

Определение градиента показателя преломления и коэффициента диффузии раствора соли

I. Введение

Диффузия – это случайное блуждание частиц, приводящее систему к ее термодинамическому равновесию. Например, если в сосуде содержатся раствор соли и вода, то появится диффузионный поток из области с высокой концентрацией соли в область низкой концентрации. Скорость диффузии характеризуется коэффициентом диффузии D . Диффузия играет важную роль во многих процессах, от биохимии до астрофизики.

В этой задаче изучается диффузия соли. Ионы соли будут диффундировать из раствора соли в область с дистиллированной водой. Поэтому образуется слой, в котором концентрация соли меняется. Показатель преломления в этом растворе зависит от концентрации соли. Таким образом, мы можем изучать процесс диффузии с помощью оптического эксперимента, используя метод отклонения лазерного луча.

II. Цели задачи

1. Определить коэффициенты диффузии соли в водном растворе по градиенту показателя преломления.
2. Определить зависимость коэффициента диффузии от концентрации соли в растворе.

III. Оборудование

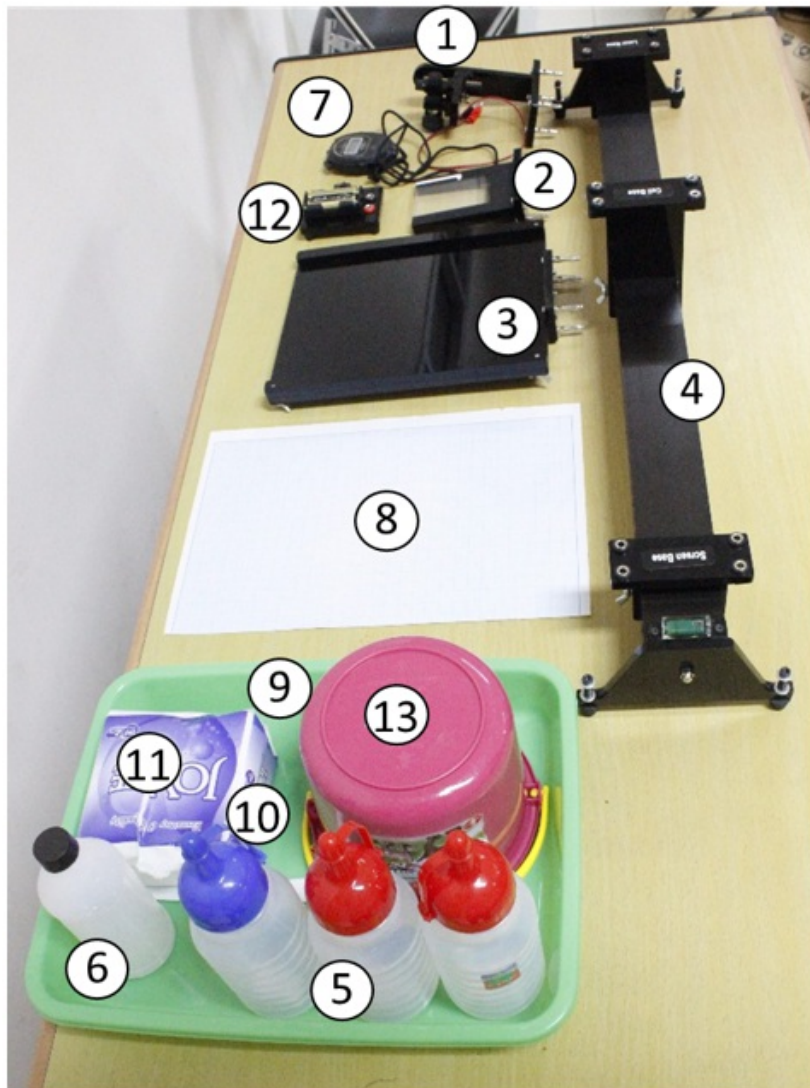


Рис. 1. Оборудование

1. Источник света, дающий на выходе линию (лазер, $\lambda = 632$ нм, и цилиндрическая линза)
2. Кювета (6.5 см x 0.8 см x 9.5 см) с держателем
3. Экран
4. Оптическая скамья с линейкой
5. Растворы соли
6. Дистиллированная вода (Aquadest)
7. Секундомер
8. Миллиметровка
9. Пипетка
10. Нож с салфетками для протирки
11. Салфетки
12. Батарейки
13. Ведро (для слива растворов соли)

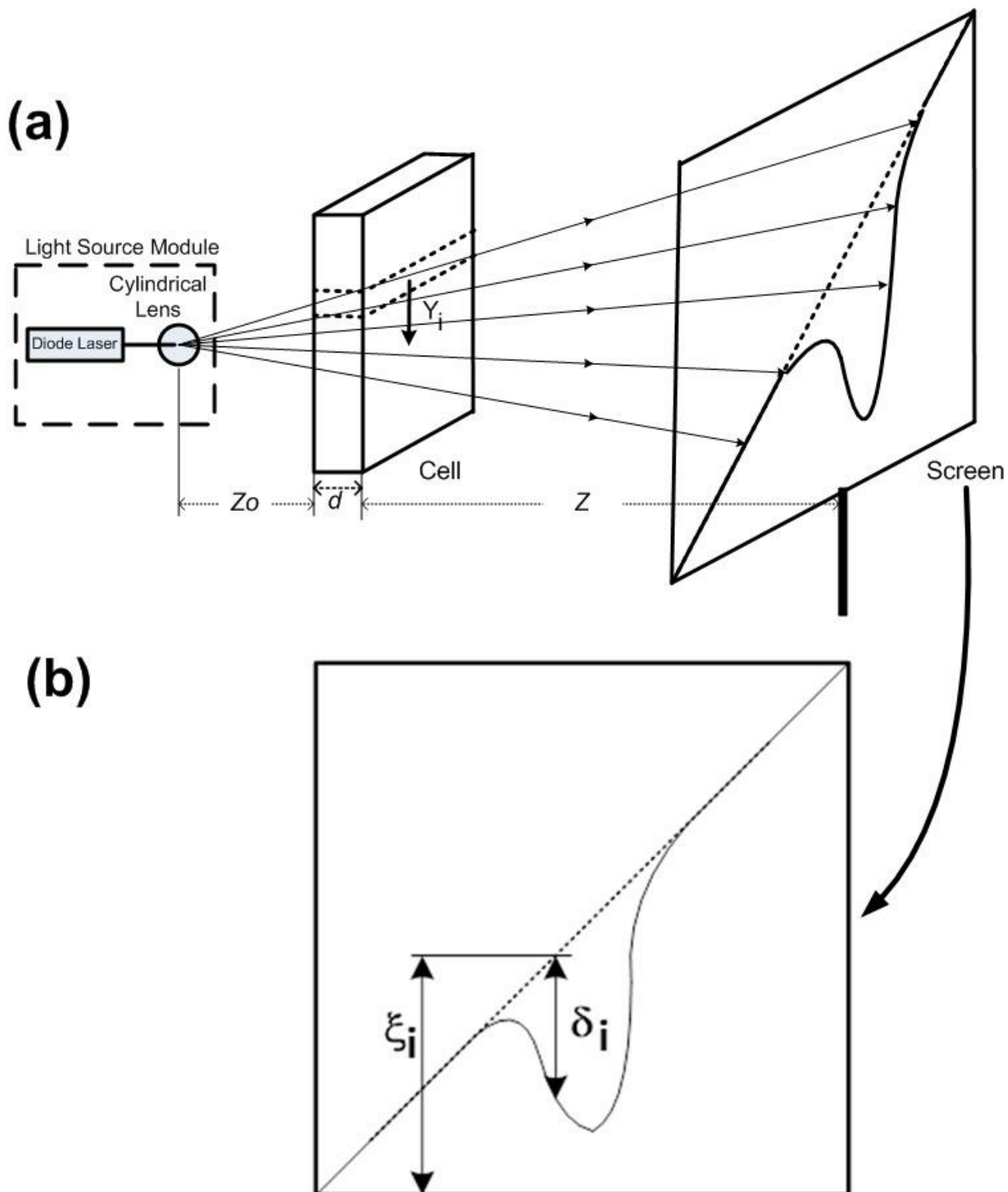


Рис. 2. (а) Схема установки (Light Source Module – источник света, Diode Laser – лазер, Cylindrical Lens – цилиндрическая линза, Cell – кювета, Screen – экран). **В кювету налит раствор соли, а сверху налита дистиллированная вода (aquadest).** **(б)** Дефлектограмма. Луч лазера на экране отклоняется в процессе диффузии между двумя растворами.

Принципиальная схема установки показана на рисунке 2.

Чтобы определить функцию зависимости градиента показателя преломления от координаты (по вертикали) в жидкости, нужно получить соответствие между координатой на экране ξ и координатой в кювете Y , получить соответствие между вертикальным отклонением δ и градиентом показателя преломления dn/dY .

Из геометрии установки (рисунок 2) имеем:

$$Y_i = \frac{\xi_i Z_0}{Z_0 + d + Z}$$

где Z , Z_0 и d показаны на рисунке 2а и обозначают расстояние между источником света и кюветой, расстояние между кюветой и экраном, толщину кюветы.

При измерении Z_0 считайте, что стрелка на штативе для источника света указывает положение цилиндрической линзы.

Толщину кюветы d и градиент показателя преломления можно считать малыми, поэтому вертикальным смещением луча при его прохождении внутри кюветы можно пренебречь. В этом приближении луч проходит в кювете практически на одной высоте, поэтому он отклоняется только из-за градиента показателя преломления на этой высоте.

Можно показать, что:

$$\left(\frac{dn}{dY} \right)_i = \frac{\delta_i}{Zd}$$

Выполнение измерений

- Чтобы получить отклонение луча лазера на экране (так же как на рисунке 2b), нужно собрать установку по схеме, согласно рисунку 2а.
- Включите лазер.
Убедитесь, что после прохождения кюветы источник света создает на экране изображение в виде наклонной линии.
Убедитесь, что свет падает по нормали к поверхности кюветы.
Чтобы линия получилась яркой и сфокусированной, можно подстроить расстояния Z , Z_0 , а также фокусировку лазера (вращая его за заднюю часть корпуса).
Также можно изменить наклон линии. Для этого нужно вращать источник света целиком (ослабьте зажим винта).
Когда кювета пуста, вы должны увидеть наклонную прямую линию.
- Лазерный луч отклонится, когда он пройдет область, где смешиваются два раствора.
В первую очередь налейте раствор соли в кювету. Налейте его до уровня, отмеченного белой стрелкой.
Затем добавьте воду в кювету. Воду добавляйте пипеткой по каплям, причем она заливается в

боковое отверстие в кювете. Нужно медленно влить около 40 капель.

Как только вы добавили воду, засекайте время. Секундомер будет измерять время, в течение которого проходит процесс диффузии.

Если расстояния Z , Z_0 и высоту лазера подобрать наилучшим образом, то место, в котором луч лазера отклонится на экране будет располагаться по центру, также четко будет виден провал максимальной глубины. Вам нужно выполнить эту правильную юстировку системы, чтобы минимизировать погрешности измерений.

- Спустя 30 минут обведите лазерный луч на миллиметровке, которая должна быть прикреплена к экрану.

Примечание. Вам нужно будет выполнить эксперимент для трех различных концентраций растворов соли (а именно, $C_0 = 23$ г/150 мл, $C_0 = 28$ г/150 мл, $C_0 = 33$ г/150 мл). Замените миллиметровку для каждой новой измеряемой концентрации.

Миллиметровку можно закрепить на экране с помощью винтов в углах экрана.

- Подпишите каждый лист миллиметровки своим кодом участника, а также укажите концентрацию раствора соли, которой соответствует данный лист.

IV. Задание

Часть А. Измерение градиента показателя преломления раствора соли (4.5 балла)

Задание этой части необходимо выполнить для каждой из трёх концентраций растворов. Оценка погрешностей не требуется.

A.1	Получите на экране изображение лазерного луча, описанное выше. Зарисуйте полученную картину на миллиметровую бумагу, прикреплённую к экрану, через 30 минут после начала процесса диффузии.	1.2
A.2	Определите величины Z , d , Z_0 , ξ_i и δ_i (где $i = 1, \dots, 20$ – различные координаты по горизонтали) для графиков, полученных ранее (снятых по прошествии 30 минут). Выразите эти величины в см. Величины Z , d и Z_0 одинаковы для всех i . Результаты занесите в Таблицу 1.	1.5
A.3	Вычислите величины Y_i и $\left(\frac{dn}{dY}\right)_i$ (для $i = 1, \dots, 20$). Величины Z , d и Z_0 одинаковы для всех i . Результаты занесите в Таблицу 2. Постройте графики зависимости $\left(\frac{dn}{dY}\right)_i$ от Y_i для $t = 30$ мин.	1.5
A.4	Определите Y_i для максимального значения $\left(\frac{dn}{dY}\right)_i$, полученного в пункте А.3. Это значение Y_i обозначьте как h .	0.3

Часть В. Определение коэффициента диффузии (4.2 балла)

Кривые, полученные в пункте А.3, могут быть описаны следующими уравнениями:

$$\left(\frac{dn}{dY}\right)_i = \left(\frac{dn}{dC}\right) \left(\frac{dC}{dY}\right)_i$$

$$\left(\frac{dC}{dY}\right)_i \approx \frac{C_0}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{(h-Y_i)^2}{4Dt}}$$

где C – концентрация соли в растворе, C_0 – начальная концентрация соли в растворе, D – коэффициент диффузии, t – время диффузии, h – значение Y_i для максимального значения градиента показателя преломления (dn/dY). Заметим, что dn/dC – константа. Коэффициент диффузии может быть найден из вышеприведенных уравнений с помощью линеаризации зависимости $(dn/dY)_i$ от Y_i .

В.1	Используя вышеприведенные уравнения, найдите функции $f\left(\frac{dn}{dY}\right)$ и $g(Y)$, для которых зависимость $f\left(\frac{dn}{dY}\right)$ от $g(Y)$ будет линейной.	0.9
В.2	Используя данные из Части А и линеаризацию из пункта В.1, заполните Таблицу 3 линеаризованными данными. Постройте эти линейные зависимости.	1.8
В.3	Определите коэффициенты диффузии D используя линейные графики пункта В.2, для $t = 30$ мин. Имейте в виду, что зависимость может быть линейной только в некотором диапазоне данных.	1.5

Часть С. Нелинейная диффузия (1.3 балла)

С.1	Проведённые выше рассуждения используют приближение, что D не зависит от C . Если это приближение не выполняется мы называем процесс нелинейной диффузией. Однако, в окрестности максимума $\frac{dn}{dY}$ можно считать, что процесс описывается обычной диффузией. В этом случае коэффициент диффузии зависит от локальной концентрации. Определите коэффициент изменения коэффициента диффузии от концентрации соли, используя данные части В.	1.3
------------	---	------------

PDL-ловушка для регистрации землетрясений и вулканической активности

Введение

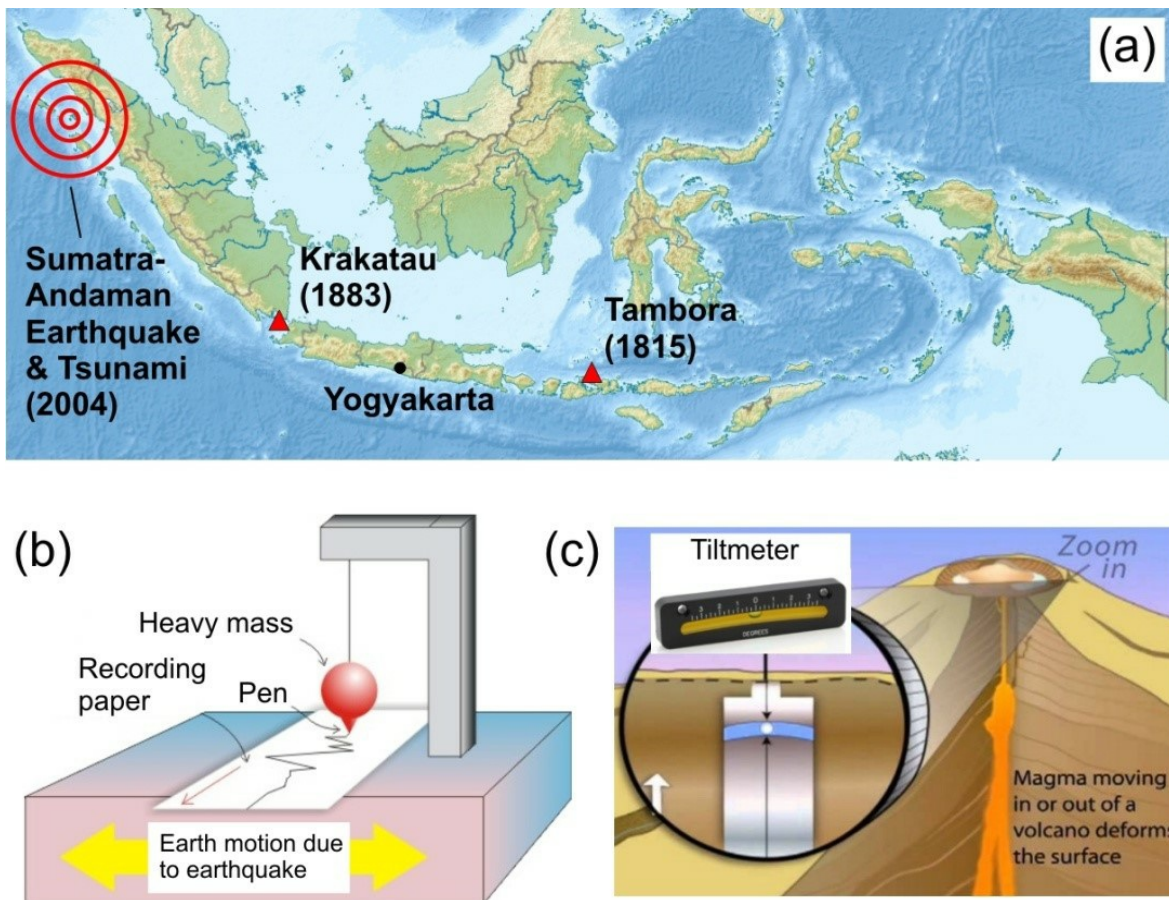


Рис. 1. (а) Карта Индонезии с указанными известными катастрофическими событиями. **(b)** Простейший сейсмометр для регистрации землетрясений. **(с)** Датчик наклона для наблюдения за вулканами.

Индонезия – это крупнейший в мире архипелаг, состоящий из примерно 17000 островов, расположенных в тропиках, который часто называют "ожерельем экватора". К сожалению, она подвержена землетрясениям и извержениям вулканов.

Для регистрации землетрясений используется *сейсмометр*, обычно он представляет собой маятник для измерения смещения земной поверхности или ускорения (рисунок 1b). Для наблюдения за вулканами используется *датчик наклона*, он регистрирует изменение наклона поверхности из-за подземного движения магмы (рисунок 1с). В этой задаче мы исследуем физику и применение нового типа магнитной ловушки и датчика, называемого *параллельной дипольной линейной* (parallel dipole line, PDL) - ловушки для регистрации землетрясений и наблюдения за вулканами.

Параллельная дипольная линейная система представляет собой конструкцию из двух линейно распределенных магнитных диполей (также называемую дипольной линией), как показано на рисунке 2. Недавно два физика из Индонезии открыли очень интересный эффект этой системы: если длина линии из диполей больше определенной критической длины, магнитное поле становится сильнее на концах, что приводит к "двугорбому потенциалу", как показано на рисунке 2а. Данный "двугорбый эффект" важен, так как он позволяет использовать данную систему как новый тип магнитной ловушки, называемый PDL-ловушкой. Мы можем экспериментально реализовать эту PDL-ловушку с помощью пары «диаметральных» магнитов, т.е. поперечно намагниченных цилиндрических магнитов, как показано на рисунке 2с, где северный и южный полюса находятся на боковых поверхностях, а не на торцах.

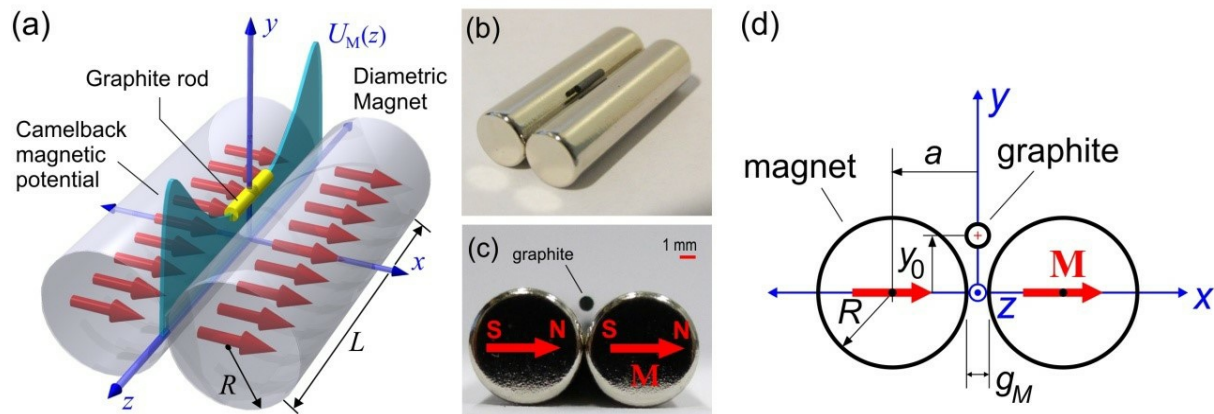


Рис. 2. (а) Модель датчика с параллельными диполями с двугорбым распределением потенциала по оси z . (б) Экспериментальная установка с «диаметральными» магнитами. (с) Поперечное сечение. (д) Схема PDL- ловушки.

[* Gunawan and Virgus, J. Appl. Phys. 121, 133902 (2017)].

Если мы поместим графитовый стержень (обычный стержень от карандаша) в ловушку, он будет левитировать или будет находиться в устойчивом состоянии. Это происходит потому, что в направлении x графит отталкивается магнитами с обеих сторон, а в вертикальном направлении y магнитная отталкивающая сила уравнивается силой тяжести, и графит левитирует на высоте y_0 (рисунок 2d). В продольном направлении z двугорбый потенциал удерживает стержень в устойчивом состоянии.

Двугорбый потенциал магнитной ловушки работает как потенциал одномерного осциллятора. Если придать небольшое смещение графитовому стержню вдоль оси z , он будет испытывать затухающие колебания, как показано на рисунке 3а. Эта PDL-ловушка может использоваться как чувствительный сейсмометр. Если основание трясется, то графитовый стержень будет оставаться в устойчивом состоянии, а его относительное смещение (рисунок 3б) будет сигналом «землетрясения». Также ловушка может использоваться как чувствительный датчик наклона. Если ловушку слегка наклонить, графитовый стержень заметно переместится, т.к. трение мало.

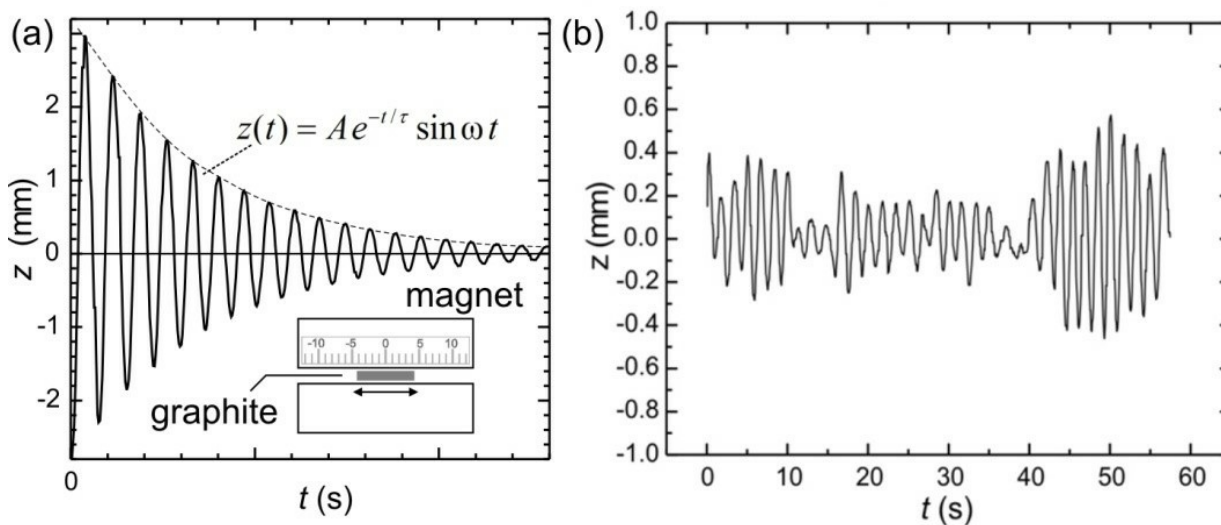


Рис. 3. (а) Затухающие колебания графитового стержня в двугорбом потенциале. **(b)** Применение сейсмометра: регистрация колебаний поверхности Земли с помощью PDL-ловушки.

Исследуем физику и применения данной PDL-ловушки в двух частях.

Часть А. Основные характеристики PDL-ловушки

1. Определение намагниченности M магнита (2.5 балла)
2. Магнитная левитация и магнитная восприимчивость χ (1 балл)
3. Колебания в двугорбом потенциале и магнитная восприимчивость χ (1 балл)
4. Добротность осциллятора Q и оценка вязкости воздуха (3 балла)

Часть В. Практические применения ловушек

5. Сейсмометр (0.5 балла)
6. Датчик наклона (2 балла)

Оборудование

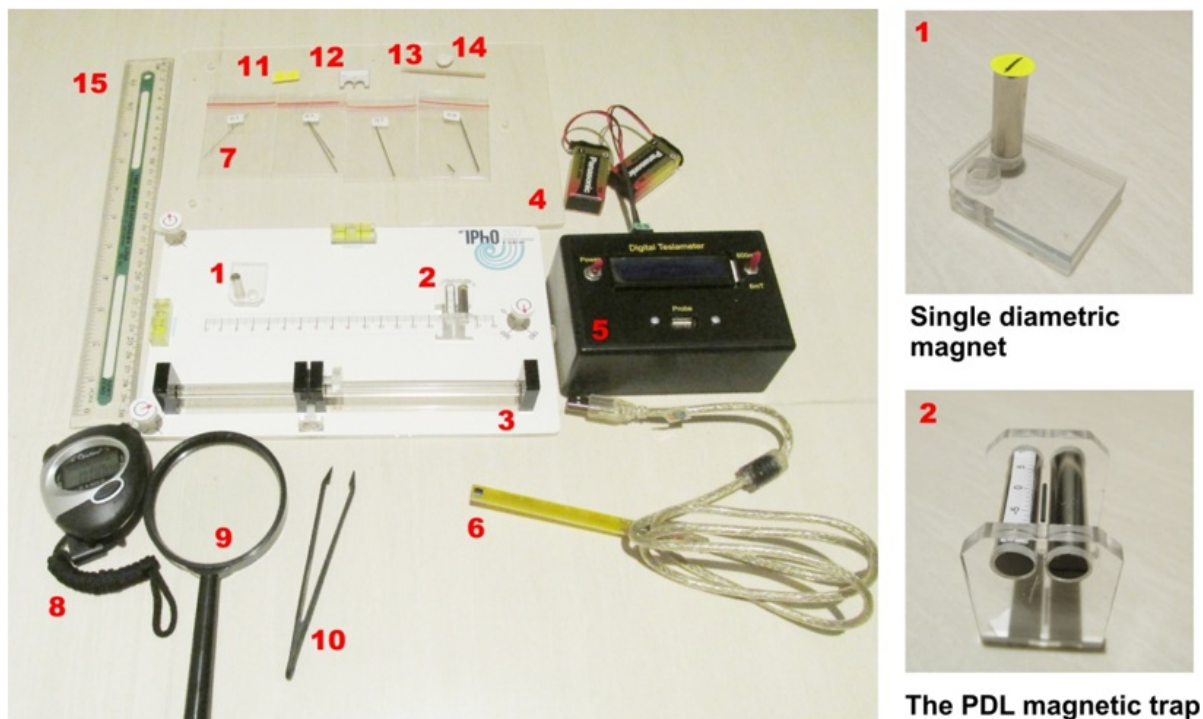


Рис. 4. Оборудование (The PDL magnetic trap – PDL-ловушка).

1. Одиночный диаметральный магнит. Желтую наклейку можно приклеить к магниту, чтобы указать направление намагничивания.
2. Магнитная PDL-ловушка (показана с левитирующим графитом). Не разбирайте сборку.
3. Платформа с 3 винтами
4. Основание для установки платформы
5. Магнетометр для измерения магнитного поля, батарейки для его питания.
6. Датчик Холла магнетометра с проводом
7. Графитовые стержни (грифели от карандашей) с 4 различными диаметрами НВ/0.3, НВ/0.5, НВ/0.7 и НВ/0.9. Число указывает примерный диаметр в мм. В разделе "Заданные величины" приведены их точные диаметры. Если требуется, вы можете ломать графитовые стержни, чтобы сделать их нужной длины.
8. Секундомер
9. Лупа
10. Антистатический пинцет

11. Круглые желтые наклейки для указания направления намагниченности одиночного магнита
12. Встраиваемая линейка для измерения высоты левитации графитового стержня
13. Зубочистка для смещения графитового стержня
14. Клейкая масса для крепления магнита к платформе
15. Линейка

Инструкции и предупреждения

1. **Держите одиночный магнит и PDL-ловушку (двойной магнит) в далеке друг от друга. Они могут столкнуться и сломаться.**
2. **Выключайте магнитометр, когда не пользуетесь им.**
3. Аккуратно отделите элементы оборудования 7, 11-14 от основания (элемент 4) и поместите платформу (элемент 3) на основание.
4. Используйте винты для выравнивания платформы.

Заданные величины

Радиус «диаметрального» магнита	:	$R = 3.2$ мм
Длина «диаметрального» магнита	:	$L = 25.4$ мм
Зазор PDL-ловушки	:	$g_M = 1.5$ мм
Плотность графита	:	$\rho = 1680$ кг/м ³
Диаметр стержня "НВ/0.3"	:	$d = 0.38$ мм
Диаметр стержня "НВ/0.5"	:	$d = 0.56$ мм
Диаметр стержня "НВ/0.7"	:	$d = 0.70$ мм
Диаметр стержня "НВ/0.9"	:	$d = 0.90$ мм
Комнатная температура	:	$T = 298$ К
Магнитная постоянная	:	$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ Гн/м
Постоянная Больцмана	:	$k_B = 1.38064852 \times 10^{-23}$ Дж/К
Ускорение свободного падения	:	$g = 9.8$ м/с ²

Задания

Часть А. Основные характеристики PDL-ловушки

1. Определение намагниченности M магнита (2.5 балла)

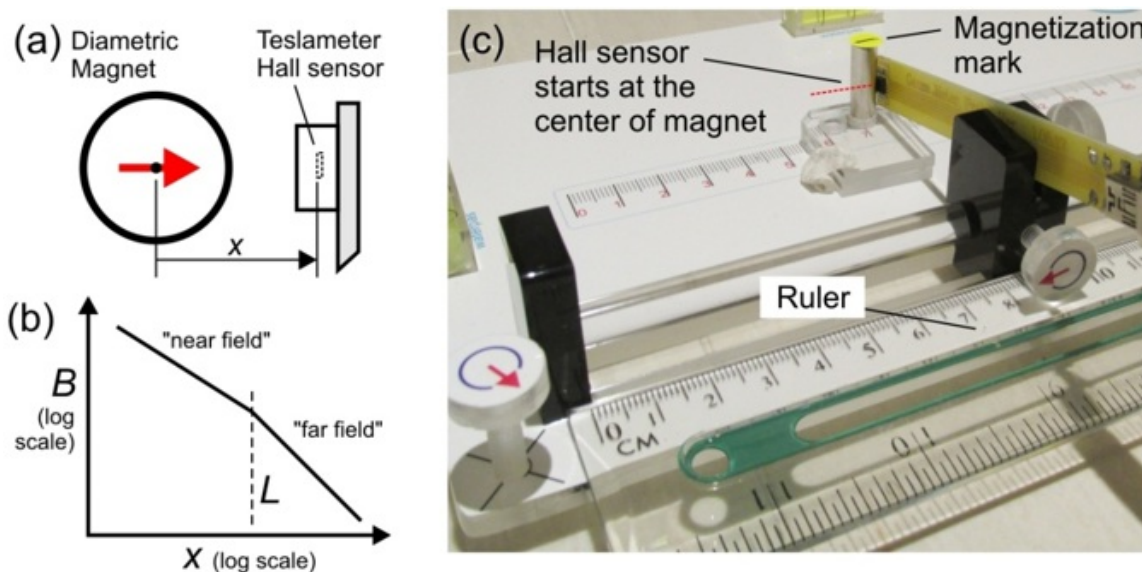


Рис. 5. (а) Измерение магнитного поля (Diametric magnet – поперечно намагниченный цилиндр, Teslameter/Hall sensor – Датчик Холла). (б) Зависимость магнитного поля от расстояния $B(x)$ (по обеим осям логарифмический масштаб) (near field – в ближней области, far field – в дальней области). (с) Установка (Hall sensor starts at the center of magnet -- Сначала прижмите датчик Холла к середине магнита, подключите датчик Холла к магнетометру, Magnetization mark – наклейка для отmarkания направления намагниченности, Ruler – линейка).

Сила магнитной ловушки зависит от полного магнитного момента цилиндра m . Он зависит от намагниченности M , т.е. магнитного момента единицы объема и магнитных характеристик материала. Для выданного цилиндрического магнита:

$$M = \frac{m}{\pi R^2 L}$$

где R – радиус, L – длина магнита (см. раздел "Заданные величины"). Величина намагниченности M считается одинаковой для всех магнитов в этой задаче. Мы будем исследовать зависимость магнитного поля от координат и определим M диаметрального магнита, который используется в PDL-ловушке.

Возьмите одиночный диаметральный магнит на подставке и соберите установку, как показано на рисунке 5с. Расположите магнит так, чтобы вектор намагниченности был направлен на датчик Холла (рисунок 6а). С помощью него снимите зависимость индукции магнитного поля от расстояния x . Индукция поля B в ближней области (или в приближении "дипольной линии")

Experiment

Russia

E2

примерно до $x \leq 16$ мм описывается уравнением:

$$B_I(x) = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^p L}$$

Ось x направлена вдоль вектора намагниченности диаметрального магнита, как показано на рисунке 6а. Координата x – это расстояние между осью диаметрального магнита и измерительным элементом в датчике Холла. Учтите, что измерительный элемент смещен относительно поверхности датчика, как показано на рисунке 6б.

Измерения проводятся только в ближней области магнита.

A.1	Запишите нулевое значение индукции B_0 датчика Холла, когда вокруг него нет магнитов. Вычитайте это значение из всех последующих измеряемых значений индукции.	0.1
A.2	Снимите зависимость индукции магнитного поля B от координаты x в ближней области магнита ($7 \leq x \leq 16$ мм). x – это координата, измеренная от центра магнита. Запишите снятые данные в лист ответов. Постройте график, соответствующий вашим данным, в листе ответов. Учтите "Указания", приведенные ниже.	1.15
A.3	Определите значение показателя степени p , используя свои экспериментальные данные.	0.75
A.4	Определите намагниченность M магнита.	0.5

Указания

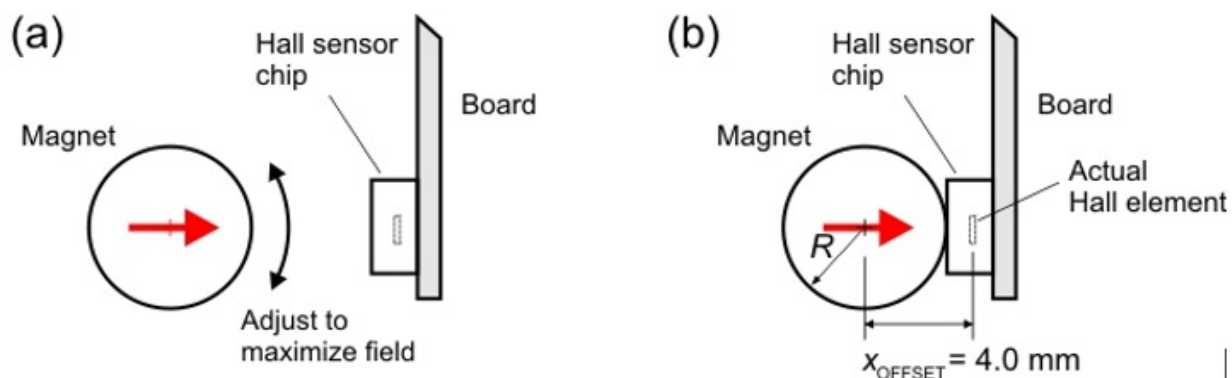


Рис. 6. Измерение индукции магнитного поля. **(а)** Установка магнита (Magnet – магнит, Hall sensor chip – датчик Холла, Board – плата, Adjust to maximize field – вращайте магнит, до тех пор пока не достигнете максимального значения индукции поля). **(б)** Смещение измерительного элемента относительно поверхности датчика (Magnet – магнит, Hall sensor chip – датчик Холла, Board – плата, Actual Hall element – измерительный элемент датчика Холла).

1. **Выключайте магнетометр, когда вы его не используете, чтобы беречь батарею.**
2. Время реакции магнетометра примерно 2 секунды. Подождите примерно это время перед снятием показания.
3. Учтите, что x измеряется от центра магнита. Радиус магнита $R = 3.2$ мм.
4. Для измерений используйте схему установки, приведенную на рисунке 5с.
5. Поверните магнит так, чтобы вектор его намагниченности указывал на датчик Холла для этого вращайте магнит, до тех пор пока не достигнете максимального значения индукции поля (рисунок 6а). Используйте круглые желтые наклейки, чтобы обозначить направление намагниченности.
6. Когда датчик Холла находится на поверхности магнита, реальное расстояние между центром магнита и непосредственным измерительным элементом датчика равно $x_{OFFSET} = 4$ мм.
7. С помощью датчика Холла можно надежно измерять только начиная с координаты $x = 5$ мм. Данным, когда датчик касается поверхности магнита, нельзя доверять (при $x = 4$ мм). В этом положении датчик находится в режиме насыщения или датчик изгибается при касании.

2. Магнитная левитация и магнитная восприимчивость χ (1 балл)

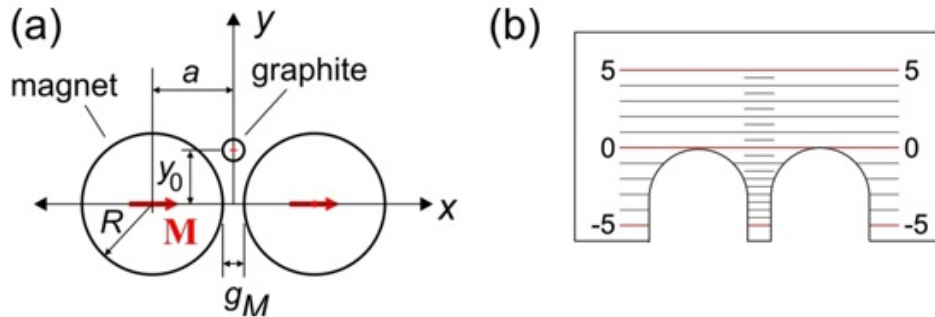


Рис. 7. (a) Магнитная левитация в PDL-ловушке (magnet – магнит, graphite – графитовый стержень). **(b)** Чтобы измерить высоту y_0 , на которой левитирует образец, используйте вот такую линейку.

С помощью PDL-ловушки можно наблюдать магнитную левитацию. Графитовый стержень левитирует в центре ловушки на высоте y_0 , как показано на рисунке 7а. Графитовый стержень отталкивается магнитом силой $F_M(y_0)$, которая зависит от магнитной восприимчивости χ и положения стержня y_0 . Магнитная восприимчивость говорит о том, насколько намагничивается вещество, когда оно помещено в магнитное поле. Связь между магнитной проницаемостью μ и магнитной восприимчивостью χ задается соотношением: $\mu = (1 + \chi)\mu_0$. Сила отталкивания, действующая на графитовый стержень в PDL-ловушке:

$$F_M(y_0) = -\frac{\mu_0 M^2 \chi V_r R^4}{2 a^5} f\left(\frac{y_0}{a}\right)$$

Заметим, что сила $F_M(y_0)$ положительна и направлена вверх, тогда когда в формуле выше содержится знак "минус". В формуле выше V_r -- объем графитового стержня, M – намагниченность магнита (полученная в задании 1), a – положение центра магнита, вычисленное как $a = R + g_M/2$, согласно рисунку 7а (где $g_M = 1.5$ мм – зазор между магнитами). $f(u)$ – безразмерная функция:

$$f(u) = \frac{4u(3 - u^2)(1 - u^2)}{(1 + u^2)^5}$$

<p>A.5</p>	<p>Аккуратно положите в ловушку графитовый стержень НВ/0.5 длиной 8 мм. Измерьте высоту y_0, на которой парит стержень (рисунок 7а).</p> <p>Указание: Чтобы измерить эту высоту, воспользуйтесь линейкой, показанной на рисунке 7b. Прижмите линейку к магнитам и снимите значение высоты.</p>	<p>0.1</p>
<p>A.6</p>	<p>Определите магнитную восприимчивость χ графита, используя результаты из пункта A.5.</p>	<p>0.8</p>

A.7	<p>К какому типу магнитного вещества относится графит?</p> <p>Выберите один из вариантов:</p> <p>(i) Ферромагнетик (ii) Парамагнетик (iii) Диамагнетик</p>	0.1
------------	--	------------

3. Колебания в двугорбом потенциале и магнитная восприимчивость χ (1 балл)

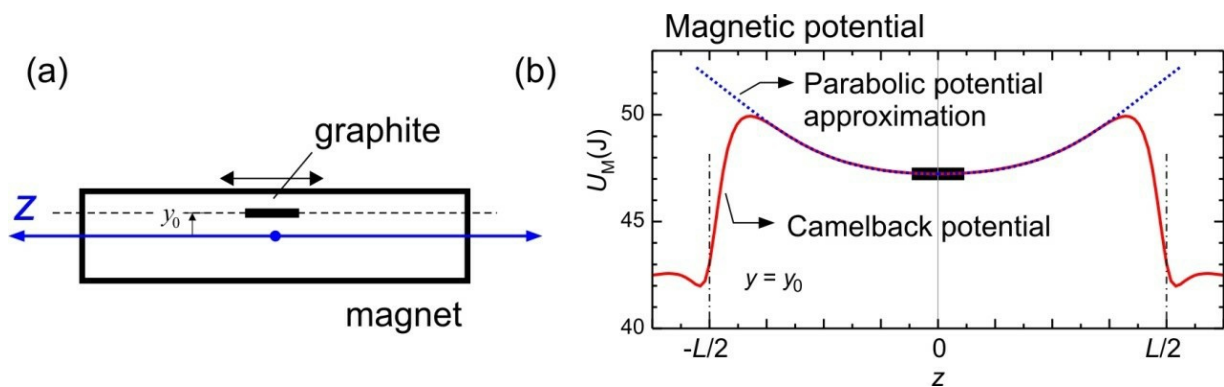


Рис. 8. (a) Колебания графитового стержня на высоте y_0 (graphite – графитовый стержень, magnet – магнит). **(b)** Двугорбый потенциал PDL-ловушки и его параболическое приближение (Magnetic potential – магнитный потенциал, Parabolic potential approximation – параболическое приближение потенциала, Camelback potential – двугорбый потенциал).

Исследуя колебания в двугорбом потенциале в PDL-ловушке (рисунок 8), можно независимым образом определить χ . Для малых колебаний ($z < 4$ мм) магнитный потенциал может быть аппроксимирован параболической зависимостью (пунктирная линия на рисунке 8b):

$$U_M = \frac{1}{2}k_z z^2$$

где k_z – "коэффициент жесткости", z – смещение центра масс стержня. "Коэффициент жесткости" k_z зависит от намагниченности M (определенной в задании 1) и χ следующим образом:

$$k_z = -C_1 \mu_0 \chi M^2 V_r$$

где μ_0 – магнитная постоянная, V_r – объем графитового стержня, $C_1 = 198.6 \text{ м}^{-2}$ – постоянная, вычисленная именно для этой магнитной ловушки.

Положите графитовый стержень в центр магнитной ловушки. Добейтесь, чтобы стержень находился точно в центре магнитной ловушки. Для этого подкрутите винты на платформе.

Сместите стержень с помощью зубочистки и, таким образом, возбуждите колебания вдоль двугорбого потенциала.

A.8	Положите в ловушку графитовый стержень HB/0.5 длиной $l = 8$ мм. Возбудите малые колебания (амплитудой $A < 4$ мм). Определите период колебаний. Затуханием колебаний можно пренебречь.	0.2
A.9	Рассчитайте значение магнитной восприимчивости χ графита, используя данные, полученные в эксперименте с колебаниями.	0.8

4. Добротность осциллятора Q и оценка вязкости воздуха (3 балла)

Заметим, что когда графитовый стержень колебался, колебания затухали. Это происходило из-за трения о воздух. Исследуем, как зависит затухание от размеров стержня (диаметра и длины), а затем оценим вязкость воздуха μ_A .

Движение стержня можно описать колебаниями с затуханием (рисунок 3а):

$$z(t) = Ae^{-t/\tau} \sin \omega t$$

где A – начальная амплитуда, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, t – время. Амплитуда затухает со временем как $e^{-t/\tau}$, где τ – характерное время затухания. Колебательная система характеризуется добротностью $Q = \omega\tau/2$. При $Q > 0.5$ происходят затухающие колебания, при $Q = 0.5$ система находится в критическом режиме, при $Q < 0.5$ система находится в аperiodическом режиме, и колебания отсутствуют.

Значение добротности важно при разработке PDL-ловушек в качестве сейсмометров и датчиков наклона.

Характерное время затухания τ можно оценить, если считать цилиндрический стержень длинным эллипсоидом и записать для него силу Стокса. Тогда характерное время затухания τ выражается как:

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{\rho r^2}{\mu_A} \ln \left(0.607 \times \frac{l}{r} \right)$$

где ρ , r и l – это плотность, радиус и длина графитового стержня соответственно, μ_A – вязкость воздуха. Оценим вязкость воздуха по этой модели.

A.10	Нужно определить характерное время затухания τ . Схематически зарисуйте установку и поясните процедуру, как вы будете находить τ . Сделайте это <i>простым способом</i> .	0.5
-------------	---	------------

A.11	Проведите эксперименты с затухающими колебаниями для графитовых стержней различных диаметров, но фиксированной длины 8 мм. Определите характерные времена затухания τ для каждого стержня.	1.5
A.12	Определите вязкость воздуха μ_A .	1.0

Практические применения ловушек

5. Сейсмометр (0.5 балла)

Допустим мы хотим разработать сейсмометр на основе магнитной PDL-ловушки. Для этого нужна очень высокая чувствительность или, что равносильно, крайне низкий уровень шума для определения ускорения. Т.е. нам нужно знать минимальное ускорение, которое прибор сможет зарегистрировать. Этот уровень шума для определения ускорения измеряется в $[m/(c^2 \cdot Hz^{1/2})]$ и рассчитывается по следующей формуле:

$$a_n = \sqrt{\frac{4k_B T \omega}{Q m_R}}$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура (см. раздел "Заданные величины"), m_R – масса стержня. Все величины подставляются в системе СИ. В задании 4 вы измерили τ для нескольких графитовых стержней различных диаметров. Скажите, который из них вы бы взяли как наиболее подходящий для работы сейсмометра.

B.1	Укажите диаметр выбранного вами стержня.	0.2
B.2	Рассчитайте уровень шума для определения ускорения a_n для выбранного вами стержня.	0.3

6. Датчик наклона (2 балла)

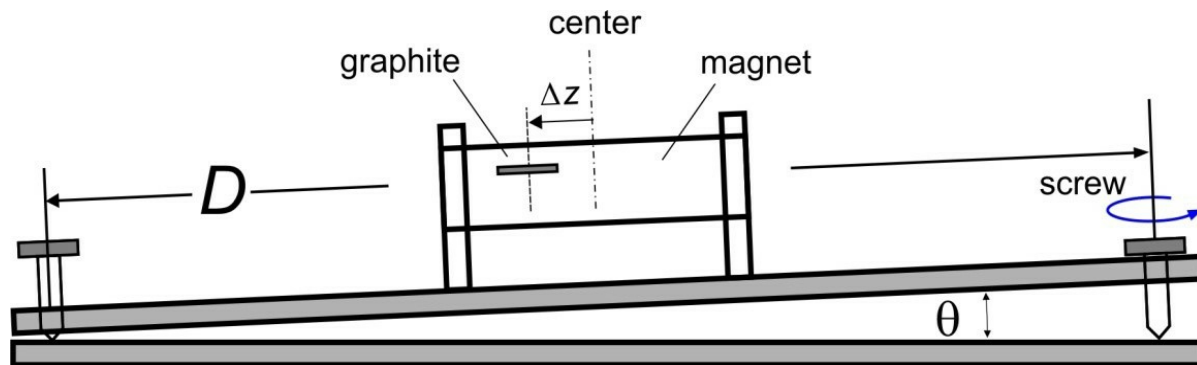


Рис. 9. Использование PDL-ловушки в качестве датчика наклона (graphite – графитовый стержень, center – центр, magnet – магнит, screw – винт, D – расстояние между винтами).

Исследуем PDL-ловушку в качестве очень чувствительного датчика наклона для слежения за активностью вулканов. Изменение наклона земной коры моделируется поворотом винта (рисунок 9). Сначала нам нужно определить шаг S винта, т.е. изменение высоты приходящееся на один оборот винта. Затем мы покажем, что измеряя перемещение графитового стержня в ловушке, мы можем вычислить наклон очень точно.

Используйте стержень HB/0.5 длиной $l = 8$ мм. Поместите стержень в центральное положение (рисунок 9). Считайте, что двугорбый потенциал можно аппроксимировать гармоническим потенциалом, так же как и в задании 3.

В.3	Теоретически получите соотношение между смещением Δz , шагом винта S и количеством оборотов N .	0.5
В.4	Медленно вращая винт, снимите зависимость смещения Δz от количества оборотов винта N . Определите шаг винта S .	1.25
В.5	Если вдруг наклон земной коры изменился, нам бы хотелось снять значение как можно быстрее, для этого графитовый стержень должен прийти в равновесие как можно быстрее (а не колебался возле положения равновесия значительное время). Какую нужно подобрать добротность Q системы для такого датчика наклона?	0.25