

## Экспериментальная задача 1

Вам даны две экспериментальные задачи. На столе находится всё необходимое для решения этих задач. На решение задач (1 и 2) Вам даётся 5 часов.

### Экспериментальная задача 1: Упругость плёнок

#### Введение

Пружины – устройства, изготовленные из упругих материалов, которые служат для накопления механической энергии. Наиболее распространены винтовые пружины. Их поведение хорошо описывает закон Гука, согласно которому деформация (удлинение)  $\Delta x$  пружины пропорционально силе  $F$ , вызывающей деформацию:

$$F = -k\Delta x,$$

где  $k$  – жёсткость (коэффициент упругости) пружины (Рис. 1(a)). Между тем, существуют пружины, отличающиеся от винтовых, и, кроме того, закон Гука нарушается при больших деформациях. В этой задаче мы изучаем свойства пружины, сделанной из свёрнутого упругого материала (Рис. 1(b)).

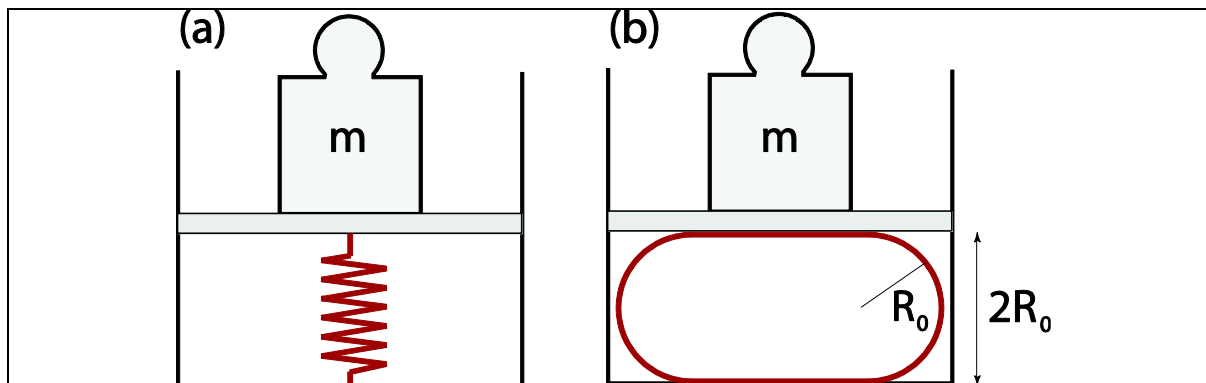


Рис. 1. Винтовая пружина (a) и пружина, изготовленная из куска упругого материала, свёрнутого в цилиндр (b). Когда пружина (b) сжата, её поперечное сечение можно представить в форме стадиона с двумя полуокружностями радиусов  $R_0$ .

#### Прозрачная пленка, свёрнутая в цилиндрическую пружину

Представьте, что мы сгибаем кусок упругого материала (например, прозрачную плёнку). Упругая энергия зависит от кривизны поверхности.

Чем больше искривление поверхности, тем больше накапливается упругой энергии (плоские части поверхности плёнки энергию не накапливают, поскольку их кривизна равна нулю). Пружины, используемые в данном эксперименте, изготовлены из прямоугольных кусков прозрачных плёнок, свёрнутых в цилиндры (Рис. 2). Упругая энергия такого цилиндра вычисляется по формуле:

$$E_{el} = \frac{\kappa}{2} \frac{1}{R_c^2} A, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь боковой поверхности цилиндра,  $R_c$  – радиус цилиндра,  $\kappa$  – параметр, который можно назвать сопротивлением изгибу и который зависит от упругости материала и его толщины. Растяжением материала можно пренебречь.

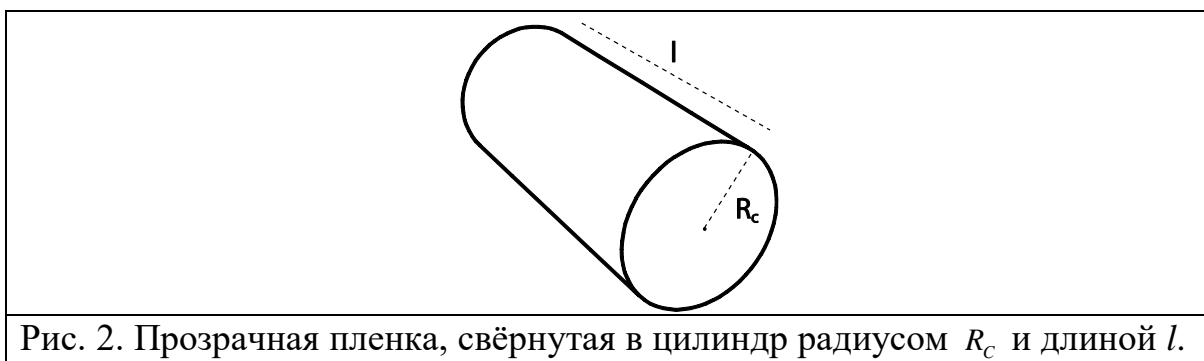


Рис. 2. Прозрачная пленка, свёрнутая в цилиндр радиусом  $R_c$  и длиной  $l$ .

Представьте себе, что цилиндр сжат так, как показано на рис. 1(b). Для данной силы  $F$ , приложенной со стороны пресса, смещение от положения равновесия зависит от упругости прозрачной плёнки. В некотором интервале изменения силы сжатия поперечное сечение пленки можно представить в форме стадиона (две прямые линии и две полуокружности радиусом  $R_0$  каждая). Энергия сжатой системы минимальна, когда

$$R_0^2 = \frac{\pi \kappa l}{2F}. \quad (2)$$

Сила измеряется весами, прокалиброванными в единицах массы  $m$ . Таким образом,  $F = mg$ , где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

### Экспериментальная установка (задача 1)

На столе находятся следующее оборудование (для задачи 1):

1. Пресс (с каменным бруском) - в случае необходимости смотрите инструкцию
2. Весы (измеряющие массу до 5 000 г, имеют функцию TARA) - в случае необходимости смотрите инструкцию
3. Прозрачные плёнки (все плёнки имеют размеры 21 см х 29,7 см, толщина синей плёнки 200 мкм, бесцветной – 150 мкм); если это необходимо, то попросите дополнительные плёнки
4. Липкая лента (скотч)
5. Ножницы
6. Линейка с делениями
7. Прямоугольная деревянная пластина (её кладут на весы, а на неё кладут свёрнутую в цилиндр плёнку)

Соберите установку как показано на рисунке 3. Верхняя пластина прессы может перемещаться вверх-вниз с помощью гайки. Сила, с которой действует пресс, измеряется весами.

**Внимание:** При каждом повороте гайки на  $360^\circ$  она перемещается на 2 мм. (Алюминиевый стержень в экспериментальной задаче 1 не используется).



Рис. 3. Фотография установки для измерения сопротивления изгибу.

### Задания

1. Сверните две синие плёнки в цилиндры, одну вдоль длинной, а другую вдоль короткой стороны. Соедините края каждого из цилиндров липкой лентой. Перекрытие краёв плёнки должно составлять около 0,5 см.

а) Для этих двух цилиндров измерьте зависимость показаний весов от расстояния между пластинами пресса. Результаты измерений занесите в листы ответов. (1,9 балла)

б) Представьте графически экспериментальные данные в подходящих координатах. На каждом графике выделите область, где справедливо приближение, в котором поперечное сечение цилиндра имеет форму стадиона. При помощи линейки, приблизительно («на глаз») проведите прямые линии через точки и определите сопротивления изгибу  $\kappa$  для каждого из цилиндров. Оцените значение  $R_0 / R_C$ , ниже которого данное приближение ещё справедливо (здесь  $R_C$  - радиус цилиндра без нагрузки). (4,3 балла)

**Расчет погрешностей не требуется.**

2. Измерьте сопротивление изгибу  $\kappa$  для одной прозрачной бесцветной плёнки. Измерение проведите для пленки, свернутой либо вдоль длинной, либо вдоль короткой стороны. (2,8 балла)

3. Сопротивление изгибу  $\kappa$  для изотропных материалов зависит от модуля Юнга  $Y$  (модуль упругости) и от толщины  $d$  прозрачной плёнки следующим образом:

$$\kappa = \frac{Yd^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Для большинства материалов  $\nu \approx 1/3$ .

Используя результаты предыдущих измерений, определите модуль Юнга  $Y$  для синей и бесцветной прозрачной плёнок. (1,0 балл)

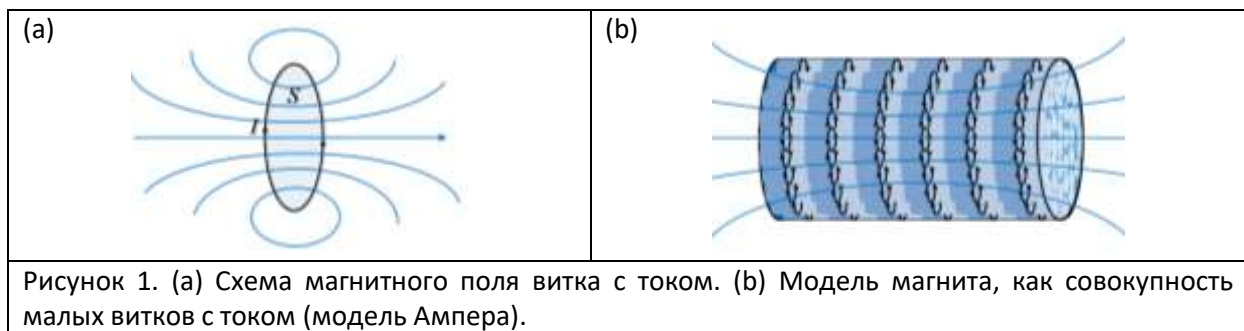
## Экспериментальная задача 2

Вам предлагаются две экспериментальные задачи. На вашем столе находится все необходимое для решения этих задач. У вас есть 5 часов для решения задач (1 и 2).

### Экспериментальная задача 2: Силы взаимодействия между магнитами, понятия устойчивости и симметрии

#### Введение

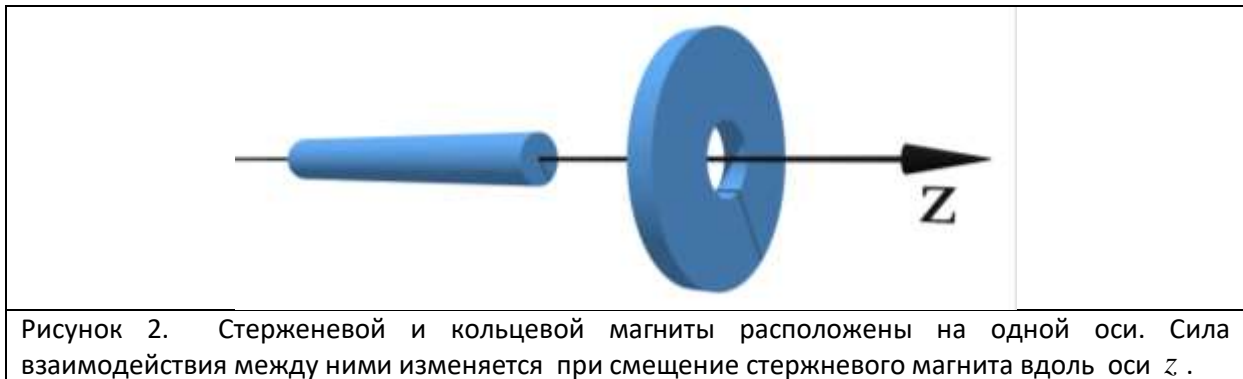
Электрический ток  $I$ , циркулирующий по витку площадью  $S$ , создает магнитный момент величины  $m = IS$  [Рисунок 1(a)]. Магнитные свойства каждого атома аналогичны свойствам витка с током. Поэтому постоянный магнит можно представить как совокупность малых магнитных моментов атомов (Fe), аналогичных магнитным моментам витков с током. Эта модель магнита (модель Ампера) представлена на Рис.1(b). Полный магнитный момент равен сумме магнитных моментов всех атомов (одинаковой ориентации), в результате происходит намагничивание образца (образование северного и южного полюсов).



#### Силы взаимодействия магнитов

Расчет сил, действующих между двумя магнитами, является сложной теоретической задачей. Известно, что одноименные полюса двух магнитов отталкиваются, а разноименные притягиваются. Сила взаимодействия между двумя витками с током зависит от силы тока в них, их формы и расстояния между ними. Если поменять направление тока в одном из витков, значение модуля силы останется прежним, но поменяется ее направление.

В этой задаче Вам необходимо экспериментально исследовать силы взаимодействия между двумя магнитами, стержневым и кольцевым. Нас интересует случай когда оси двух магнитов совпадают (Рис. 2). Стержневой магнит может двигаться вдоль оси  $z$  слева направо, проходя при этом через кольцевой магнит (Рис. 2). Кроме других заданий Вы должны выразить силу между магнитами как функцию  $z$ . Начало отсчета оси  $z = 0$  расположено в центре кольцевого магнита, координата  $z$  определяет положение центра стержневого магнита.



Для обеспечения движения стержневого магнита вдоль оси симметрии (оси  $z$ ), кольцевой магнит встроен в прозрачный цилиндр, который имеет отверстие вдоль оси  $z$ . Стержневой магнит, находящийся внутри прозрачного цилиндра может двигаться только вдоль оси  $z$  (Рис. 3). Вектор намагниченности направлен вдоль оси  $z$ . Отверстие обеспечивает радиальную устойчивость магнитов.



### Экспериментальная установка (2 задание)

На столе находятся следующее оборудование (для 2 задания):

1. Пресс (с каменным грузом)
2. Весы (измеряют массу до 5000 g, имеют функцию TARA, в случае необходимости смотрите инструкцию)
3. Прозрачный полый цилиндр со встроенным с одной стороны кольцевым магнитом.
4. Стержневой магнит
5. Деревянная палочка (служит для перемещения стержневого магнита в цилиндре)

Установка для измерения силы взаимодействия между магнитами показана на рисунке 4. Верхнюю пластину прессы, который вы использовали в задаче 1, переверните. Алюминиевый

стержень используйте для проталкивания стержневого магнита через цилиндр. Весы откалиброваны в единицах массы. Верхнюю пластину можно перемещать вверх-вниз с помощью гайки.

**Примечание:** При каждом повороте гайки на 360 градусов она перемещается на 2мм.

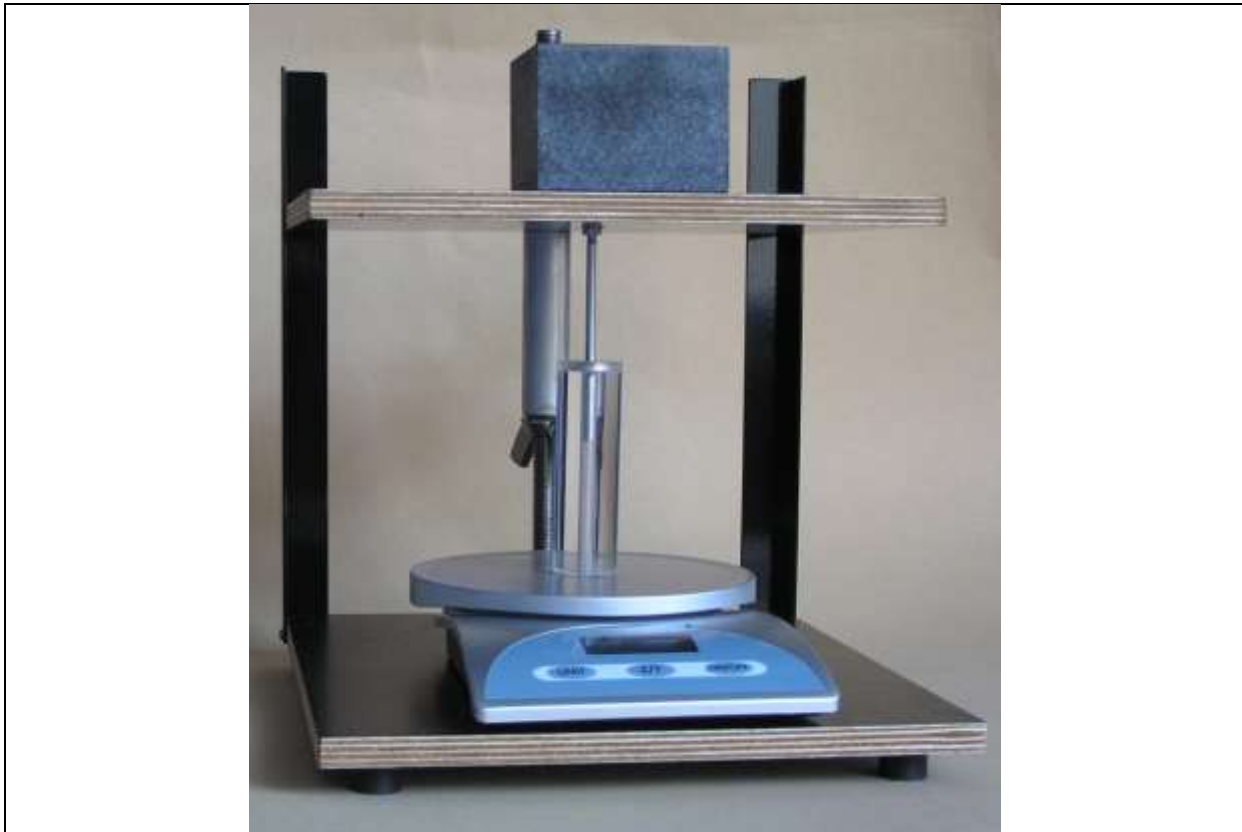


Рисунок 4. Фотография установки, используемой для измерения силы взаимодействия между магнитами.

## Задания

1. Определите качественно все возможные взаимные расположения магнитов, при которых они находятся в положении равновесия, в том случае, когда ось  $z$  (то есть ось цилиндра) расположена горизонтально, как показано на рис. 2. Зарисуйте эти положения в листе ответов, заштрихуйте полюса магнитов, как показано в листе ответов для первого устойчивого расположения магнитов. Для выполнения этого задания используйте свои руки и деревянную палочку. Обозначьте положения равновесия как устойчивые (S - stable) или неустойчивые (U - unstable). (2.5 балла)
2. Используя экспериментальную установку, проведите измерения зависимости силы взаимодействия между магнитами от координаты. Положительное направление оси  $z$  – внутрь цилиндра. Если сила, действующая на стержневой магнит, направлена вдоль положительного направления оси, то считайте ее положительной. Силу, действующую на магниты в случае, когда их магнитные моменты сонаправлены, обозначьте как  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$ , а когда противоположно направлены –  $F_{\uparrow\downarrow}(z)$ .

**Внимание! Массой стержневого магнита следует пренебречь. Используйте соображения симметрии для измерения различных частей кривых.**

Если вы используете какие-либо симметрии в функциональных зависимостях силы взаимодействия, то запишите их в листе ответов.

Запишите результаты всех измерений в листы ответов. Рядом с каждой таблицей схематично изобразите взаимное расположение магнитов (см. приведенный пример). (3.0 балла)

- Используя данные, полученные в пункте 2, на миллиметровой бумаге постройте обобщенный график зависимости  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$  для всех значений  $z > 0$ . После этого схематично изобразите графики зависимостей  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$  и  $F_{\uparrow\downarrow}(z)$  для всех (положительных и отрицательных) значений  $z$ . На каждом схематическом графике обозначьте точки устойчивого равновесия, а также нарисуйте соответствующее взаимное расположение магнитов (как в задании 1). (4.0 балла)
- Могут ли появиться дополнительные положения устойчивого равновесия, если ось системы расположить вертикально и учесть силу тяжести, действующую на стержневой магнит? Если да, то схематически изобразите эти положения в листе ответов. (0.5 балла)