

## Измерение массы (10 б.)

В этой экспериментальной задаче делается попытка измерения массы. Далее мы измеряем массу, используя резонансные кривые гармонического осциллятора.

### Экспериментальная установка

Ниже приведен список оборудования (рис. 1). Количество элементов указано в квадратных скобках, если их два или более.

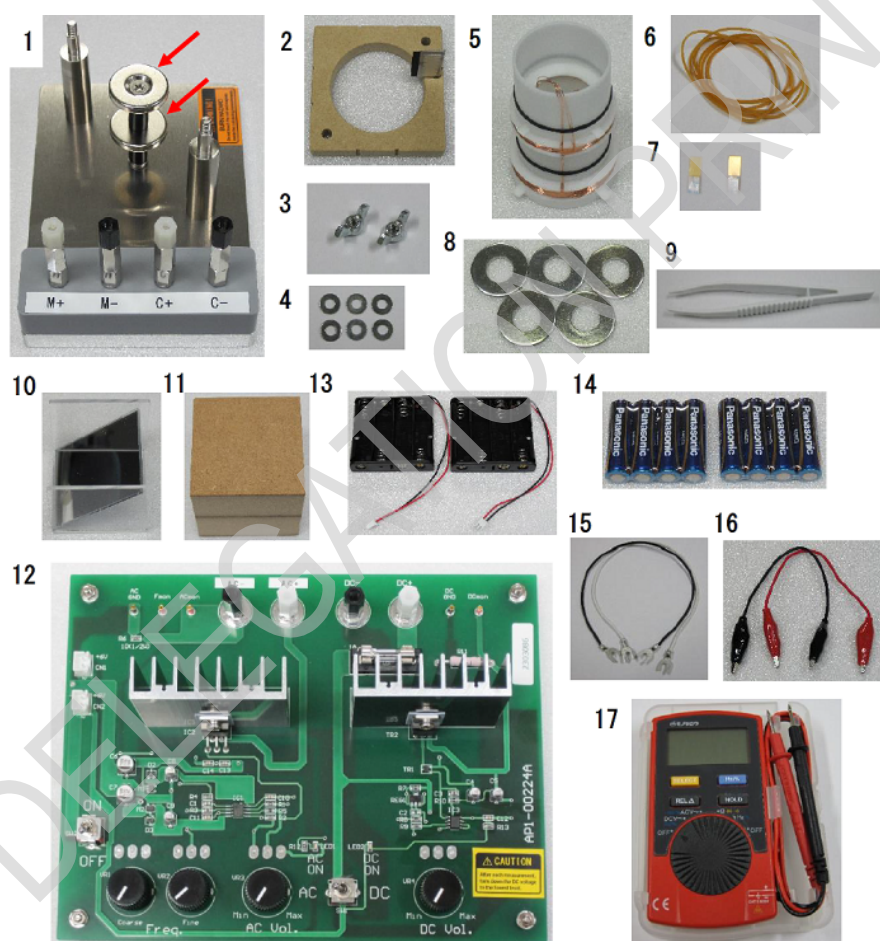


Рисунок 1: Экспериментальное оборудование.

1. Монтажная пластина:

**Примечание:** блок магнитов на пластине создает не зависящее от высоты однородное радиальное магнитное поле. Гарантируется, что это верно вблизи центра магнитной пары в области  $\pm 3$  мм по высоте.

2. Опора осциллятора
3. Гайка [2]:

**Примечание:** Удалите 2 и 3 из 1 в полученной упаковке для использования.

4. Шайба [6]
5. Цилиндрический осциллятор
6. Резинка [6]
7. Указатель (с клейкой частью) [2]
8. Грузик [5]
9. Пинцет
10. Зеркало
11. Подставка
12. Блок питания (БП):

С двумя режимами: DC (постоянный ток) и AC (переменный ток).

В режиме DC он работает как источник постоянного тока. Ручка с надписью «DC Vol» регулирует ток. Величина тока получается из напряжения между «DCtop» и «DC GND» с использованием коэффициента преобразования 1.00 A/V.

В режиме AC он работает как источник напряжения с фиксированной амплитудой.

Поверните «AC Vol», чтобы отрегулировать напряжение. Переменный ток получается из напряжения между «ACtop» и «AC GND» с использованием коэффициента преобразования 0.106 A/V. Частота (Freq.) настраивается с помощью ручек грубой (Coarse) и точной (Fine) настройки.

13. Держатель батареек [2]
14. Батарейка [8]
15. Провод с U-образным наконечником [2]
16. Провод с зажимом типа «крокодил» [2]
17. Мультиметр:

Поверните ручку, чтобы выбрать соответствующий режим измерения: «DCV», «ACV» и «Hz». Обратите внимание, что отображаемое значение напряжения переменного тока указывает среднеквадратичное значение (RMS), т. е. действующее значение.

### Используемая модель

Рис. 2 представляет собой упрощенную модель экспериментальной установки. По сути, это осциллятор (груз) на пружине с вынуждающей силой.

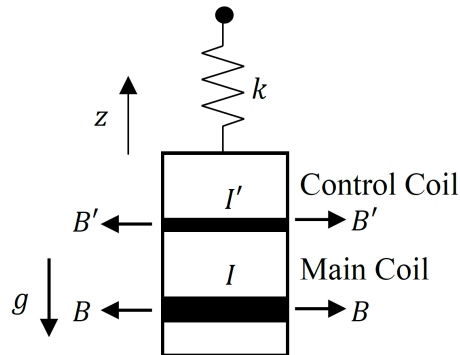


Рисунок 2: Модель гармонического осциллятора.

Соответствующие параметры модели:

- $M$ : масса (цилиндрического) осциллятора
- $m$ : масса грузика
- $N$ : количество грузиков
- $g$ : ускорение свободного падения
- $k$ : эффективная жесткость пружины, относящаяся к вертикальному движению
- $z$ : высота осциллятора (или смещение)
- $z_e$ : высота осциллятора, на которой устанавливается баланс сил в отсутствии гравитационных и электромагнитных сил
- $B(B')$ : магнитное поле, приложенное к основной (контрольной) катушке
- $L(L')$ : длина токоведущего провода основной (контрольной) катушки
- $I(I')$ : ток, протекающий через основную (контрольную) катушку
- $\alpha$ : положительный коэффициент силы сопротивления

Уравнение движения имеет вид

$$(M + Nm) \frac{d^2 z}{dt^2} = -(M + Nm)g - k(z - z_e) + BLI + B'L'I' - \alpha \frac{dz}{dt}. \quad (1)$$

### Сборка осциллятора

1. Снимите опору осциллятора с монтажной пластины. Оберните четыре резинки вокруг неё в виде сетки (см. рис. 3(a)).
2. Вставьте цилиндрический осциллятор со стороны шкалы в квадратное отверстие между перекрещенными резинками. Разместите выводы проводов не с той стороны цилиндра, где находится шкала. (рис. 3(b)).
3. Осциллятор предназначен для подвешивания на опоре с помощью четырех резинок и восьми маленьких крючков (обведены красным на рис. 3(c)). При правильной сборке одна петля резинки образует усеченный ромб с двумя крючками выше и ниже уровня поддержки на виде сбоку.

**Примечание:** В этом эксперименте мы можем предположить, что эффективная сила, создаваемая резинками, подчиняется закону Гука.

4. Прикрепите опору осциллятора к монтажной пластине двумя гайками. Шкала должна стоять вертикально сверху, а не со стороны крепежных стоек (рис. 3(d)).
5. Поставьте осциллятор вертикально. Его ось должна быть выровнена по вертикали и совмещена с осью магнитного блока.
6. Основная катушка в состоянии покоя должна располагаться посередине двух магнитов. Это можно проверить измерив расстояние между верхней поверхностью нижнего магнита и нижней поверхностью осциллятора от 3 до 5 мм (рис. 3(e)). Красная стрелка. Если оно маленькое, поместите шайбы между стойкой монтажной пластины и опорой (рис. 3(f), красные стрелки). Если оно большое, поверните стойку магнита, чтобы снять ее, и добавьте шайбу под стойку (рис. 3(f), желтая стрелка).
7. Обнажите липкую поверхность двустороннего скотча на указателе (рис. 4(a)). Приклейте указатель к маленькому выступу на осцилляторе, чтобы измерять высоту (рис. 4(b)).
8. Установите зеркало на подставку (рис. 4(c)). Обеспечьте четкую видимость указателя сверху через зеркало (рис. 4(d), красный кружок).

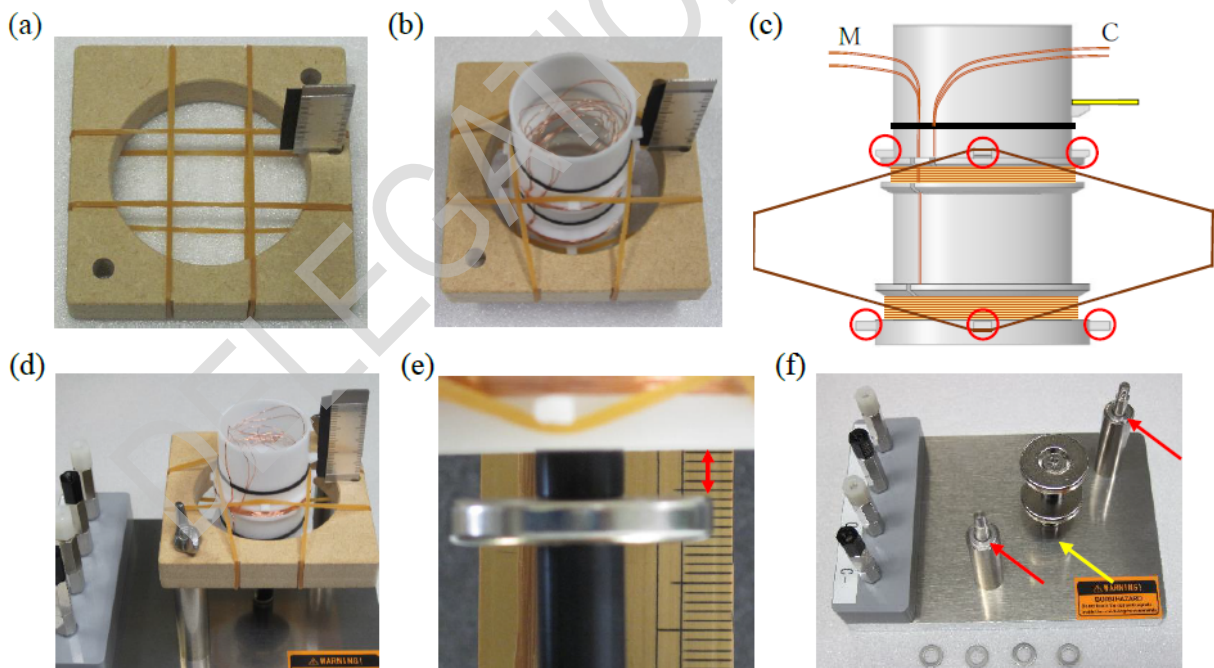


Рисунок 3: Сборка осциллятора.

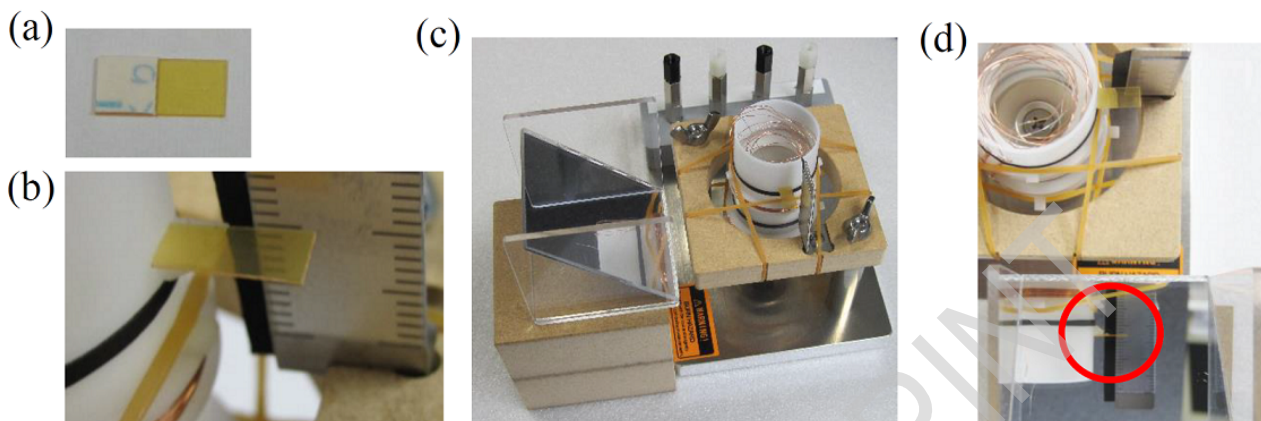


Рисунок 4: Установка указателя и зеркала.

### Подключение проводов

1. Найдите и осторожно потяните соответствующую пару проводов, ведущих к основной (M) и контрольной (C) катушкам (рис. 3(c)) из внутренности осциллятора (рис. 3(b)). Проверьте, зачищена ли изоляция со свободных концов.
2. Ослабьте гайки на зажимных стойках M+ и M-, чтобы получились зазоры. Используйте нижние зазоры для проводов от катушки (рис. 5(a), (b)). Проверка полярности будет ниже.
3. Таким же образом соедините клеммы с маркировкой C+ и C-. (Допускается любая полярность.)
4. Поместите батарейки в держатели батареек и соедините их с БП (CN1, CN2) (рис. 5(c)).
5. Соедините клеммы M+ и M- с выходами постоянного тока БП (DC+ и DC-) с помощью проводов с U-образными клеммами.
6. Включите режим DC и включите БП.
7. Вращайте ручку «DC Vol.» для регулирования тока. Посмотрите, смещается ли осциллятор вверх на 2 мм или больше.

Если вниз - поменяйте полярность и повторите заново.

**Предостережение: Горячие детали. Остерегайтесь катушек и магнитов. Уменьшите величину постоянного тока до минимума в конце каждого шага.**

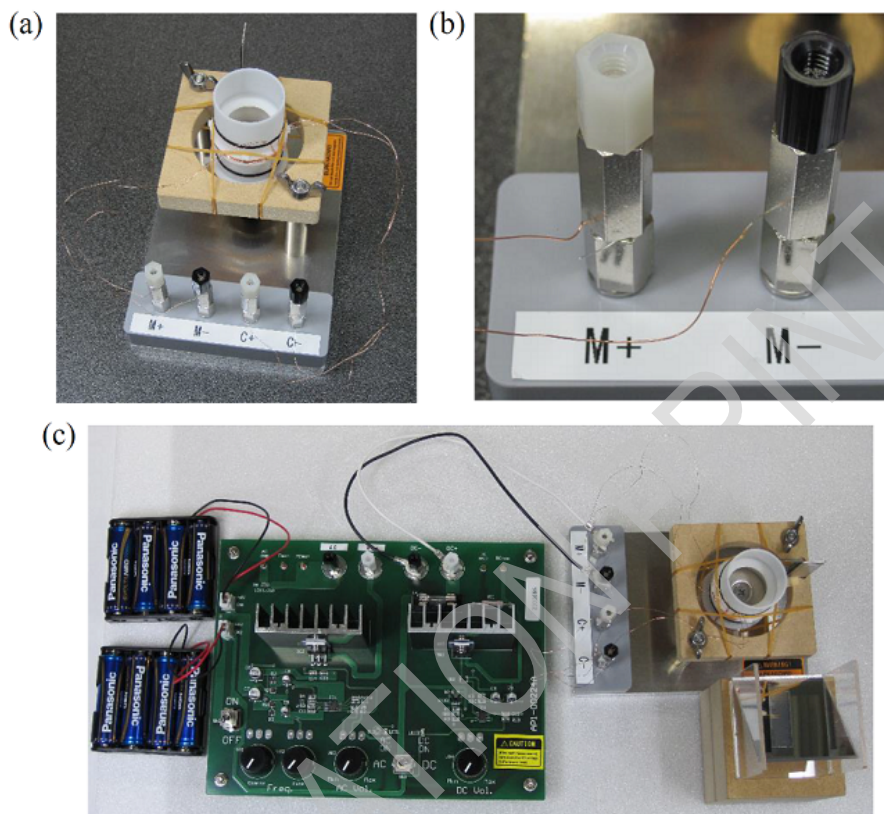


Рис. 5: (a), (b) Подсоединенные клеммы, (c) Вся установка, включая блок питания и аккумуляторы, подключена.

### Проверка колебаний

1. Подсоедините клеммы M+ и M- к выходу переменного тока (AC+ и AC-) с помощью проводов с U-образными клеммами.
2. Выберите режим AC и включите БП.
3. Поверните ручку с надписью «AC Vol.» по часовой стрелке, начиная с минимума до четверти оборота. Настройте частоту с помощью ручки управления «Coarse», чтобы начать колебание.
4. Отрегулируйте выходное напряжение переменного тока и частоту так, чтобы амплитуда колебаний была приблизительно  $A = 3$  мм (Рис.6). Если колебания нестабильны, отрегулируйте их настройкой генератора.
5. Отсоедините M+ и M- и подключите клеммы C+ и C- к выходу переменного тока.
6. Включите блок питания и снова проверьте колебания.



Рисунок 6: Колебания, наблюдаемые через зеркало.

## Часть А. Закон Гука и электромагнитные силы (2,4 б.)

**A.1** Схематично нарисуйте в бланке ответов силовые линии магнитного поля, создаваемого двумя одинаковыми дисковыми магнитами с северными полюсами, обращенными друг к другу. 0.4 pt

**A.2** Подсоедините контакты М+ и М- к выходу постоянного тока. Соедините мультиметр с выводами для считывания показаний в режиме DC при помощи проводов с разъемами типа «крокодил» (рис. 7). Считайте высоту осциллятора  $z$  при нулевой силе тока без грузиков, т.е.,  $N = 0$ . Запишите результат в **Таблицу А.2**. Поместите груз ( $N = 1$ ) на круглую полку внутри цилиндра, и запишите высоту  $z$  при которой осциллятор находится в покое. Чему равно значение силы тока  $I$ , протекающего через основную катушку, чтобы вернуть осциллятор назад, в положение без грузиков? Повторите измерения увеличивая  $N$  до 5 и заполните **Таблицу А.2**. 0.6 pt

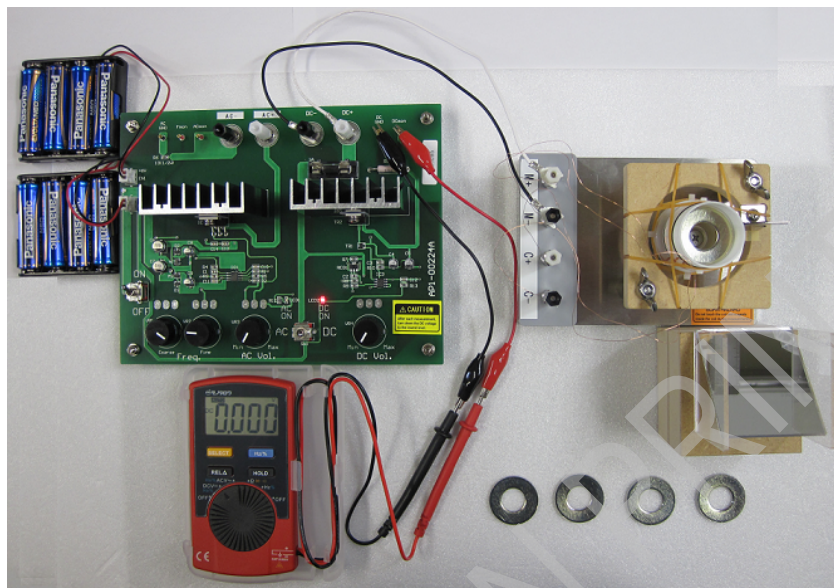


Рис. 7: Подключенные измерительные провода мультиметра. Осциллятор с грузом справа.

**A.3** Постройте график зависимости высоты  $z$  от количества грузиков  $N$ . По графику определите коэффициент наклона  $a = \frac{\Delta z}{\Delta N}$  и оцените его погрешность. 0.7 pt

**A.4** Постройте график зависимости силы тока  $I$  от количества грузиков  $N$ . Из графика получите значение  $b$ , определяемое как  $b = \frac{I}{N}$  и оцените погрешность. 0.7 pt

### Часть Б. ЭДС индукции (3,0 б.)

**B.1** Предположим, что переменный ток определенной частоты  $f$  подается на контрольную катушку без груза. Высота осциллятора меняется со временем по синусоидальному закону 0.2 pt

$$z - z_0 = A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

где  $z_0$  – высота положения равновесия,  $A$  – амплитуда колебаний. Запишите выражение для амплитуды ЭДС индукции  $V$  в основной катушке.



<b>B.2</b>	Подсоедините контакты С+ и С- к выходу переменного тока. Подсоедините мультиметр к выводам «Ftop» и «AC GND», чтобы считывать частоту. Отрегулируйте как частоту переменного тока, так и выходное напряжение, чтобы получить устойчивые колебания соответствующей амплитуды. Измерьте частоту $f_B$ и запишите ее в лист ответов. Соедините мультиметр с выводами М+ и М-. При фиксированной частоте изменяйте выходное напряжение. Снимите зависимость амплитуды колебаний $A$ от амплитуды напряжения $V'$ ( $V' = V/\sqrt{2}$ ), индуцированного в основной катушке. Заполните <b>Таблицу В.2</b> соответствующим образом.	0.5 pt
<b>B.3</b>	Постройте график зависимости напряжения $V'$ от амплитуды $A$ . По графику получите значение $c$ определенное как $c = \frac{V'}{A}$ и оцените погрешность.	0.7 pt
<b>B.4</b>	Вычислите величину $BL$ и её погрешность используя результаты пункта <b>B.3</b> .	0.4 pt
<b>B.5</b>	Используя результаты пунктов <b>A.3</b> , <b>A.4</b> , и <b>B.4</b> , вычислите $m$ и $k$ и оцените погрешности. Если потребуется, используйте значение ускорения свободного падения $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ .	1.2 pt

### Часть С. Резонансная частота, зависящая от массы (2,3 б.)

Для следующих экспериментов используйте основную катушку для возбуждения осциллятора. Измените подключение соответствующим образом.

<b>C.1</b>	Запишите выражение для резонансной частоты $f$ осциллятора с $N$ грузиками. Используйте коэффициент жесткости $k'$ при движении, который отличается от $k$ .	0.2 pt
<b>C.2</b>	Запитайте осциллятор, подключив источник переменного тока к основной катушке. Измерьте резонансную частоту $f$ , для разных значений $N = 0$ до 5, и запишите значения в <b>Таблицу С.2</b> . Избегайте подпрыгивания грузиков.	0.5 pt
<b>C.3</b>	Используя результаты пункта <b>C.2</b> , постройте график, из которого можно будет получить величины $\frac{M}{k'}$ и $\frac{m}{k'}$ . Запишите полученные значения в лист ответов. Если вам необходимо рассчитать какие-либо дополнительные величины, используйте пустые ячейки <b>Таблицы С.2</b> .	1.0 pt
<b>C.4</b>	Чему равна величина $\frac{M}{m}$ ? Вычислите $M$ и $k'$ используя результаты пункта <b>B.5</b> .	0.6 pt

### Часть D. Резонансные характеристики (2,3 б.)

Если на осциллятор без грузиков действует периодическая сила амплитудой  $F_{AC}$  и частотой  $f$ , то

амплитуда осцилляций  $A$  хорошо описывается резонансной кривой:

$$A(f) = \frac{F_{AC}}{8\pi^2 M f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{(f - f_0)^2 + (\Delta f)^2}}. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta f = \frac{\alpha}{4\pi M}$ . Данное выражение выполняется для частот, для которых  $|f - f_0| \ll f_0$ .

В этой части будет использована резонансная кривая для получения массы осциллятора,  $M$ , и будем считать, что выражение (3) всегда применимо.

**D.1** Запитайте осциллятор, подключая источник переменного тока к основной катушке. Подстройте частоту и выходное напряжение для получения резонанса приемлемой амплитуды. 0.4 pt  
Измерьте и запишите напряжение  $V'_{AC}$  между выводами "ACtop" и "AC GND" в лист ответов.  
Используя результаты пункта **B.4** и коэффициент 0.106 A/V, вычислите силу  $F_{AC}$  периодической электромагнитной силы, действующей на осциллятор.

**D.2** Запишите в **Таблицу D.2** амплитуду  $A$  в зависимости от частоты осциллятора  $f$ . Амплитуда вынуждающей силы  $F_{AC}$  должна поддерживаться постоянной в ходе всего эксперимента. 0.9 pt  
Постройте график зависимости амплитуды  $A$  от частоты  $f$ .

**D.3** Используя результаты **D.1** и **D.2**, получите  $M$ . 1.0 pt