

## Экспериментальный тур

### Задание 1. Физика желеобразных веществ

*Примечание.* Чтобы плавно регулировать напряжение на источнике, поверните ручку пределов напряжения в крайнее правое положение (0-15 V). Остальные положения ручки задают фиксированное значение напряжения.

*Примечание.* Проверьте, что перед включением два левых тумблера повернуты до конца по часовой стрелке, а два правых тумблера — против часовой стрелки. Для изменения напряжения пользуйтесь двумя правыми тумблерами: «COARSE» для грубого изменения и «FINE» для плавного.

В данной работе предлагается исследовать механические свойства желеобразных веществ, к которым относятся желе, гели, студни.

Встречаются и животные с желеобразными телами, например, медуза Аурелия ушастая (Moon Jelly) с прозрачным студенистым телом.

Желеобразные вещества занимают промежуточное положение между жидкими и твёрдыми веществами. Они характеризуются отсутствием текучести, способностью сохранять форму, прочностью, упругими свойствами. По многим своим механическим свойствам эти вещества уникальны. В данной работе вам предстоит измерить модуль Юнга  $E$  и скорость звука  $c$  в желатине.

В этой работе вам могут помочь следующие теоретические сведения.

**Модуль Юнга** характеризует упругие свойства вещества, определяя жёсткость различных конструкций. Например, небольшая относительная деформация  $\varepsilon$  цилиндра сечением  $S$  и высотой  $h$  под действием растягивающей (или сжимающей) силы  $F$  равна (по определению модуля Юнга):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{F}{ES}.$$

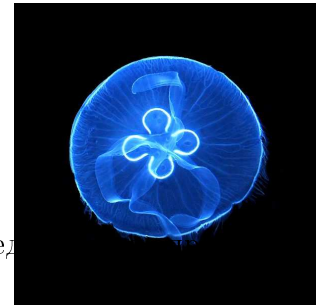
**Изгиб цилиндра.** Пусть цилиндр закреплен в вертикальном положении. Если к верхнему основанию приложить момент сил  $M$ , оно наклонится на угол  $\varphi$  к горизонту. По закону Гука при малых деформациях:

$$M = \kappa\varphi,$$

где  $\kappa$  — жёсткость цилиндра на изгиб. Она определяется модулем Юнга и геометрическими параметрами цилиндра по формуле:

$$\kappa = E \frac{\pi R^4}{4h},$$

где  $R$  — радиус цилиндра, а  $h$  — его высота.



**Кручение цилиндра.** Верхнее основание цилиндра относительно нижнего, закреплённого, основания можно повернуть на угол  $\varphi$  вокруг оси цилиндра в горизонтальной плоскости. Такая деформация называется кручением. При небольших деформациях по закону Гука момент сил  $M$ , необходимый для закручивания цилиндра, также пропорционален углу  $\varphi$ :

$$M = \chi\varphi,$$

где  $\chi \approx E\pi R^4/(6h)$  — *крутильная жёсткость* желатинового цилиндра.

**Крутильные колебания** возникают, если прикреплённый к верхнему основанию цилиндра стержень отклонить в горизонтальной плоскости от положения равновесия на некоторый угол и отпустить (нижнее основание цилиндра закреплено). Период гармонических колебаний такого Т-образного крутильного маятника определяется крутильной жёсткостью цилиндра и моментом инерции  $I$  маятника относительно оси вращения:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{\chi}}.$$

**Момент инерции** крутильного маятника (подобно массе груза для пружинного маятника) определяет его инерционность. Момент инерции зависит от распределения масс относительно оси вращения маятника. Так, момент инерции тонкого однородного стержня длиной  $l$  и массой  $m_0$  относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину, равен:

$$I_{\text{ст}} = \frac{m_0 l^2}{12}.$$

Если же на стержень нацепить небольшой грузик массой  $m$  на расстоянии  $r$  от оси вращения, то момент инерции маятника увеличится на величину момента инерции грузика  $\Delta I = I_m = mr^2$  и станет равным:

$$I = I_{\text{ст}} + mr^2.$$

Это связано с тем, что момент инерции — величина аддитивная.

**Модуль Юнга** входит в формулу для **скорости звука** в различных материалах. Если, например, по торцу тонкого стержня ударить молотком, то по стержню побежит продольная звуковая волна со скоростью  $c = \sqrt{E/\rho}$ . Так, для стали с модулем Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па и плотностью  $\rho = 7,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  эта скорость составляет  $c = \sqrt{E/\rho} \approx 5$  км/с.

### Задание

1.1. Изготовьте из желатинового цилиндра диаметром  $D = 29$  и длинной деревянной линейки Т-образный маятник (при необходимости, если недостаточно собственной «липкости» желатина, линейку можно подклеить к цилиндру, а сам цилиндр к деревянной подставке с помощью «желатинового» клея). Исследуйте желатиновый цилиндр на изгиб статическим методом. Для этого снимите зависимость  $\varphi(M)$  — изменения угла  $\varphi$  наклона линейки Т-образного маятника под действием приложенного к линейке момента сил  $M$ . Зарисуйте схему установки и опишите методику измерений.

1.2. Результаты измерений п. 1.1 представьте графически.

1.3. По результатам эксперимента п. 1.1 получите значение модуля Юнга  $E$  желатина. Оцените погрешность измерений.

2.1. Исследуйте желатиновый цилиндр Т-образного маятника на кручение динамическим методом. Для этого исследуйте зависимость изменения периода  $T_{\text{крут}}$  крутильных колебаний маятника от изменения момента его инерции. Зарисуйте схему установки и опишите методику измерений.

2.2. Результаты измерений п. 2.1 представьте графически.

2.3. По результатам измерений п. 2.1 получите значение модуля Юнга  $E$  желатина. Оцените погрешность измерений.

3.1. Исследуя поведение тонких ( $d = 19,5$  мм) желатиновых цилиндров на вибрирующей подставке, определите скорость продольных звуковых волн  $c_3$  в желатине. Желатиновые цилиндры выдавливаются из шприцов с помощью поршня. Для приготовления цилиндров необходимой длины используйте канцелярский нож. Зарисуйте схему установки и опишите методику измерений.

**Внимание:** не подавайте на электромоторчик напряжение, превышающее 9,5 В.

*Совет:* отрезать нужную длину образца лучше по мере выдавливания цилиндра, прижимая нож к торцу шприца.

*Подсказка:* вибрирующая подставка может быть реализована с помощью линейки с закреплённым на ней электромоторчиком.

3.2. Сравните полученное значение  $c_3$  с теоретическим, рассчитанным по формуле  $c_T = \sqrt{E/\rho}$ , где  $E$  — модуль Юнга, определённый статическим или динамическим методом. Плотность желатина  $\rho = 1,05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ .

4. С помощью пластиковой ложечки съешьте фруктовое желе. Запишите свои впечатления. Зарисовывать схему установки, описывать методику поедания, определять модуль Юнга и делать оценку погрешности в этом пункте не надо. Ашларыгыз тэмле булсын!

*Примечание.* Этот пункт можно выполнить в любой момент.

**Оборудование.** Широкий шприц с внутренним диаметром  $D = 29$  мм, деревянная подставка, 3 маленьких шприца с внутренним диаметром  $d = 19,5$  мм, электромоторчик постоянного тока с эксцентриком, закреплённый на деревянной линейке, регулируемый источник постоянного тока, стробоскопический тахометр, секундомер, деревянная линейка, канцелярский нож, 2 одинаковые большие гайки массой  $m_T = 9,75$  г каждая, канцелярская клипса, фруктовое желе (яблочное, вишнёвое или клубничное), пластиковая (одноразовая) ложечка. Клей (расплавленный желатин) по требованию.

## Задание 2. Магнитное взаимодействие

Простейший электрический диполь представляет собой систему из двух одинаковых по величине и противоположных по знаку точечных электрических зарядов, смещённых друг относительно друга на вектор  $\vec{l}$ , проведённый от отрицательного ( $-q$ ) к положительному заряду ( $+q$ ). Дипольный момент — это векторная величина, равная:

$$\vec{P} = q\vec{l}.$$

Диполь называют точечным (или элементарным), если его размеры малы по сравнению с расстоянием  $r$  до диполя:  $l \ll r$ .

Эксперимент и теория показывают, что картина силовых линий напряжённости  $\vec{E}$  поля электрического точечного диполя  $\vec{P}$  не отличается от картины силовых линий магнитной индукции  $\vec{B}$  магнитного точечного диполя  $\vec{P}_m$  (маленького постоянного магнетика или виточка с током). Это означает, что, получив законы взаимодействия электрических точечных диполей и заменив в формулах  $\vec{P}$  на  $\vec{P}_m$ , а константу электрического взаимодействия  $k_\varepsilon = (4\pi\varepsilon_0)^{-1} = 9 \cdot 10^9$  м/Ф — на константу магнитного взаимодействия  $k_\mu = \mu_0/(4\pi) = 10^{-7}$  Гн/м, мы сможем рассчитать поля и законы взаимодействия магнитных диполей. Вектор магнитного момента  $\vec{P}_m$  постоянного магнита направлен от южного к северному полюсу (для витка с током это направление соответствует правилу буравчика).

### Магнитный шар

Магнитные моменты неодимовых магнитов в нашей работе не меняются под действием внешнего магнитного поля, то есть являются магнитожёсткими.

Поле неодимового шара радиусом  $R$  на расстояниях  $r \geq R$  совпадает с полем точечного магнитного диполя  $\vec{P}_m$ , равного магнитному моменту шара и расположенного в его центре.

Неодимовые шары взаимодействуют как жёсткие точечные диполи, расположенные в центрах шаров.

### Железный шар в магнитном поле

Железный шар в нашей работе в отсутствие магнитных полей практически не намагничен и, соответственно, не несёт никакого магнитного момента. В магнитном поле он намагничивается, приобретая магнитный момент пропорциональный индукции магнитного поля  $B$ :

$$\vec{P}_{\text{ш}} = \frac{4\pi\mu - 1}{\mu_0\mu + 2} B \vec{R}^3,$$

где  $R$  — радиус шара, а  $\mu$  — магнитная проницаемость железа. В результате возникает взаимодействие между наведённым магнитным моментом шара  $\vec{P}_{\text{ш}}$  и магнитным моментом  $\vec{P}_m$  постоянного магнита.

### Задание

1.1 Снимите зависимость силы  $F(\theta)$  взаимодействия двух неодимовых шаров от угла  $\theta$  между их магнитными моментами с шагом в  $10^\circ$  в двух случаях:

а) магнитный момент  $\vec{P}_m$  одного из шаров (неподвижного) направлен вдоль прямой, соединяющей центры шаров.

б) магнитный момент  $\vec{P}_m$  одного из шаров (неподвижного) перпендикулярен прямой, соединяющей центры шаров.

Опишите установку и методику измерений.

1.2. Постройте зависимости  $F_a(\theta)$  и  $F_b(\theta)$  на одном графике.

1.3. Постройте график  $\gamma(\theta) = F_a(\theta)/F_b(\theta)$ .

2. Получите теоретическое значение отношения  $\gamma(\theta)$  для значений  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ .

3. Определите максимальную силу  $F_{\text{сц}}$  сцепления соприкасающихся магнитных шаров.

4. Считая, что неодимовые шары намагничены одинаково, используя экспериментальные данные, рассчитайте их магнитные моменты  $P_m$ .

5. Определите индукцию  $B_{\text{п}}$  магнитного поля на полюсе неодимового шара.

6. Снимите зависимость силы  $F(\theta)$  взаимодействия неодимового шара с железным от угла  $\theta$  между магнитным моментом  $\vec{P}_m$  постоянного магнита и линией, соединяющей центры шаров. Постройте график этой зависимости. Определите отношение  $k_3 = F_{\text{max}}/F_{\text{min}}$  сил взаимодействия на графике 1.2.

*Примечание.* Диапазон значений силы для этой зависимости может существенно отличаться от уже выбранного масштаба для графика 1.2. В таком случае вы можете выбрать дополнительную ось ординат (Y), отметив её с правой стороны графика, со своим масштабом и смещением. Укажите, к какой из осей ординат какая зависимость относится.

7. Считая, что железный шар находится в однородном поле, равном внешнему полю в его центре, сделайте теоретическую оценку отношения  $k_T = F_{\text{max}}/F_{\text{min}}$  сил взаимодействия магнита с железным шаром. Сравните теоретическую оценку с экспериментальным значением  $k_3$ , полученным в предыдущем пункте.

8. Оцените максимальную величину  $P_{\text{ш}}$  наведённого магнитного момента железного шара при расстоянии между центрами шаров  $r \approx 5$  см.

9. Оцените магнитную проницаемость материала, из которого изготовлен железный шар.

**Оборудование.** Два одинаковых неодимовых магнитных шара диаметром  $d = 20$  мм (один полюс помечен), железный шар диаметром  $d = 20$  мм, штатив, устройства для крепления и поворота шаров, шкала для отсчёта угла поворота магнита, электронные весы, деревянная линейка, перманентный маркер по требованию.