text{ кПа}$$

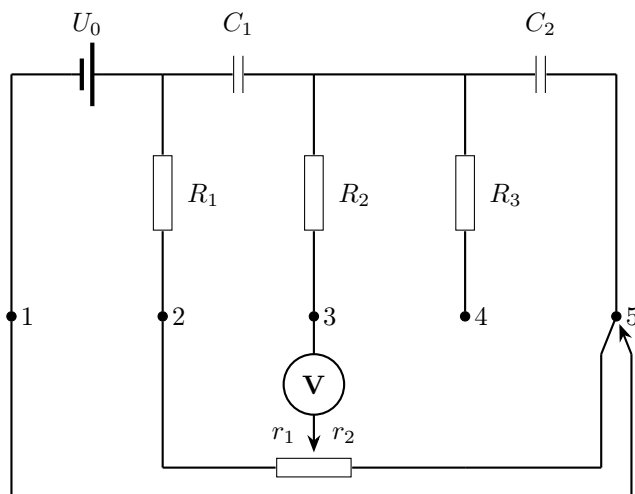
Задача №10-Е2. Необычные мосты

1. Подключим мультиметр в режиме омметра (омметра) к выводам 3 – 4 и измерим суммарное сопротивление резисторов R_2 и R_3 . $R_{34} = (53,2 \pm 0,5) \text{ кОм} = R_2 + R_3$. Это значение не противоречит контрольным параметрам чипа.

2. Подключим мультиметр в режиме вольтметра (вольтметр) к выводам 1–2. $U_{12} = (3,28 \pm 0,03) \text{ В}$. Если внутреннее сопротивление вольтметра сильно больше сопротивления резистора R_1 , то полученное значение является напряжением на источнике. Для проверки соединим выводы 2 и 3 источника друг с другом и подключим вольтметр к выводам 1 и 4. Теперь вольтметр подключен к источнику через три последовательно соединенных резистора. $U_{14} = (3,12 \pm 0,03) \text{ В}$. Разница в показаниях составляет примерно 5%, значит сопротивление вольтметра достаточно велико по сравнению с $R_1 + R_2 + R_3$, а если R_1 соответствует контрольным параметрам, то отклонение показаний вольтметра от напряжения источника составляет около 1%, так как R_1 примерно в 10 раз меньше, чем $R_1 + R_2 + R_3$. С учетом внутреннего сопротивления источника получим $U_{12} = U_0 = (3,28 \pm 0,06) \text{ В}$, что укладывается в допустимые параметры.

3. Для измерения R_1 подсоединим мультиметр в режиме амперметра (амперметр) к выводам 1 – 2. $I_{12} = (688 \pm 7) \text{ мкА}$. Если считать амперметр идеальным,

то из Закона Ома получим $R_1 = U_0/I_{12} = 4,77$ кОм. Для проверки предположения об идеальности амперметра подключим параллельно ему крайние выводы потенциометра. Показания амперметра станут равны $I'_{12} = (673 \pm 7)$ мкА. Изменение тока составило примерно 2%, значит и сопротивление амперметра составляет порядка 2% от полного сопротивления потенциометра, равного 5 кОм. Оценочно сопротивление амперметра $R_A \approx 100$ Ом, что составляет около 1% от измеряемых сопротивлений. Можем считать амперметр идеальным. Оценим погрешность $\Delta R_1 = R_1(\Delta U_0/U_0 + \Delta I_{12}/I_{12}) = 0,14$ кОм. Окончательно получаем $R_1 = (4,77 \pm 0,14)$ кОм и этот параметр тоже укладывается в границы контрольных значений.



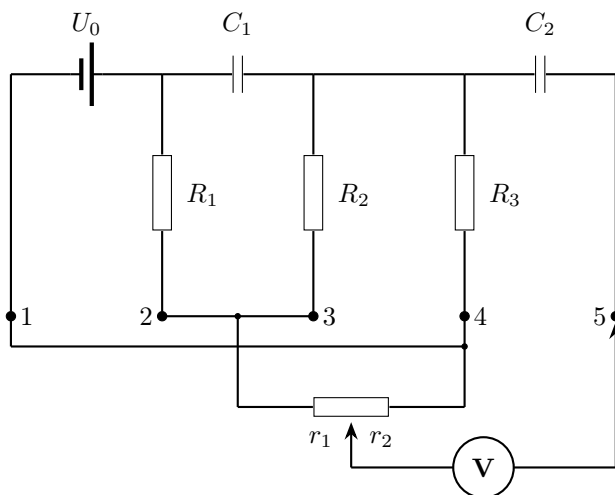
4. Для определения отношения емкостей соберем мостовую схему. Пусть первоначально конденсаторы разряжены. Разрядить их можно замкнув выводы 2–3 и 4–5. Проверить, что они разрядились можно с помощью вольтметра, подключив его к выводам 2–3 и 4–5. При соединении выводов 1–5 в цепи начинает течь ток и при определенном положении движка потенциометра вольтметр будет стабильно показывать нулевое напряжение, это означает, что током через него можно пренебречь, тогда заряды на конденсаторах будут равными и отношение их емкостей будет обратно пропорционально отношению напряжений на них $C_2/C_1 = U_{C_1}/U_{C_2}$. Также напряжение на первом конденсаторе будет равно напряжению на резисторах R_1 и r_1 , а на втором – напряжению на r_2 . А учитывая равенство тока через все три резистора получим $C_2/C_1 = (R_1 + r_1)/r_2$. Три раза подберем такое положение потенциометра, не забывая каждый раз разряжать конденсаторы и рассчитаем отношение емкостей. Величины r_1 и r_2 будем

измерять омметром предварительно отсоединив потенциометр от сети.

№	r_1 , кОм	r_2 , кОм	C_2/C_1
1	$2,72 \pm 0,03$	$2,28 \pm 0,03$	3,29
2	$2,74 \pm 0,03$	$2,27 \pm 0,03$	3,31
3	$2,81 \pm 0,03$	$2,34 \pm 0,03$	3,24

5. Найдем отношение сопротивлений резисторов R_2 и R_3 , для этого также соберем мостовую схему. Алгоритм действий следующий:

- при отключенном источнике замкнем выводы 4 – 5, чтобы конденсатор C_2 разрядился;
- подключим источник (соединим выводы 1 – 4);
- подключим вольтметр к выводу 5.



Если движок потенциометра установлен так, что $R_2/R_3 = r_1/r_2$, то показания вольтметра останутся нулевыми при подключении его к 5 выводу. Подберем такое положение потенциометра, затем с помощью омметра измерим r_1 и r_2 предварительно отсоединив потенциометр от цепи. Для повышения точности выполним эксперимент три раза.

№	r_1 , кОм	r_2 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм
1	$3,23 \pm 0,03$	$1,76 \pm 0,03$	34,37	18,73
2	$3,21 \pm 0,03$	$1,78 \pm 0,03$	34,15	18,94
3	$3,27 \pm 0,03$	$1,74 \pm 0,03$	34,79	18,51

Резисторы R_2 и R_3 не соответствуют контрольным значениям.

Задача №11-Е1. Звук в сосуде

В таблице представлены резонансные частоты спектра в открытой трубе для соответствующего номера гармоники n . Рассчитан шаг между соседними пиками, его среднее значение, среднеквадратичное отклонение и относительная погрешность.

n	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f , Гц	$\Delta f_{\text{открыт}}$, Гц
1	336	338	333	336	—
2	673	672	675	673	338
3	1016	1013	1006	1012	338
4	1348	1339	1348	1345	333
5	1695	1699	1698	1697	352
6	2037	2017	2027	2027	330
Среднее					338
Δ					6
ε_f					2 %

Скорость звука для открытой трубки 50 см найдем, используя средний шаг резонансных частот:

$$L = n \frac{\lambda}{2} = \frac{n \cdot c}{2f} \Rightarrow c = 2L \cdot \frac{f}{n} = 2L \cdot \Delta f.$$

$$c_{\text{открыт}} = (338 \pm 10) \text{ м/с},$$

где погрешность $\varepsilon_c = \varepsilon_L + \varepsilon_{\Delta f} = 3 \%$.

n	f_1 , Гц	f_2 , Гц	f_3 , Гц	f , Гц	$\Delta f_{\text{закрыт}}$, Гц
2	506	506	511	508	—
3	840	845	851	845	338
4	1205	1179	1190	1191	346
5	1545	1550	1540	1545	354
6	1873	1879	1884	1879	334
7	2207	2218	2218	2214	336
Среднее					341
Δ					6
ε_f					2 %

Используя те же рассуждения, найдем скорость звука и для закрытой трубки:

$$c_{\text{закрыт}} = (341 \pm 10) \text{ м/с.}$$

Добавляя в цилиндр воду, будем исследовать зависимость основной ($n = 1$) резонансной частоты f от объёма воды V в сосуде.

$$L = n \frac{c}{4f} = \frac{c}{4f}, \quad L = L_0 - \frac{V}{S},$$

где L_0 — высота мерного цилиндра, S — площадь внутреннего поперечного сечения.

$$\frac{1}{f}(V) = \frac{4L_0}{c} - \frac{4}{cS} \cdot V.$$

Результаты измерений и пересчетов представлены в таблице:

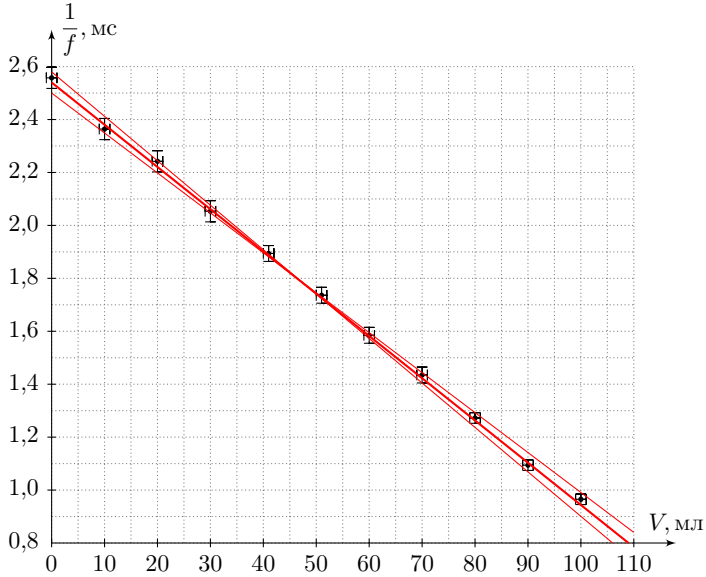
V , мл	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
f , Гц	391	423	446	487	528	576	630	697	786	914	1036
$1/f$, мс	2,56	2,37	2,24	2,05	1,89	1,74	1,59	1,44	1,27	1,09	0,96

Построим график зависимости $\frac{1}{f}(V)$ и по нему определим высоту L_0 и внутренний диаметр D цилиндра. Погрешность определения объёма воды примем равной цене деления прибора $\Delta V = 1$ мл, относительная погрешность частоты оказалась равна $\varepsilon_f = 2\%$.

Коэффициент наклона $k = (-16,0 \pm 0,8) \text{ с/м}^3$. Относительная погрешность — $\varepsilon_k = 5\%$, для скорости звука из предыдущего эксперимента $\varepsilon_c = 3\%$.

$$k = \frac{4}{cS}, \quad S = \frac{\pi d^2}{4} \quad \Rightarrow \quad d = \sqrt{\frac{16}{\pi ck}}; \quad \varepsilon_d = \frac{1}{2}(\varepsilon_k + \varepsilon_c) = 4\%.$$

$$d = (31 \pm 1) \text{ мм.}$$



Для данной прямой $b = (2,55 \pm 0,05)$ мс, значит $\varepsilon_b = 2\%$.

$$b = \frac{4L_0}{c} \Rightarrow L_0 = \frac{bc}{4}; \quad \varepsilon_{L_0} = \varepsilon_b + \varepsilon_c = 5\%.$$

$$L_0 = (21,7 \pm 1,1) \text{ см.}$$

Под $L_{\text{эфф}}$ понимаем длину трубы, соответствующую основной резонансной частоте как

$$L_{\text{эфф}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}.$$

Действительную же высоту цилиндра 50 мл определим, долив до краев известный объем воды из меньшего цилиндра. Зная внутренний диаметр, найдем реальную высоту цилиндра:

$$h \cdot \frac{\pi D^2}{4} = V_0 + \Delta V,$$

где $V_0 = 50$ мл, $\Delta V = 30$ мл. Поскольку в определении объема мы могли опиться дважды на 1 мл, значит относительная погрешность $\varepsilon_h = \varepsilon_V = \frac{2}{80} = 2,5\% \approx 3\%$. Получается $h_0 = (17,1 \pm 0,5)$ см.

Теперь, добавляя некоторый объем воды в цилиндр, мы можем вычислить реальную высоту воздушного столба, в котором возбуждаются звуковые колеба-

ния:

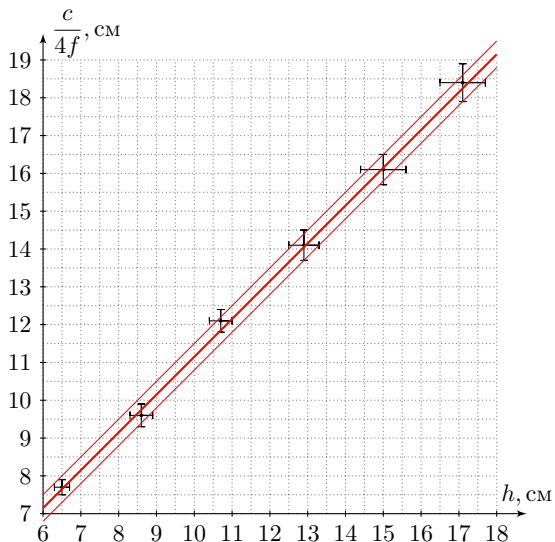
$$h = h_0 - \frac{4V}{\pi D^2}.$$

Запишем связь частоты f и высоты h :

$$\frac{c}{4f} = h + \beta D.$$

Проведем измерения основных резонансных частот f для различных высот h и построим график зависимости $\frac{c}{4f}(h)$. Для расчетов будем применять значение скорости звука в воздухе из полученных ранее результатов ($c = 341$ м/с). Относительная погрешность величины $\frac{c}{4f}(h)$ можно считать равной относительной погрешности $c \varepsilon_{\frac{c}{4f}} = \varepsilon_c = 3\%$.

V , мл	f , Гц	h , см	$c/(4f)$, см
0	463	17,1	18,4
10	530	15,0	16,1
20	605	12,9	14,1
30	706	10,7	12,1
40	885	8,6	9,6
50	1105	6,5	7,7



Учитывая, что теоретически мы ожидаем коэффициент наклона $k = 1$, то погрешность определения b составит по графику $\Delta b = 0,25$ см

Величину β определим по коэффициенту b данной линейной функции:

$$\beta = \frac{b}{D} = \frac{(1,20 \pm 0,25) \text{ см}}{2,45 \text{ см}} = 0,5 \pm 0,1.$$

Задача №11-Е2. Солнечные батареи

С помощью мультиметра в режиме омметра измеряем сопротивление потенциометра, **отключенного от СБ**. Затем подключаем потенциометр к СБ и измеряем мультиметром в режиме вольтметра напряжение на нем, включив на короткое время фонарик. Приборная погрешность прямых измерений сопротивления и напряжения мала. По формуле

$$P = \frac{U^2}{R}$$

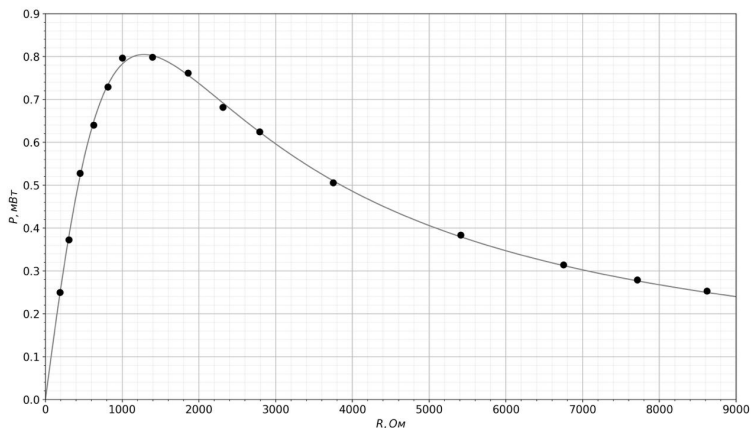
находим мощность, отдаваемую солнечной батареей при данном сопротивлении потенциометра. Этот опыт продельваем для разных сопротивлений потенциометра и заносим данные в таблицу.

R , Ом	U , В	P , мВт	R , Ом	U , В	P , мВт
188	0,217	0,250	2310	1,255	0,682
306	0,338	0,373	2790	1,320	0,625
449	0,487	0,528	3750	1,378	0,506
628	0,634	0,640	5410	1,441	0,384
813	0,77	0,729	6750	1,457	0,314
1003	0,894	0,797	7710	1,476	0,279
1393	1,055	0,799	8620	1,476	0,253
1858	1,190	0,762			

По полученным данным строим график. Из построенного графика определяем максимальную мощность. На графике отчетливо виден максимум, причем линия идет достаточно плавно. Погрешность определения максимальной мощности определяется расположением вершины графика и составляет около 2%.

Отдельно измерим напряжение холостого хода: $U_{xx} = 1,482$ В. В дальнейшем это нам будет необходимо для определения температуры СБ.

Погрешность измерения U_{xx} определяется стабильностью температуры. Ее можно оценить, если измерить величину дважды: в начале серии измерений и в конце. Разность показаний составляет порядка 20 мВ, что по известному угловому коэффициенту зависимости $U_{xx}(t)$ соответствует ~ 2 °С разброса по температуре.



Подключаем элемент Пельтье к выключенному источнику с выкрученным на минимум регулятором напряжения. Далее включаем источник и устанавливаем напряжение около 4 В. Наблюдения за показаниями подтверждают, что изменения напряжения на СБ при отключенном потенциометре происходят достаточно медленно. Выжидаем 20 минут и приступаем к измерениям. Порядок действий аналогичен предыдущему пункту. Полученные данные заносим в таблицу.

Увеличиваем напряжение источника питания примерно на 0,5 В и повторяем опыт. Данные снова заносим в таблицу.

Затем повторяем опыт еще раз для напряжения вблизи 5 В.

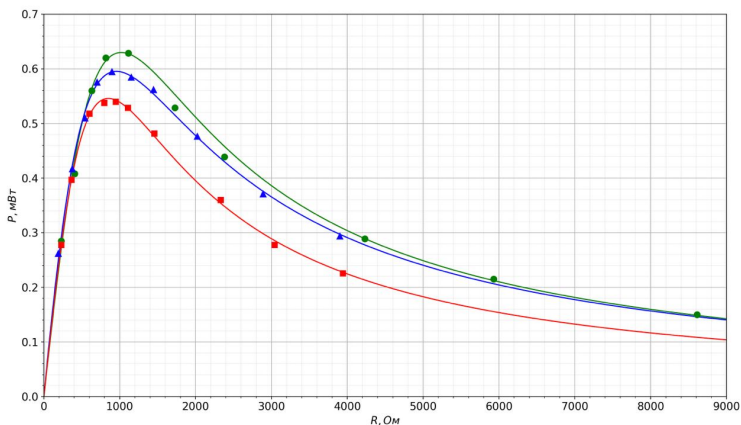
Также определяем все три раза напряжение холостого хода (ниже приведены средние значения величин).

R , Ом	U , В	P , мВт	R , Ом	U , В	P , мВт
228	0,255	0,285	1727	0,956	0,529
406	0,407	0,408	2380	1,022	0,439
630	0,594	0,560	4230	1,105	0,289
815	0,711	0,620	5930	1,130	0,215
1113	0,837	0,629	8610	1,137	0,150

R , Ом	U , В	P , мВт	R , Ом	U , В	P , мВт
190	0,223	0,262	1150	0,82	0,585
374	0,395	0,417	1444	0,901	0,562
540	0,525	0,510	2020	0,982	0,477
702	0,636	0,576	2890	1,035	0,371
896	0,73	0,595	3900	1,07	0,294

R , Ом	U , В	P , мВт	R , Ом	U , В	P , мВт
230	0,253	0,278	1107	0,765	0,529
364	0,380	0,397	1457	0,838	0,482
597	0,556	0,518	2330	0,916	0,360
793	0,653	0,538	3040	0,920	0,278
947	0,715	0,540	3940	0,944	0,226

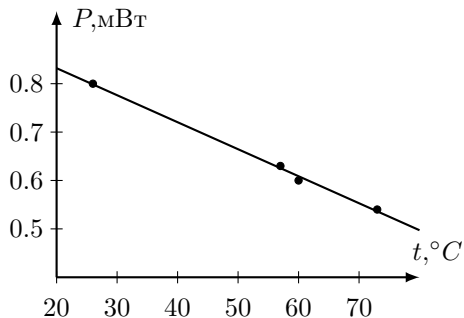
Несмотря на то, что в условии сказано, что графики строить не обязательно, учитывая удобство графического способа нахождения экстремума, построим графики зависимости мощности, отдаваемой СБ, от сопротивления потенциометра.



Из графиков видно, что в пределах точности измерений величина сопротивления потенциометра, соответствующая максимуму мощности, практически не изменяется.

По найденным значениям максимальных мощностей, соответствующих им напряжениям и известным значениям комнатной температуры и углового коэффициента в зависимости $U_{xx}(t)$ для трех значений напряжения питания рассчитываем значения температур. Записываем результаты расчетов в таблицу зависимости $P_{\max}(t)$, по которой далее строим график.

t , °C	P_{\max} , мВт	U_{\max} , В
26	0,80	1,482
57	0,63	1,198
60	0,60	1,164
73	0,54	1,047



Из построенного в пункте 2 итогового графика находим угловой коэффициент

$$k = \frac{\Delta P_{\max}}{\Delta t} = -5,5 \text{ мкВт}/^\circ\text{C}.$$

Погрешность определения углового коэффициента около 5%.

Используя рассчитанный в пункте 3 угловой коэффициент k , определяем значения мощности СБ для всех температур, приведенных в таблице условия (дополняем таблицу двумя столбцами).

Обозначим месячную инсоляцию буквой I , тогда выработка энергии за месяц пропорциональна произведению $I \cdot P_{\max}$. Выработываемая энергия за период в полгода вычисляется как сумма месячных выработок и прямо пропорциональна величине:

$$S = \sum_{i=3}^8 I_i P_{\max}^i,$$

где i – номер месяца. Поскольку СБ, размещенные в Чите и в Сочи, были выбраны одинаковыми, отношение выработанных энергий равно отношению сумм S :

$$\frac{S_{\text{Сочи}}}{S_{\text{Чита}}} = \frac{856,3}{832,6} = 1,03.$$

Абсолютная погрешность рассчитанного отношения составляет порядка 10%. Отношение суммарных инсоляций составляет при этом:

$$\frac{I_{\text{Сочи}}}{I_{\text{Чита}}} = \frac{1044,0}{961,5} = 1,086.$$

Вывод можно сделать следующий: в пределах погрешности измерений данные отношения одинаковы.

Заключительный этап Всероссийской олимпиады по физике 10 апреля 2023 г.

Сочи

Месяц	$t, ^\circ\text{C}$	$I,$ кВт·час/м ²	$P_{\text{max}},$ мВт	$I \cdot P_{\text{max}},$ Вт ² · час/м ²
Март	11,0	123,6	0,883	109,1
Апрель	14,9	138,6	0,861	119,4
Май	20,2	176,7	0,832	147,0
Июнь	25,0	203,7	0,806	164,1
Июль	27,8	212,7	0,790	168,0
Август	28,8	188,7	0,788	148,7

Чита

Месяц	$t, ^\circ\text{C}$	$I,$ кВт·час/м ²	$P_{\text{max}},$ мВт	$I \cdot P_{\text{max}},$ Вт ² · час/м ²
Март	-1	158,4	0,949	150,3
Апрель	5,5	165,6	0,913	151,2
Май	14,6	173,7	0,863	149,9
Июнь	21,1	169,2	0,827	139,9
Июль	24,3	153,9	0,809	124,6
Август	20,7	140,7	0,829	116,7