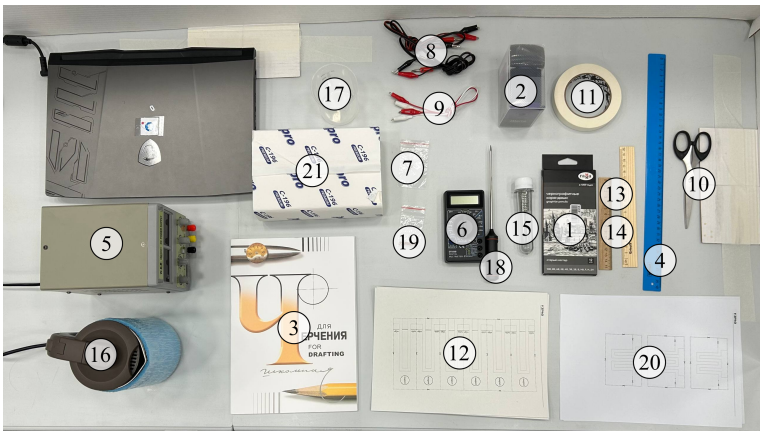
Графическое сопротивление

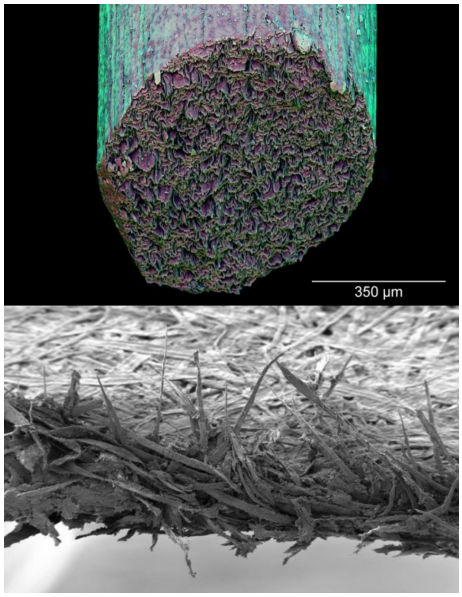
Оборудование:

1. Набор карандашей разной мягкости **3B 4B 5B 6B 8B** (5 шт.)
2. Точилка
3. Папка бумаги для черчения
4. Пластиковая линейка $40\ \text{cm}$
5. Источник постоянного напряжения
6. Мультиметр (только режим вольтметра)
7. Резистор $100\ \text{к}\Omega$
8. Провода банан-крокодил (2 пары)
9. Провода крокодил-крокодил (2 шт.)
10. Ножницы
11. Малярный скотч
12. Распечатка на картоне (3 шт.)
13. Линейка $15\ \text{cm}$
14. Линейка $20\ \text{cm}$
15. Набор магнитов (12 шт. из которых 4 — запасные)
16. Чайник с водой
17. Мерный стакан
18. Термометр
19. Медный гвоздик (4 шт.)
20. Распечатка на бумаге (3 шт.)
21. Салфетки для поддержания чистоты на рабочем месте



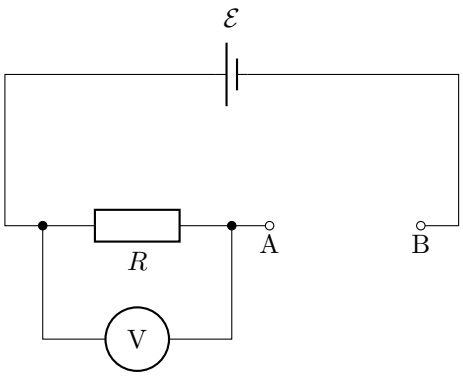
Графит — кристаллическая форма углерода C — проводит электрический ток. Поэтому, проведенная карандашом линия обладает измеримым электрическим сопротивлением. В данной задаче будут изучаться электрические свойства таких линий. Графитовая линия на бумаге — не сплошной слой графита, а множество графитовых частиц, которые прилипают к бумаге и друг к другу под действием Ван-дер-Ваальсовых сил и при достаточно большом количестве этих частиц она начинает проводить электрический ток. Ниже приведены фото грифеля механического карандаша и бумаги под микроскопом в одном масштабе. Характерные размеры неровностей на грифеле и бумаге примерно одинаковые, в результате чего графит при проведении по бумаге начинает крошиться и оставляет микрочастицы.

Т. к. толщина линии крайне мала, получаемые сопротивления в большинстве случаев будут велики. Если количество частиц графита мало то, промежутки между частицами слишком большие и линия не будет



Грифель механического карандаша и бумага под микроскопом

проводить. Поэтому во всех пунктах задачи будет требоваться прочерчивать линию карандашом многократно, т. е. проводить карандашом по одной и той же линии несколько раз. Будем называть линию, прочерченную карандашом n раз, линией интенсивности n. Например, если вы провели линию по линейке, а затем ровно по ней же провели еще раз, то это линия интенсивности 2. Т. к. сопротивления получаемых линий достаточно большие, для измерения сопротивления линии предлагается использовать следующую схему:



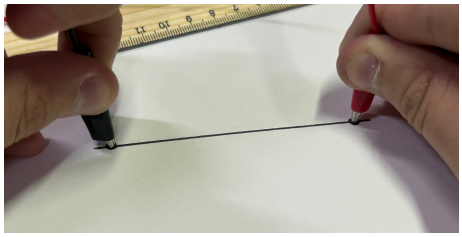
Здесь контакты A и B нужно прикладывать к начерченной линии, $\mathcal{E}$ — источник постоянного напряжения. Внутреннее сопротивление вольтметра $R_V = 1.00\ \text{M}\Omega$. **ВАЖНО!** Между крокодилом и линией может возникать значительное контактное сопротивление. Также Ваши руки при касании крокодила обладают сравнимым с линией сопротивлением. Чтобы исключить влияние этих факторов, необходимо:

- Прижимать крокодилы как можно плотнее
- НЕ касаться оголенных частей крокодила (держать их только за резиновую изоляцию)

Если показания мультиметра меняются в процессе одного измерения, необходимо проверить каждый из указанных выше пунктов еще раз. ВНИМАНИЕ! ЧАСТИ ЗАДАЧИ ЯВЛЯЮТСЯ НЕЗАВИСИМЫМИ! ПРОЧИТАЙТЕ УСЛОВИЕ ДО КОНЦА! Эксперимент, проводимый в части D, занимает много времени. В процессе его проведения Вы можете заниматься обработкой данных других частей.

Часть A. Зависимость сопротивления от параметров (5 баллов)

Важно! В этой и всех последующих частях старайтесь давить на карандаш одинаково, иначе вы можете существенно исказить результаты эксперимента!



A1 Заточите карандаш **4B**. Этим карандашом на бумаге для черчения начертите линию длины $25\ \text{cm}$ и интенсивности $n = 10$. Сдуйте оставшуюся после черчения крошку! Нарисуйте на одном конце линии небольшой круг с большой интенсивностью, который будет использоваться в качестве контакта для крокодила. Выставьте напряжение U_0 на источнике. Измерьте зависимость показаний вольтметра U (напряжения на резисторе) от длины l участка линии, подключенного в цепь. Снимите 23 точки в диапазоне $l \in [3; 25]\ \text{cm}$. Заполните таблицу по образцу. **Не забудьте заполнить строку Units – в ней должны быть написаны единицы измерения!** Единицы измерения могут быть написаны на русском языке. **1.4**

A2 Для каждого значения U рассчитайте значение сопротивления R линии. **0.3**

A3 Постройте график полученной зависимости $R(l)$. Загрузите скриншот графика. **0.4**

A4 Заточите карандаш **4B**. Нарисуйте линию длиной $10\ \text{cm}$ и интенсивности $n = 5$. На краях нарисуйте маленькие круги с большой интенсивностью для контактов. Сдуйте оставшуюся после черчения крошку! **Примечание.** Интенсивность слоя графита на круге всегда должна превышать интенсивность измеряемой линии. Снимите зависимость показаний вольтметра U (напряжения на резисторе) от интенсивности линии n. Сделайте не менее 15 точек в диапазоне $n \in [5; 200]$. **1.6**

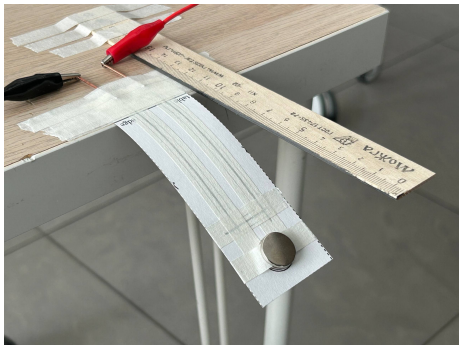
A5 Для каждого значения U рассчитайте значение сопротивления R линии. **0.3**

Как видно по графикам, начиная с некоторой интенсивности n_s сопротивление линии практически не меняется.

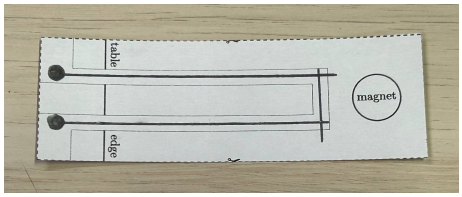
A7 Определите n_s для полученной зависимости. **0.3**

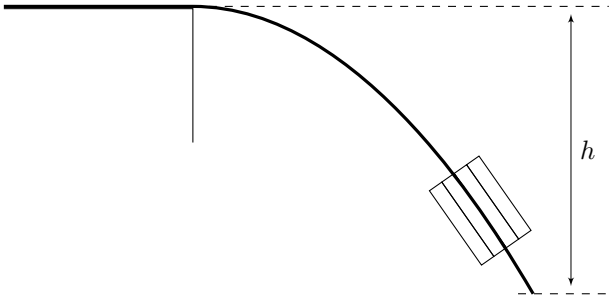
Часть B. Зависимость от деформации (10 баллов)

Мягкость G карандаша — физическая характеристика, отвечающая за количество и размер частиц графита, которые остаются на бумаге при проведении линии. Будем считать, что мягкость G карандаша численно равна цифре перед его маркировкой и измеряется в единицах B. Пример: $G = 2\text{B}$. В этой части изучается сопротивление линии при деформации. Т. к. линия — не сплошной проводник, а множество близко расположенных частиц, то при деформации листа, расстояния между частицами будут изменяться, а значит будет меняться и сопротивление. Для изучения будем использовать следующую установку:



Для этого:





1. Аккуратно вырежьте распечатку **на картоне**.
2. Внутри буквы П на распечатке начертите линию интенсивности $n = 10$, также в форме буквы П. На концах линии нарисуйте кружки для прикладывания контактов, их интенсивность должна быть существенно больше, чем интенсивность линии (см. фото выше). Сдуйте оставшуюся после черчения крошку!
3. Заклейте линию малярным скотчем, оставив только яркие кружочки для подключения контактов. **Внимание! Шаг 3 крайне важен. Если его не выполнить, сопротивление линии будет существенно изменяться даже при отсутствии изгиба.**
4. Совместите край стола и линию подписанную **table edge**.
5. Закрепите медные гвоздики на распечатке при помощи малярного скотча, как показано на фото. Дополнительно приклейте распечатку к столу.

   Внимание! При надавливании рукой на гвоздики показания вольтметра не должны изменяться более чем на 1%.
6. Рядом с картоном закрепите линейку.
7. Подключите крокодилы к гвоздикам как показано на фото, и выставьте на источнике такое напряжение, чтобы вольтметр показывал напряжение $U \approx 195\,\mathrm{mV}$ (в режиме $200\,\mathrm{mV}$).
8. Проведите измерения с ненагруженным картоном.
9. Закрепите первый магнит при помощи малярного скотча. Магнит должен быть закреплен внутри окружности с подписью **magnet**.
10. Проведите следующие измерения.
11. Второй магнит примагнитьте снизу распечатки, и снова проведите измерения.
12. При дальнейших измерениях чередуйте крепление магнитов сверху и снизу.

Примечание. Будьте осторожны с магнитами, они очень хрупкие! **Новые магниты выдаваться не будут!**

B1.1 Для карандаша **3B** снимите зависимость показаний вольтметра U (напряжения на резисторе) от высоты прогиба h (см. рисунок). Снимите 9 точек, изменяя количество магнитов $N \in [0; 8]$. **1.1**

Измеренные величины относится исключительно к данной установке, поэтому перейдем к величинам, которые описывают непосредственную физику процесса. Во-первых, вместо сопротивления будем использовать относительное изменение сопротивления:

$$\varepsilon_R(h) = \frac{R(h) - R(0)}{R(0)}.$$

Во-вторых, относительное изменение сопротивления линии зависит только от того насколько согнут лист бумаги в каждой точке, а не от конкретной установки. Поэтому перейдем от высоты прогиба к относительному удлинению верхней поверхности картона

$$s = \frac{3h\delta(x_\text{m} - x_\text{c})}{2x_\text{m}^3},$$

где h — высота прогиба, $\delta = 0.3\ \text{mm}$ — толщина картона, $x_\text{m} = 8.5\ \text{cm}$ — расстояние от центра магнита до края стола, $x_\text{c} = 3.5\ \text{cm}$ — расстояние от центра изгибаемой части линии до края стола.

B2.1 Из зависимости R от h, полученной для карандаша **3B**,рассчитайте относительное изменение сопротивления ε_R и относительное удлинение s. **0.2**

B3 Считая зависимость $\varepsilon_R(s)$ линейной: **3.0**

$$\varepsilon_R = k \cdot s + b,$$

определите коэффициенты k и b для каждой мягкости G карандаша.

B4 Постройте график зависимости коэффициента k от мягкости G карандаша. Загрузите скриншот графика. **0.5**

Часть C. Зависимость от температуры (5 баллов)

Внимание! Чтобы вскипятить воду, выключите зарядное устройство ноутбука из розетки, находящейся рядом с Вашим столом, и включите на его место чайник. Не забудьте включить зарядное устройство обратно после того, как Вы вскипятили воду. Последняя часть задачи будет посвящена изучению зависимости сопротивления графитовой линии от температуры. Для этого соберем следующую установку:

Для этого:

1. Аккуратно вырежьте распечатку **на бумаге**.
2. Аккуратно заштрихуйте зигзагообразную область 3 раза. Каждую следующую штриховку делайте перпендикулярно предыдущей. Не оставляйте зазоров между соседними штрихами. Сдуйте оставшуюся после штриховки крошку!
3. Используя медные гвозди, закрепите крокодилы на распечатке, как показано на фото.

   Внимание! Ваше крепление должно обеспечивать хороший электрический контакт: показания мультиметра не должны изменяться, если попытаться сильнее зажать гвоздь крокодилом.
4. При помощи малярного скотча закрепите получившуюся конструкцию на мерном стакане.

   Внимание! При нагревании скотч частично теряет свои клейкие свойства, поэтому Вам нужно закрепить распечатку на стакане как можно более надежно.
5. Залейте в стакан кипяток.

   Примечание. Сразу после заливания кипятка, сопротивление линии значительно уменьшится. Это связано с необратимыми изменениями в ее структуре при быстром нагревании.

6. Спустя некоторое время, линия нагреется и температура придет в равновесие с температурой стакана, после чего линия начнет медленно остывать вместе с водой.

Примечание. Считайте, что после установления теплового равновесия между линией и водой их температуры одинаковы в любой последующий момент времени. **Внимание! Визуально проверяйте, что бумага плотно прилегает к стакану, и скотч не отклеился от него. Не трогайте бумагу в процессе измерений, т. к. это может существенно исказить результаты эксперимента.**

C1	Для карандаша **4B** снимите зависимость показаний вольтметра U (напряжения на резисторе) от температуры T линии в процессе остывания. Снимите не менее 15 точек в диапазоне температур $T \in [40; 70]$ °C.	**3.4**

C2	Для каждого значения U рассчитайте значение сопротивления R линии.	**0.4**

C3	Постройте график полученной зависимости $R(T)$. Загрузите скриншот графика.	**0.4**

Сопротивление линии связано с температурой следующим соотношением:

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

где R_0 — сопротивление линии при комнатной температуре, α — температурный коэффициент сопротивления.

C4	Из графика определите температурный коэффициент сопротивления α.	**0.8**