



Республиканская физическая олимпиада 2025 года (Заключительный этап)

Теоретический тур

11 класс.

Внимание! Прочтите в первую очередь.

1. Полный комплект состоит из 3 заданий. Для вашего удобства вопросы, на которые Вам необходимо ответить, помещены в рамки.
2. Решения задач выполняйте на отдельных чистых рабочих листах. Самостоятельно разделите их на черновики и чистовые листы. Рекомендуем сначала решать в черновике, а затем красиво оформить решение на чистовых листах. Решение каждого задания начинайте с нового чистового листа. В решении приведите рисунки (в некоторых заданиях рисунки необходимы, даже в том случае, когда это не оговорено в условии), исходные уравнения с кратким обоснованием, решения уравнений (комментарии к математическим выкладкам не требуются), окончательные результаты. Окончательные решения обязательно занесите в Листы ответов. Чистовые листы пронумеруйте. Черновые листы после окончания работы перечеркните. **Черновики проверяться не будут!**
3. Листы ответов содержат отдельные разделы в соответствии с пунктами полученных Вами заданий. Конечные формулы и требуемые численные значения занесите в соответствующие выделенные поля. Если по условию заданий от Вас требуется построение графика, используйте подготовленные бланки в Листах ответов, не забудьте подписать и оцифровать оси координат.
4. Все ваши работы сканируются, поэтому пишите только на одной стороне листа. Подписывать рабочие листы и листы ответов запрещается.
5. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор.
6. После окончания работы сложите листы в следующем порядке: листы ответов; пронумерованные чистовые листы; перечеркнутые черновики.
7. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач, обращайтесь к организаторам олимпиады.



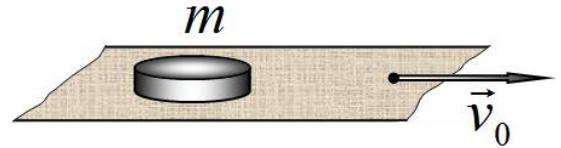
Пакет содержит:

- титульный лист (1 стр.);
- условия 3 теоретических заданий (7 стр.);
- лист ответов (7)

Задание 1. Потери энергии

Задача 1.1

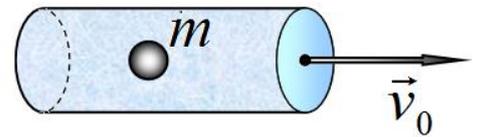
Двигатель тянет горизонтальную ленту транспортера с постоянной скоростью v_0 , н зависящей от того, какой груз находится на ленте. На ленту кладут (без начальной скорости) массивный диск массы m . Коэффициент трения диска о ленту равен μ .



1.1 Найдите количество теплоты, которое выделится за время разгона диска до скорости ленты.

Задача 1.2

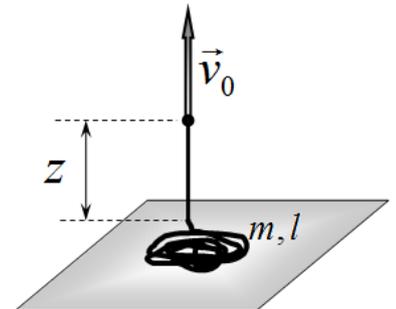
Жидкость прокачивают по горизонтальной трубе с постоянной скоростью v_0 . Внутри трубы попадает небольшой шарик массы m . Со стороны жидкости на шарик действует сила вязкого трения пропорциональная относительной скорости движения шарика $\vec{F} = -\beta\vec{v}_{\text{отн}}$. Силой вязкого трения жидкости о стенки трубы можно пренебречь.



1.2 Найдите количество теплоты, которое выделится за время разгона шарика до скорости жидкости.

Задача 1.3

На горизонтальной поверхности «кучкой» лежит гибкая цепочка. Длина цепочки равна l , ее масса m . Цепочку начинаю поднимать вертикально вверх за один из ее концов с постоянной скоростью \vec{v}_0 .



1.3.1 Постройте график зависимость силы F , прикладываемой к цепочке, от высоты z поднятой части цепочки.

1.3.2 Рассчитайте количество теплоты, которое выделится в цепочке до отрыва цепочки от стола.



Задание 2. Взаимодействия цилиндрических магнитов

Описание магнитных полей и магнитных взаимодействий является математически более сложной задачей, чем описание электростатических взаимодействий. Во многом это связано с отсутствием точечных магнитных зарядов, из-за чего простейшим источником магнитного поля является магнитный диполь. Однако, во многих задачах можно формально (но математически корректно) ввести точечные магнитные заряды, не забывая при этом, что реально существующие источники магнитного поля имеют нулевой суммарный магнитный заряд. Такой подход используется в данном задании при расчете магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами, и характеристик их взаимодействия.

Теоретическое введение.

Согласно современным представлениям магнитное поле постоянных магнитов создается токами намагничивания, протекающими по поверхности намагниченного тела (эта идея первоначально была сформулирована А.М. Ампером и часто называется гипотезой Ампера).

Таким образом, поле небольшого цилиндрического магнита эквивалентно полю кругового тока. В качестве основной характеристики витка с током выступает магнитный момент, который равен

$$p_m = IS, \quad (1)$$

где I - сила тока в контуре, S - площадь этого контура.

Альтернативный подход к описанию поля цилиндрического магнита является рассмотрение поля магнитного диполя – частицы, состоящей из двух точечных противоположных магнитных зарядов ($+q_m$ и $-q_m$), находящихся на малом расстоянии a друг от друга. Магнитный момент в этом случае определяется как

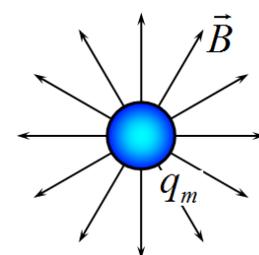
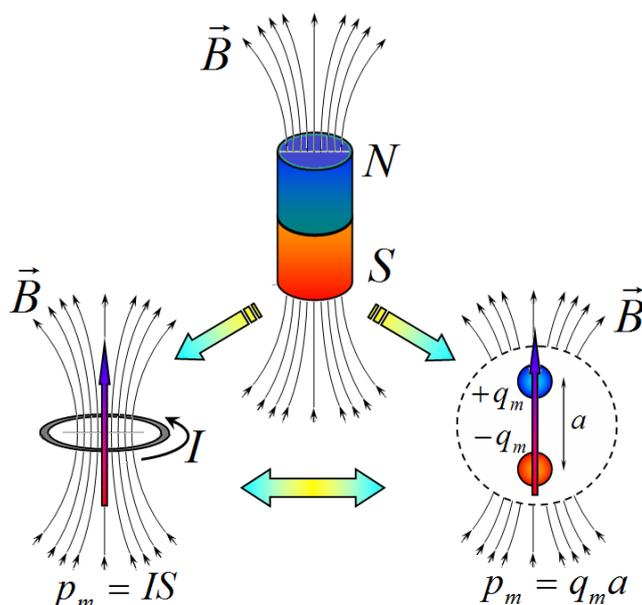
$$p_m = q_m a, \quad (2)$$

Отметим, что оба способа описания магнитных полей справедливы для точек, расстояние до которых от источников (магнита, кольца с током, магнитного диполя) значительно больше размеров самих источников. Считайте, что это условие выполняется во всех пунктах данной задачи.

Точечный магнитный заряд q_m создает центральное магнитное поле, модуль вектора индукции которого определяется по закону, аналогичному закону Кулона для электростатических полей

$$B = \frac{\mu_0 q_m}{4\pi R^2}, \quad (3)$$

здесь R - расстояние от точечного заряда, до точки, в которой рассчитывается поле, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$ - магнитная постоянная.



На точечный магнитный заряд q_m со стороны магнитного поля с индукцией \vec{B} действует сила, равная

$$\vec{F} = q_m \vec{B} \quad (3)$$

Основной характеристикой постоянных магнитов является остаточная намагниченность M_R , которая определяется как магнитный момент единицы объема $M_R = \frac{p_m}{\Delta V}$.

Эта величина обычно указывается в паспорте магнита. Вместо остаточной намагниченности также приводят величину $B_R = \mu_0 M_R$, которая называется остаточная индукция (т.е. индукция магнитного поля внутри магнита).

Еще раз подчеркнем, в настоящее время магнитных зарядов не обнаружена, поэтому величины магнитных зарядов q_m не должны входить в конечные результаты, которые должны выражаться через реальные характеристики магнитов – их магнитный момент p_m и намагниченность M .

Часть 1. Характеристики магнита.

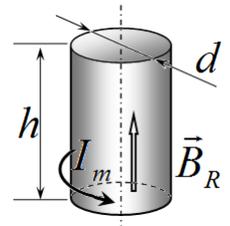
В данной задаче рассматривается постоянный цилиндрический неодимовый магнит со следующими характеристиками:

диаметр магнита $d = 4,0 \text{ мм}$;

высота магнита $h = 10,0 \text{ мм}$;

остаточная индукция поля магнита $B_R = 1,4 \text{ Тл}$ и направлена вдоль оси магнита;

плотность материала магнита $\rho_{Nd} = 7,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.



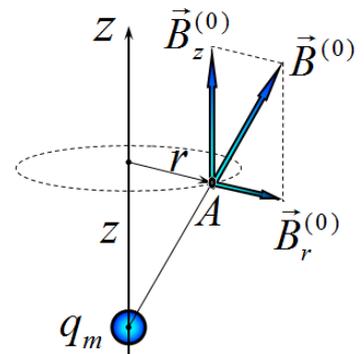
1.1 Рассчитайте массу магнита m .

1.2 Рассчитайте магнитный момент магнита p_m .

1.3 Рассчитайте силу тока намагничивания, текущего по боковой поверхности магнита I_m .

Часть 2. Магнитное поле магнита.

Рассмотрите магнитное поле, создаваемое точечным магнитным зарядом q_m . Точечный заряд находится в начале отсчета оси z . Положение произвольной точки задается координатой z и расстоянием до этой оси r . В этом случае вектор индукции магнитного поля $\vec{B}^{(0)}$ разумно разложить на две компоненты: осевую $\vec{B}_z^{(0)}$, направленную параллельно оси z ; радиальную $\vec{B}_r^{(0)}$, направленную перпендикулярно оси.

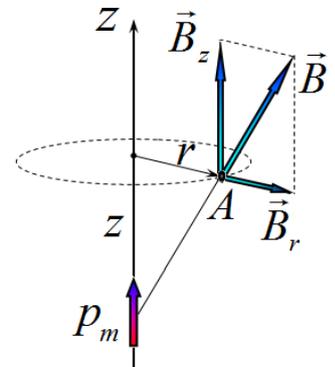


2.1 Запишите формулы для осевой $B_z^{(0)}(z, r)$ и радиальной $B_r^{(0)}(z, r)$ компонент вектора индукции поля точечного заряда, как функции координат точки (z, r) .

Теперь Вам необходимо рассмотреть магнитное поле, создаваемое описанным цилиндрическим магнитом. Для расчета этого поля можно считать, что оно совпадает с магнитным полем магнитного диполя.

2.2 Нарисуйте схематически картину силовых линий магнитного поля, создаваемого магнитным диполем (цилиндрическим магнитом).

Пусть в начале оси z находится магнитный диполь с магнитным моментом p_m , направленным вдоль оси z . Положение произвольной точки A , как и ранее, задается координатами (z, r) .



2.3 Найдите зависимость осевой компоненты индукции поля магнитного диполя $B_z(z, r)$, от координат точки (z, r) .

2.4 Постройте схематический график зависимости осевой компоненты вектора индукции $B_z(z_0, r)$ от координаты r при некотором фиксированном значении координаты $z_0 > 0$.

2.5 Найдите зависимость индукции поля на оси z в зависимости от координаты z - $B_z(z)$.

2.6 Найдите зависимость радиальной компоненты индукции поля магнитного диполя $B_r(z, r)$, от координат точки (z, r) .

2.7 Постройте схематический график зависимости радиальной компоненты вектора индукции $B_r(z, r_0)$ от координаты z при некотором фиксированном значении координаты $r_0 > 0$.

2.8 Найдите значения модуля координаты $z = b$, при котором модуль функции $B_r(z, r_0)$ принимает максимальные значения $B_{r, \max}$. Найдите, чему равно это максимальное значение.

Примечания.

1. Вы можете построить схематические графики, даже если вам не удалось получить явные функциональные зависимости – это будет оценено!

2. Для облегчения вашей работы дадим математическую подсказку. Если величина a мала, то для расчета поля диполя Вы можете использовать следующее приближение, справедливое для любой функции

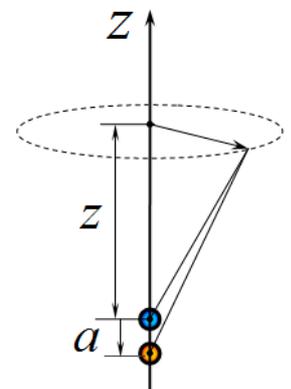
$$F(z+a) \approx F(z) + F'(z) \cdot a \quad (4)$$

где $F'(z)$ - производная функции $F(z)$, вычисленная в точке z .

3. При необходимости Вы можете использовать приближенную формулу

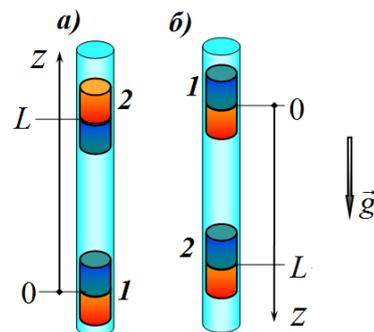
$$(1+x)^\gamma \approx 1 + \gamma x, \quad (5)$$

справедливую при $x \ll 1$ и любых степенях γ .



Часть 3. Притяжение и отталкивание.

Два одинаковых цилиндрических магнита помещены в вертикальную стеклянную трубку. Магнит 1 закреплен, магнит 2 может свободно двигаться вдоль трубки. Расстояние между магнитами можно считать значительно больше размеров магнитов. Ускорение свободного падения считать равным $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$. Ответы выразите через магнитный момент магнитов p_m и их массу m .



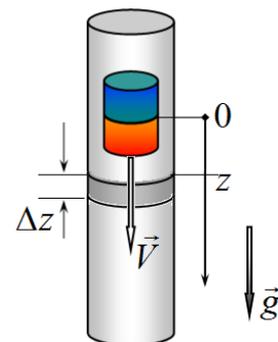
- 3.1** Найдите зависимость силы магнитного взаимодействия между магнитами, как функцию расстояния z между ними.
- 3.2** Найдите, при каком расстоянии между магнитами L , магнит 2 может находиться в равновесии. Рассмотрите два случая, а) и б) ориентации магнитов, показанные на рисунке.
- 3.3** Укажите, какой из экспериментов, а) или б) может быть продемонстрирован экспериментально. Ответ кратко обоснуйте.
- 3.4** Рассчитайте численное значение равновесного расстояния L , для магнитов, параметры которого приведены в Части 1.

Часть 4. Магнитная вязкость – токи Фуко.

Цилиндрический магнит помещают внутрь длинной вертикальной тонкостенной алюминиевой трубки. Внутренний радиус трубки равен $r_0 = 3,0 \text{ мм}$, толщина стенок равна $h_0 = 0,30 \text{ мм}$. Удельное электрическое сопротивление алюминия равно $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

По-прежнему, считаем массу магнита m и его магнитный момент p_m известными.

Пусть скорость движения магнита постоянна и равна V . Выделим на стенке трубки тонкий слой толщиной Δz , находящийся на расстоянии z от середины магнита. В пп. 4.1 – 4.4 ответы выразите через параметры магнитного поля b и $B_{r \max}$, найденные в п. 2.8.

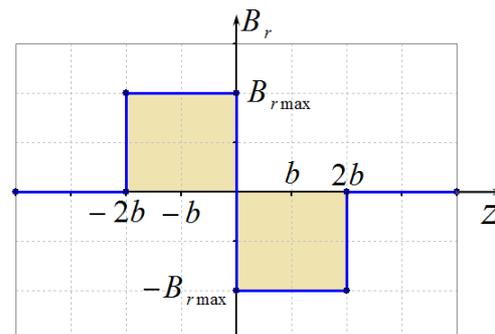


- 4.1** Найдите силу индуцированного тока ΔI , протекающего по выделенному кольцу Δz .
- 4.2** Найдите мощность теплоты, выделяющейся в трубке при движении магнита.
- 4.3** Найдите силу вязкого магнитного трения, действующую на движущийся магнит.
- 4.4** Найдите скорость установившегося падения магнита в трубке V .
- 4.5** Рассчитайте численное значение скорости падения магнита, характеристики которого приведены в Части 1.

Примечание.

Зависимость радиальной составляющей магнитного поля магнита на стенке трубки можно приближенно заменить на ступенчатую функцию, показанную на рисунке. Используйте параметры этой функции b и $B_{r \max}$, найденные в п. 2.8.

Если вам не удалось найти ответы в п.2.8, то в данной части считайте их известными.





Задание 3. Брызги шампанского!

Данные для этой задачи взяты из статьи Касьянов Г. И. Физическая абсорбция углекислого газа. (<https://krkgi.ru/glav/co2tech/index.htm>)

Свойства газированных напитков (в том числе шампанских вин), во многом, определяются растворенным в них углекислым газом.

Растворимостью газа называется максимальное количество газа, которое может быть растворено в жидкости. Количество газа (может определяться массой, количеством молей, объемом) растворенное в единице объема жидкости называется концентрацией растворенного газа. Раствор, содержащий максимально возможное количество газа, называется насыщенным. Растворимость может изменяться в различных единицах: грамм/литр; моль/литр; литр/литр и т.д.

При не очень высоких давлениях растворимость газа описывается законом У.Генри: растворимость газа пропорциональна парциальному давлению газа над поверхностью жидкости:

$$C = kP, \quad (1)$$

где C - концентрация насыщенного раствора газа, P - парциальное давление растворяемого газа над поверхностью жидкости, k - постоянная Генри, зависящая от жидкости и растворяемого газа, также эта постоянная зависит от температуры.

Используйте следующие постоянные величины:

$$\text{Универсальная газовая постоянная } R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

$$\text{Связь между единицами давления } 1 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Связь между абсолютной температурой по шкале Кельвина T и температурой по шкале Цельсия t

$$T = t + 273.$$

$$\text{Атмосферное давление постоянно и равно } P_0 = 1,00 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

$$\text{Молярная масса углекислого газа } CO_2 - M = 44,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}.$$

При решении данной задачи используются следующие приближения:

- углекислый газ в газовой фазе является идеальным;
- объем жидкого раствора не зависит от концентрации растворенного углекислого газа;
- давлением насыщенных паров воды можно пренебречь.

Часть 1. Предварительная.

Для большей наглядности и упрощения численных расчетов в данной задаче рекомендуется использовать следующие единицы измерения:

единица массы – 1 грамм;

единица объема – 1 литр;

единица давления – 1 атмосфера. Назовем эту систему единиц ГЛА.

1.1 Найдите численное значение и размерность универсальной газовой постоянной R в указанной системе единиц.

При температуре равной $t_0 = 0,00^\circ\text{C}$ и парциальном давлении над поверхностью воды $P_0 = 1,00 \text{ атм}$ растворимость углекислого газа в воде равна $k_v = 1,71 \frac{\text{л}}{\text{л}}$ (т.е. в 1 литре воды растворяется 1,71 литра углекислого газа, причем этот объем рассчитывается при указанных температуре и давлении газа). Далее будем измерять концентрацию в граммах/литр (масса газа в граммах, растворенного в 1 литре воды).

1.2 Запишите формулу для расчета коэффициента k_m в законе Генри (1), если концентрация рассчитывается в г/л , а давление в атмосферах. Рассчитайте ее численное значение.

Для получения сильно газированной воды ее насыщают углекислым газом при температуре $P = 3,0 \text{ атм}$ и температуре $t = 0,0^\circ\text{C}$.

1.3 Рассчитайте массу углекислого газа, который содержится в двухлитровой бутылке $V = 2,0 \text{ л}$ сильно газированной воды.

Зависимость постоянной Генри в $k_m(t)$ от температуры описывается формулой:

$$k_m = \frac{k_0}{1 + \alpha t}, \quad (2)$$

где $k_0 = 3,4 \frac{\text{г}}{\text{л} \cdot \text{атм}}$, $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ - постоянные величины, t - температура по шкале Цельсия.

Часть 2. Открываем бутылку!

В стандартную бутылку заливают $V_0 = 0,75 \text{ л}$ винного купажа (вино не содержащее углекислого газа) температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$. И плотно запечатывают бутылку. При этом в бутылке остается объем $v = 0,15 \text{ л}$, заполненный воздухом (содержанием углекислого газа в нем можно пренебречь), находящимся при атмосферном давлении. После этого бутылки опускают в подвал для вызревания. Согласно справочным данным в каждой бутылке в результате брожения образуется $m_0 = 7,5 \text{ г}$ углекислого газа.

2.1 Найдите зависимость давления бутылке от ее температуры в диапазоне от 0°C до 30°C . Постройте график полученной зависимости.

В Листах ответов приведите формулы, по которым вы проводили расчеты. Результаты расчетов (в т.ч. промежуточных) приведите в Таблице 1, график постройте на подготовленном для Вас бланке. Допускается проведение промежуточных численных расчетов.

Неопытный молодой человек открывает бутылку с шампанским при ее температуре равной $t_0 = 25^\circ\text{C}$. При этом пробка выскакивает из бутылки и шампанское струей начинает вылетать из бутылки.

2.2 Рассчитайте, какой объем шампанского останется в бутылке после такого «эксперимента».

Считайте, что при выскакивании пробки давление в бутылке резко падает до атмосферного, а углекислый газ очень быстро выделяется в виде пузырьков равномерно по всему объему, до тех пока вино не станет насыщенным при комнатных условиях.