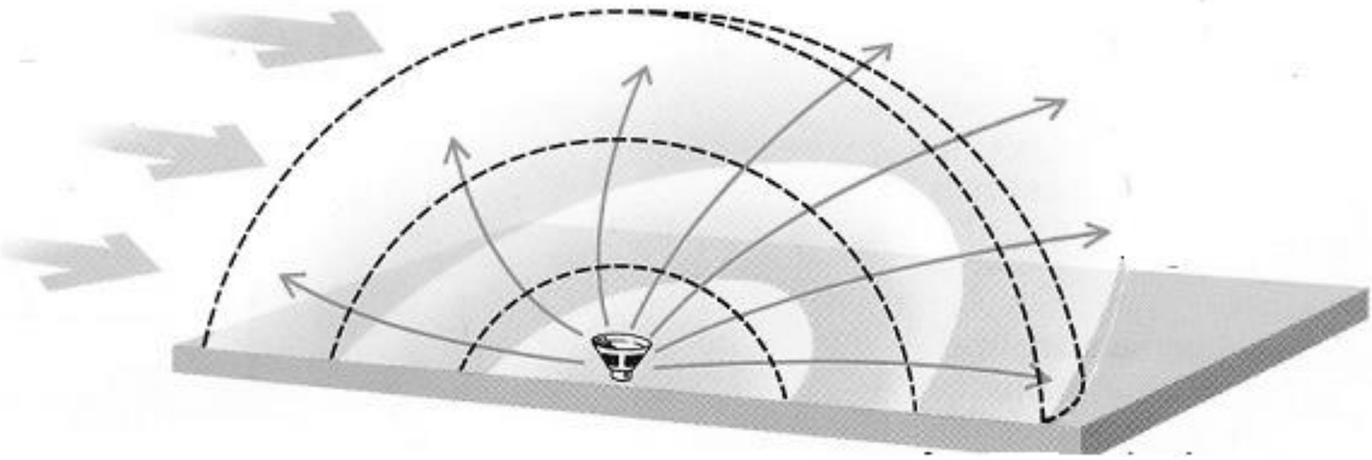


Республиканская физическая олимпиада 2019

Заключительный этап
Теоретический тур

Витебск
2019

Условия задач.

9 класс.

Задание 1. «Плодотворная дебютная идея»

Задание состоит из 4 не связанных между собой задач.

Задача 1.1

Пожилая бабушка медленно, но равномерно поднимается по лестнице в подъезде своего дома. На второй этаж она поднялась за одну минуту. За какое время она поднимется на 4 этаж? Дайте ответ для бабушки, живущей в Минске и для бабушки, живущей в Лондоне. Все времена отсчитываются от момента, когда бабушка ступила на первую ступеньку лестницы.

Задача 1.2

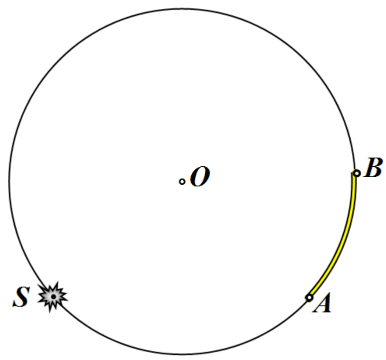
При проектировании небоскребов одной из важных проблем является расчет необходимой глубины котлована для фундамента здания. Предложите простой способ такого расчета: масса всего здания m, площадь основания S, средняя плотность грунта ρ. Какова должна быть глубина котлована?

Задача 1.3

Счетчик Гейгера – прибор для регистрации движущихся заряженных частиц (возникающих, например, при радиоактивном распаде). Одним из способов измерения характеристик потоков частиц является измерение среднего времени между регистрациями частиц. В лаборатории имеется два источника частиц. Если к счетчику поднести первый источник, то среднее время между регистрациями частиц равно $\tau_1 = 10 мс$, если поднести второй источник, то среднее время между регистрациями частиц оказывается равным $\tau_2 = 15 мс$. Чему будет равно среднее время между регистрациями частиц, если к источнику понести оба источника?

Задача 1.4

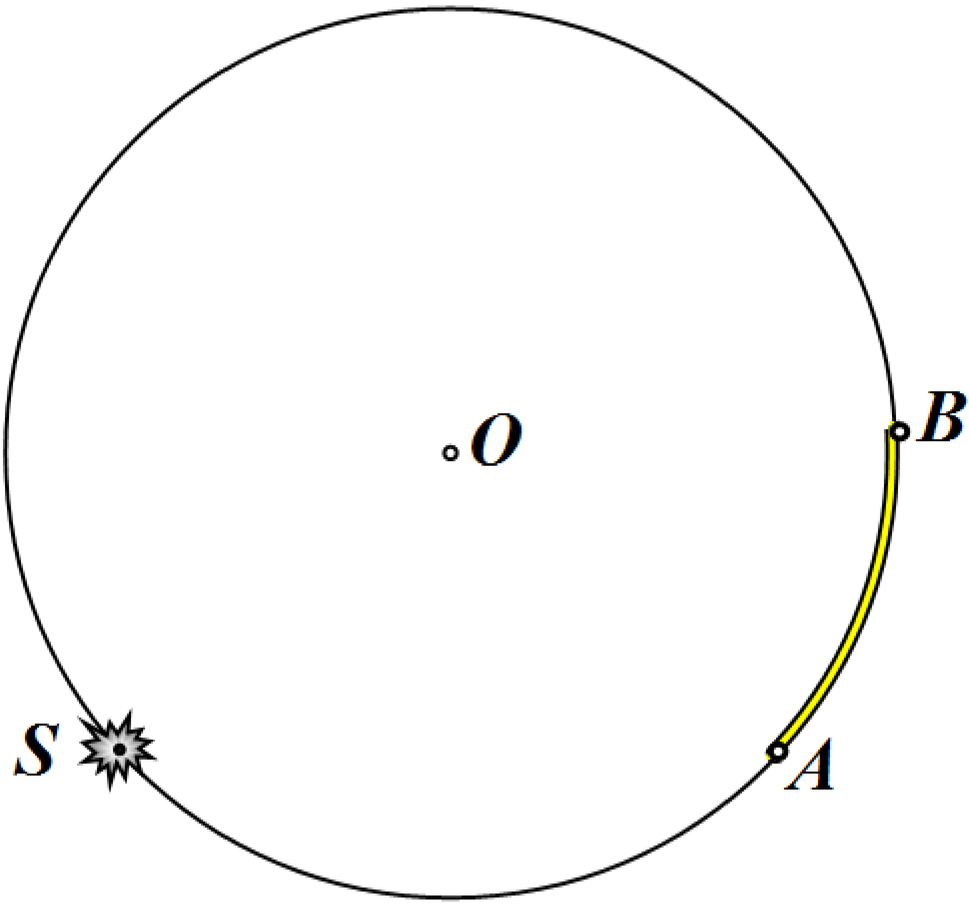
На стене круглой комнаты находится точечный источник света S. Какая-то часть стены комнаты сделана зеркальной. Благодаря чему на стенке появляется дополнительная освещенная область, обозначенная на рисунке AB. С помощью построений найдите положение зеркальной части стены. Покажите также на рисунке ход лучей, дополнительно освещающих указанную область.



На отдельном бланке этот рисунок сделан в большем масштабе.
Построения проведите на этом же бланке. Не забудьте его сдать!

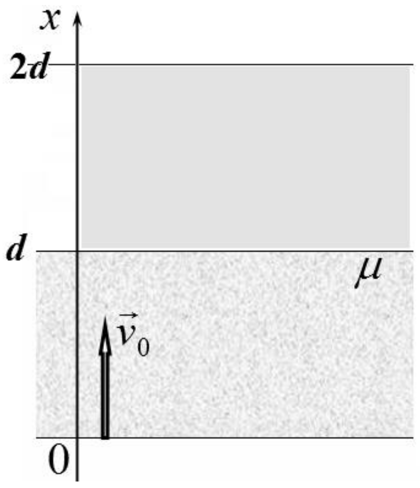
Бланк к заданию 9-1.

Задача 1.4 Круглая комната, источник и блик от зеркала.



Задача 2. Полоса препятствий.

На горизонтальной поверхности находится шероховатая полоса шириной $d = 1{,}5\ м$. На эту полосу препятствий наезжает шайба массы $m = 0{,}25\, кг$ со скоростью $\vec{v}_0$, направленной перпендикулярно границе полосы. Коэффициент трения шайбы при движении по полосе равен $\mu = 0{,}65$. За этой полосой находится гладкая полоса такой же ширины $d = 1{,}5\ м$, сила трения при движении шайбы по ней пренебрежимо мала. Во всех частях задачи вам необходимо рассматривать движение шайбы до конца гладкой полосы (т.е. в интервале $x \in [0,\ 2d]$



Ускорение свободного падения считать равным $g = 9{,}8 \frac{м}{c^2}$

.

Зададим ось X, направленную перпендикулярно полосе, начало отсчета совпадает с началом шероховатой полосы.

Часть 1. Полоса неподвижна.

1.1 При каком минимальном значении модуля начальной скорости шайбы $v_{0\min}$ шайба преодолеет полосу препятствий?

1.2 Запишите закон движения шайбы $x(t)$, считая, что шайба попадает на полосу в момент времени $t = 0$. Рассмотрите два случая – скорость шайбы меньше $v_{0\min}$; скорость шайбы больше $v_{0\min}$.

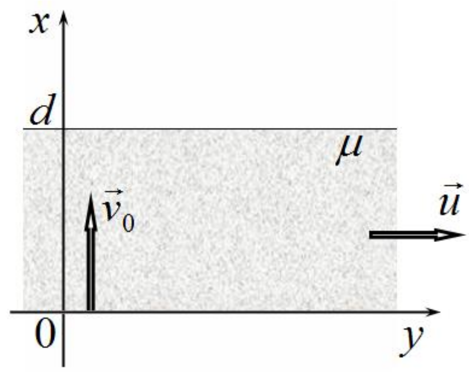
1.3 Постройте графики законов движения шайбы $x(t)$ при $v_0 = 5{,}0 \frac{м}{c}$ и при $v_0 = 3{,}0 \frac{м}{c}$.

Точно рассчитайте и укажите параметры (координаты x и времена t) всех характерных точек графиков.

Построения выполните на отдельном бланке.
Ось времени оцифруйте самостоятельно.

Часть 2. Движущаяся полоса.

В данной части задачи рассмотрим движение шайбы в том случае, когда полоса движется с постоянной скоростью $u = 2{,}5 \frac{м}{c}$, как показано на рисунке. Все остальные параметры «установки» остаются прежними. Введем вторую неподвижную ось координат Y, направленную по краю полосы. Начало отсчета этой оси совпадает с точкой, где шайба въезжает на полосу.



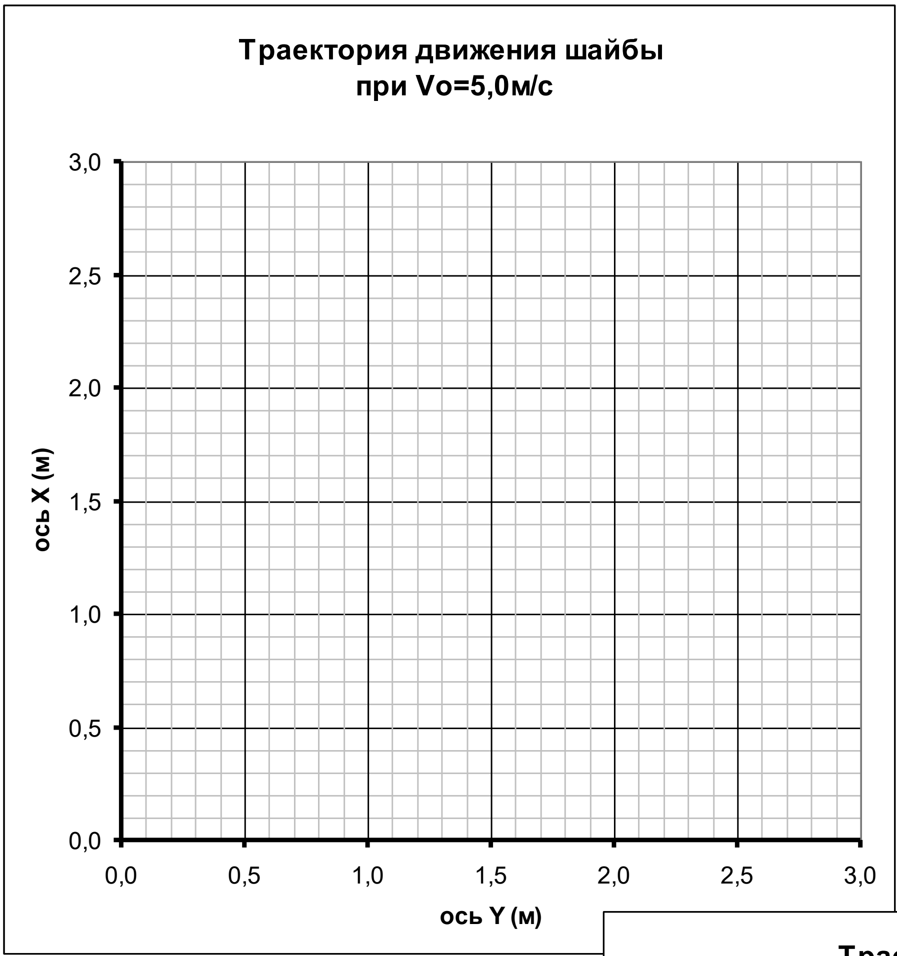
2.1 При какой минимальной начальной скорости $v_{0\min}$ шайба преодолеет полосу в этом случае?

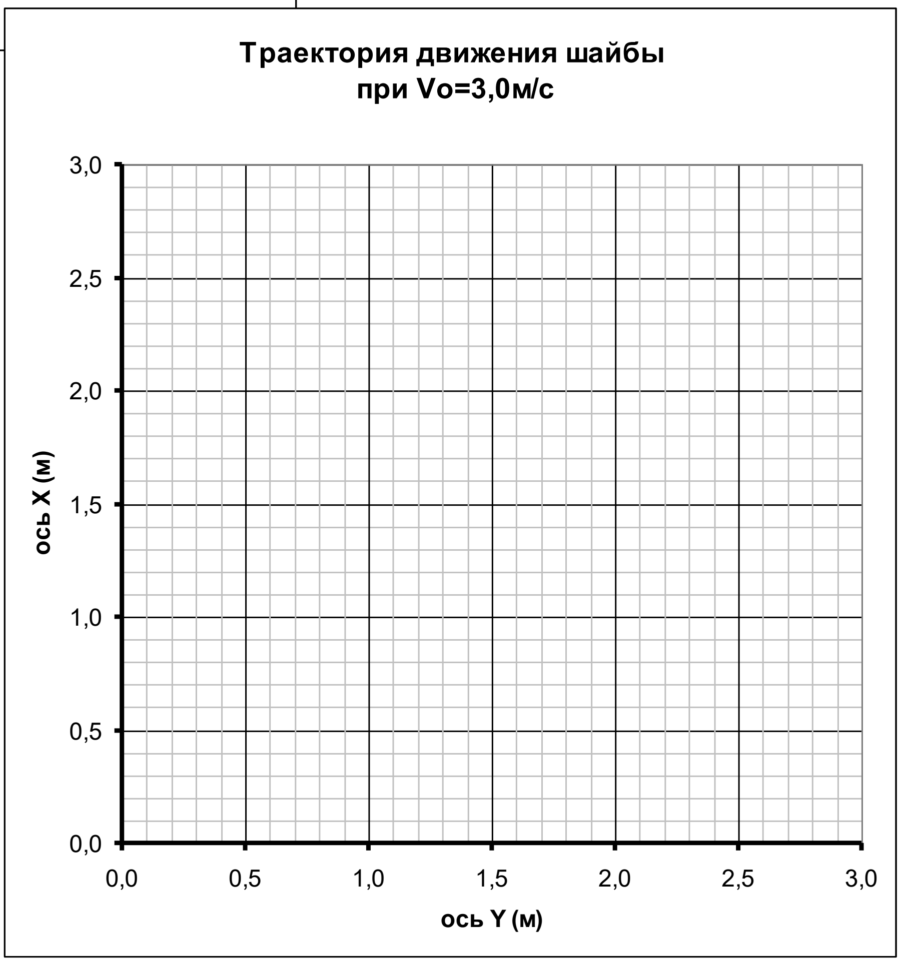
2.2 На отдельном бланке постройте траектории движения шайбы в неподвижной системе отсчета заданной системе координат (x, y) при начальных скоростях шайбы равных $v_0 = 5{,}0\frac{м}{с}$ и $v_0 = 3{,}0\frac{м}{с}$.

При решении этого пункта задачи можете проводить промежуточные численные расчеты. Запись окончательных формул не требуется.

Бланк к задаче 9-2.

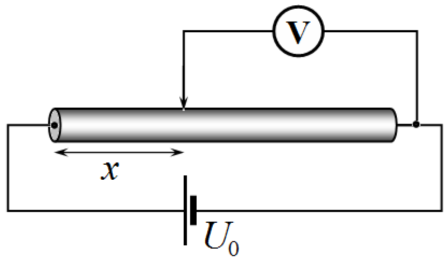
Бланк к задаче 9-2.



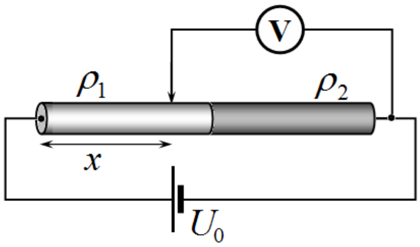


Задача 9-3 Напряжения

Часть 1. Электрическое напряжение.

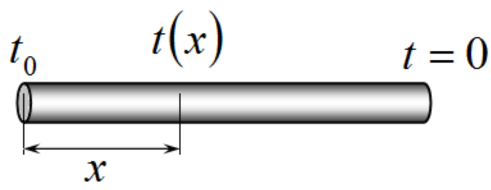


1.1 Однородный проводящий цилиндр длиной L подключен к источнику постоянного напряжения U_0. С помощью идеального вольтметра измеряется напряжение на участке цилиндра: одна клемма вольтметра подключена к концу цилиндра, второй контакт скользящий, его положение определяется расстоянием x от второго конца цилиндра. Запишите функцию $U(x)$ - зависимость показаний вольтметра от координаты x.

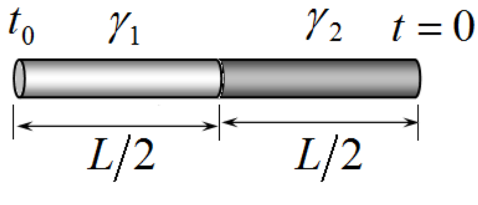


1.2 В установке, рассмотренной в предыдущем пункте, однородный стержень заменили на стержень такое же длины L, но состоящий из двух соединенных стержней одинакового радиуса, одинаковой длины $L/2$. Удельное электрическое сопротивление материала первого стержня в три раза больше удельного сопротивления второго стержня $\rho_1 = 3\rho_2$. Постройте график зависимости показаний вольтметра от координаты x в этом эксперименте. *Не забудьте указать значения напряжений в характерных точках.*

Часть 2. «Температурное» напряжение.



2.1 Боковая поверхность однородного цилиндра длиной L теплоизолирована. Один конец цилиндра поддерживается при постоянной температуре t_0, температура второго конца также постоянна и равна нулю $t = 0$. Запишите функцию $t(x)$ - зависимость установившейся температуры стержня от расстояния до его конца.



2.2 Цилиндрический стержень состоит из двух цилиндров одинакового радиуса, длины цилиндров одинаковы и равны $L/2$. Боковая поверхность стержня теплоизолирована. Один конец цилиндра поддерживается при постоянной температуре t_0, температура второго конца также постоянна и равна $t = 0$. Теплопроводность первого цилиндра в три раза больше теплопроводности второго $\gamma_1 = 3\gamma_2$. Постройте график зависимости установившейся температуры стержня от координаты x.

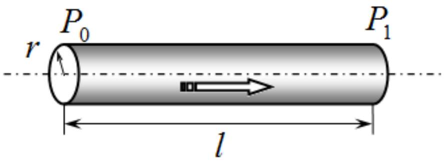
<u>Примечание.</u>
Поток теплоты q (количество теплоты, протекающей через поперечное сечение однородного стержня в единицу времени) определяется законом Фурье

$$q = \gamma \frac{\Delta t}{l} S, \tag{1}$$

Где Δt - разность температур между концами стерня, l, S - длина и площадь поперечного сечения стержня, γ - теплопроводность стержня (табличная характеристика материала стержня).

Часть 3. «Жидкое» напряжение.

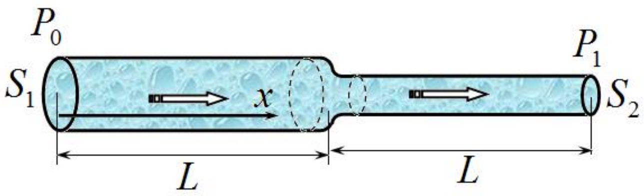
Примечание.



Объем вязкой жидкости, протекающей через поперечное сечение цилиндрической трубы в единицу времени, определяется формулой Пуазейля

$$q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta P, \tag{2}$$

Где l, r - длина и радиус трубы, $\Delta P = P_0 - P_1$ - разность давлений на концах трубы, η - вязкость жидкости (табличная величина, определяющая силы вязкого трения, возникающие при движении жидкости).



В этой части задачи рассматривается протекание несжимаемой жидкости по сочлененной трубе, состоящей из двух соосных труб. Длины обеих частей одинаковы и равны L, площадь поперечного сечения первой трубы равна $S_1 = S_0$, площадь поперечного сечения второй трубы в два раза меньше $S_2 = \frac{1}{2} S_0$. Давление на левом торце трубы поддерживается равным P_0, на правом - P_1 ($P_1 < P_0$). Положение точек внутри трубы задается координатой x, которая отсчитывается от левого торца трубы.

3.1 По трубе протекает идеальная жидкость (жидкость вязкостью которой можно пренебречь $\eta \approx 0$, плотность жидкости ρ). Нарисуйте график зависимости давления внутри жидкости от координаты x. Рассчитайте, какой объем жидкости протекает через трубу в единицу времени.

3.2 Пусть по трубе протекает вязкая жидкость. Постройте схематический график зависимости давления жидкости внутри трубы от координаты x: $P(x)$.

Указание. *Точные значения давлений в промежуточных точках рассчитывать не требуется. Однако возможные соотношения между ними должны быть учтены при построении графиков.*

10 класс

Задание 10-1 Разминка

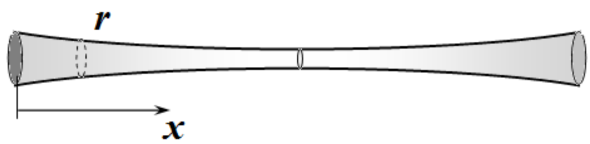
Задание состоит из 3 не связанных между собой задач.

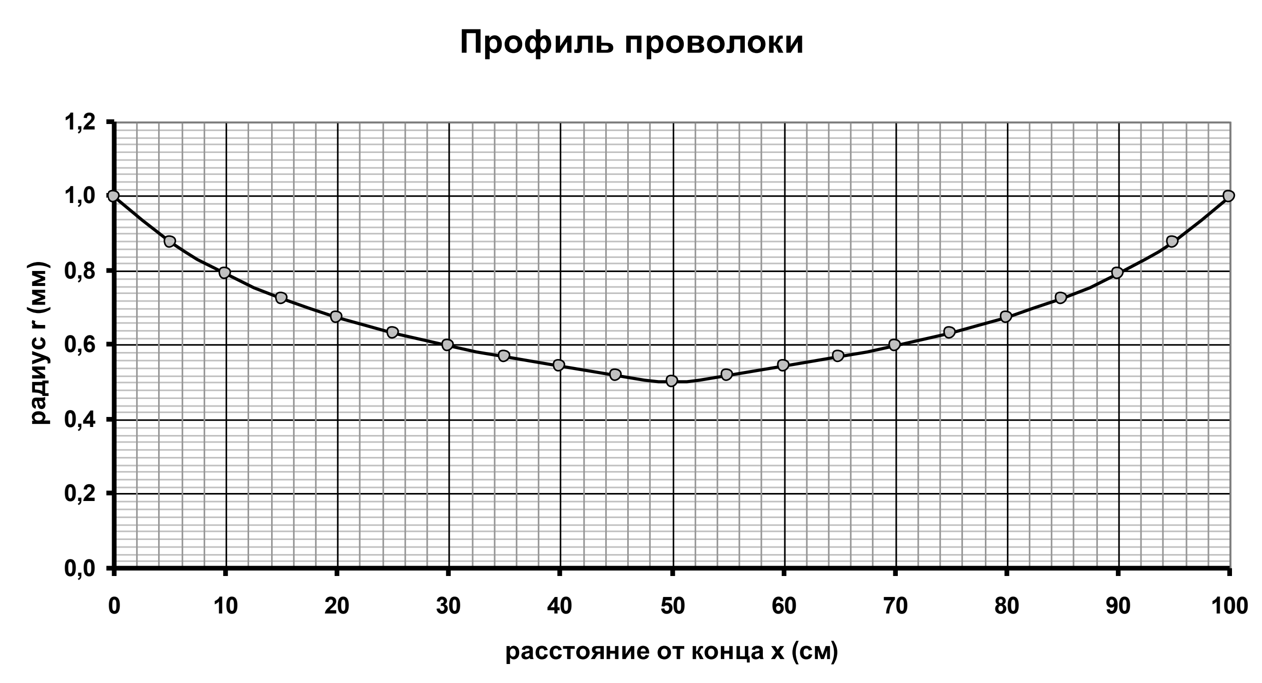
Задача 1.1

Плотность вещества некоторой планеты, имеющей форму шара, зависит только от расстояния до центра планеты. При бурении глубокой скважины оказалось, что ускорение свободного падения не зависит от глубины погружения под поверхность планеты и равно g_0. Найдите зависимость плотности вещества планеты от расстояния до ее центра $\rho(r)$.

Задача 1.2

В результате вытягивания оловянной проволоки, радиус ее сечения стал переменным, зависящим от расстояния до ее конца $r(x)$. График этой зависимости показан на рисунке (обратите внимание: радиус в мм, расстояние до конца в см). Найдите электрическое сопротивление этой проволоки, при протекании тока вдоль ее оси. Удельное сопротивление олова $\rho = 1{,}2 \cdot 10^{-7}\ Ом \cdot м$.





Задача 1.3

Через трубку с газом протекает электрический ток. Проводимость газа полностью обусловлена облучением газа потоком ионизирующих частиц (т.е. рассматривается несамостоятельный разряд при малом напряжении) от различных радиоактивных источников. Если к трубке поднесен первый источник частиц, то удельное сопротивление газа оказывается равным ρ_1, если к трубке поднесен второй источник, то удельное сопротивление становится равным ρ_2. Чему будет равно удельное сопротивление газа, если к нему поднести оба источника? Считайте, что концентрация ионов, возникающих при ионизации, мала.

Задача 10-2 Короткий толчок

Если на тело действует некоторая сила в течение малого промежутка времени Δt, очень часто используют **теорему об изменении импульса** тела (которая равносильна второму закону Ньютона): изменение импульса тела равно импульсу действующей силы:

$$\Delta \vec{P} = \vec{F}\Delta t\ . \tag{1}$$

При этом пренебрегают смещением тела за время действия силы.
Но в этом подходе скрыто противоречие: если скорость тела изменилась, то изменилась его кинетическая энергия. С другое стороны, справедлива **теорема о кинетической энергии**: изменение кинетической энергии тела, равно работе внешних сил:

$$\Delta E_{кин.} = \vec{F}\cdot\Delta\vec{r}\ . \tag{2}$$

Но если пренебречь смещением тела за время действия силы, то работа оказывается равной нулю (!), следовательно, энергия тела и его скорость не изменяется!

Продемонстрируйте свое понимание физики и используемых приближенных методов: покажите, что между этими теоремами никаких противоречий не возникает.

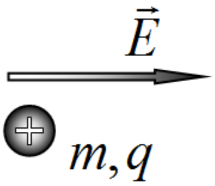
Во всех частях задачи рассматривается движение небольшой частицы (материальной точки) массы m, имеющей постоянный электрический заряд q.

Силой тяжести, силой сопротивления воздуха следует пренебрегать.

В ходе решения вам необходимо использовать единственную приближенную формулу, справедливую при малых значениях безразмерной величины $x << 1$:

$$(1+x)^{\gamma} \approx 1+\gamma x, \tag{3}$$

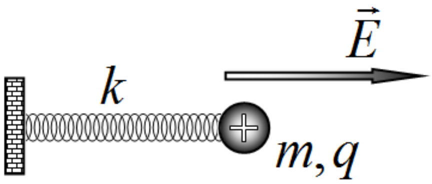
Эта формула справедлива при любых значениях показателя степени γ.



Часть 1. Постоянная сила.

Частица свободна и находится в состоянии покоя. На короткий промежуток времени τ включается постоянное электростатическое поле, напряженность которого равна E.

1.1 Используя теорему об изменении импульса (1), найдите скорость v_0, которую приобретет частица за время включения электрического поля. Постройте схематический график зависимости скорости частицы от времени.
1.2 Найдите скорость частицы после выключения поля v_0, используя теорему о кинетической энергии (2). Постройте схематический график зависимости скорости частицы от ее координаты.
1.3 Совпадают ли значения скорости v_0, полученные в пп. 1.1 – 1.2?



Часть 2. Сила упругости.

Частицу прикрепили с помощью легкой непроводящей пружины жесткостью k к неподвижной стенке. Частица находится в состоянии покоя, затем на короткий промежуток времени τ включается постоянное электростатическое поле, напряженность которого постоянна (в течение указанного промежутка) равна $\vec{E}$ и направлена вдоль пружины.
При решении этой задачи вам следует использовать два приближения (и сравнить их между собой).

Первое приближение: пренебрегаем смещением частицы за время действия поля τ

Второе приближение: учитываем смещение частицы, но пренебрегаем изменением ее ускорения, т.е. считаем, что она движется с постоянным ускорением, равным ускорению в начальный момент времени.

2.1 Используя ***первое приближение***, найдите приближенное значение скорости частицы сразу после выключения поля $\tilde{v}_0$.

2.2 Используя теорему об изменении импульса (1), найдите значение скорости частицы сразу после выключения поля v_0 ***во втором приближении***.

2.3 Разность между найденными значениями служит оценкой погрешности первого приближения. Найдите (в виде формулы) относительную погрешность значения скорости $\tilde{v}_0$:

$$\varepsilon_v = \frac{v_0 - \tilde{v}_0}{\tilde{v}_0}. \tag{4}$$

2.4 Получите формулу для значения скорости v_0 с помощью теоремы о кинетической энергии (2) во ***втором приближении***.

2.5 Упростите формулу, полученную в п. 2.4, используя приближенную формулу (3). Сравните ее с формулой, полученной на основе теоремы об изменении импульса (п. 2.2). Совпадают ли они?

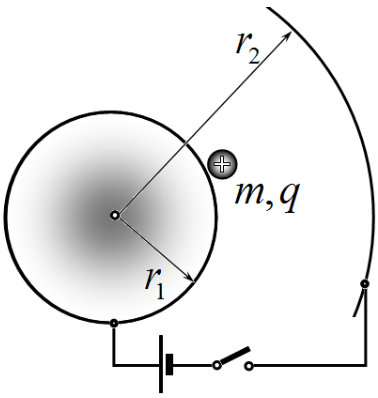
2.6 Какая из формул (п. 2.2 или п. 2.4) является правильной?

2.7 Найдите максимальное смещение частицы $\tilde{X}$ в процессе движения в ***первом приближении***.

2.8 Найдите относительную погрешность найденного смещения, используя **второе приближение.**

<u>Еще одна математическая подсказка:</u>

Если ускорение тела изменяется от времени по закону $a = bt^2$, то зависимость скорости от времени имеет вид $v = \frac{bt^3}{3}$, при этом зависимость координаты от времени $x = \frac{bt^4}{12}$. Предполагается, что начальная скорость и начальная координаты равны нулю.



Часть 3. Кулоновская сила.

Частицу поместили между обкладками сферического конденсатора. Конденсатор образован двумя концентрическими проводящими сферами, радиусы которых равны r_1, r_2. Сначала частица касается внутренней сферы и находится в покое, затем на короткий промежуток времени τ обкладки подключают к источнику постоянного напряжения U_0. При этом тело приходит в движение.

3.1 Чему равна напряженность поля у поверхности внутренней сферы E_0?

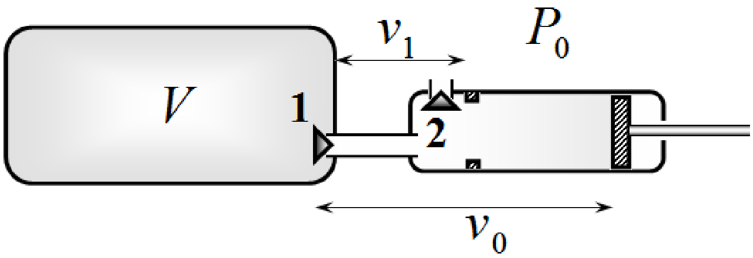
3.2 Выразите напряженность поля в точке $E(r)$, находящейся между сферами на расстоянии r от их центра, через величину E_0 и геометрические размеры конденсатора. В дальнейших пунктах ответы выражайте через значение E_0.

3.3 Найдите скорость частицы после выключения поля во втором приближении v_0

3.4 Используя первое приближение, найдите время пролета частицы между обкладками конденсатора $\tilde{T}$. Во втором приближении время движения может быть представлено в виде

$T = \tilde{T} + \beta\tau^n$, где β - некоторая константа. Чему равен порядок степени поправки n? Доказывать приведенную формулу и определять коэффициент β не требуется.

Задача 10-3 Насос



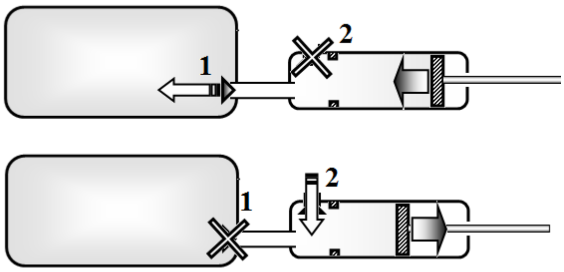
Поршневой насос состоит из цилиндрического сосуда с подвижным поршнем, соединенным с электромотором (на рисунке не показан). К цилиндру подключены два клапана 1 и 2. Каждый клапан можно считать идеальным: он пропускает газ (без сопротивления) в одну сторону и полностью перекрывает поток при изменении его направления. Насос подключают к сосуду, объем которого равен V. Электродвигатель заставляет поршень периодически перемещаться от начального положения (когда объем камеры равен v_0), до конечного положения (в котором объем камеры равен v_1) и обратно.

Численные значения параметров установки следующие:

- объем сосуда $V = 20{,}00\ л$;
- полный объем камеры насоса $v_0 = 1{,}00\,л$;
- объем камеры при вдвинутом поршне («мертвое» пространство) $v_1 = 0{,}20\ л$;
- атмосферное давление $P_0 = 1{,}0\,атм = 1{,}0 \cdot 10^5\ Па$;

Насос работает медленно, поэтому все процессы следует считать изотермическими. Трением и вязкостью воздуха можно пренебречь.

Часть 1. Накачка.



Для накачивания воздуха в сосуд клапаны устанавливают так, чтобы клапан 1 открывается, когда газ входит в сосуд (естественно, когда давление в камере насоса незначительно превышает давление в сосуде) и закрывается, не давая газу выходить из сосуда. Клапан два соединяет камеру насоса с атмосферой, он не дает выходить воздуху из камеры насоса и открывается, когда давление в камере насоса становиться чуть ниже атмосферного давления.

Обозначим P_k - давление в сосуде после k циклов работы насоса.

1.1 После совершения k циклов работы насоса давление в сосуде поднялось до значения P_k. Постройте схематический график процессов в камере насоса на диаграмме (P, v), где P, v - давление и объем газа в камере. Началом цикла считайте положение полностью выдвинутого поршня (v_0) и давления в камере P_0

Запишите уравнения всех процессов $P(V)$, укажите начальные и конечные значения параметров газа на каждом участке цикла.
Все результаты (в виде формул) занесите в таблицу 1.

Таблица 1. Цикл накачки.

Процесс	Начальное состояние		Уравнение процесса	Конечное состояние	
	Объем	Давление		Объем	Давление
$1 \to 2$					
$2 \to 3$					
…					

1.2 Перед началом работы насоса давление в сосуде равно атмосферному давлению P_0. На бланке 1 постройте графики двух первых циклов. Оцифровку оси давления проведите самостоятельно. В таблице укажите численные значения параметров в вершинах цикла.

1.3 Пусть давление в сосуде после k циклов равно $P_k = 2{,}0\,атм$. На бланке 2 постройте график одного следующего цикла. Оцифровку оси давления проведите самостоятельно, она может отличаться от оцифровки предыдущего графика. В таблице укажите численные значения параметров в вершинах цикла.

1.4 Покажите, что давление в сосуде после k циклов P_k, может быть выражено через давление после $(k-1)$ цикла P_{k-1} с помощью рекуррентной формулы

$$P_k = \gamma P_{k-1} + a\,, \tag{1}$$

Где γ, a - постоянные величины. Выразите значения параметров γ, a через характеристики установки v_0, v_1, V и атмосферное давление P_0.

1.5 Найдите, до какого максимального давления $\overline{P}$ можно поднять давление в сосуде.

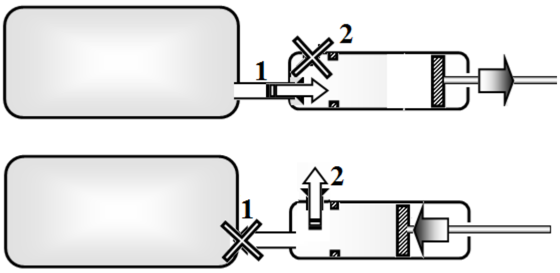
1.6 Обозначим $\delta_k = \overline{P} - P_k$ - отклонение давления в сосуде после k циклов от максимально возможного. Выразите величину δ_k через δ_{k-1} и параметры γ, a из формулы (1).

1.7 Получите формулу, описывающую в явном виде давление в сосуде P_k в зависимости от числа совершенных циклов k. Постройте схематический график этой зависимости.

1.8 Рассчитайте, сколько циклов должен совершить насос, чтобы давление в сосуде достигло значения $0{,}95\overline{P}$.

Часть 2. Откачка.

Насос может, как накачивать воздух в сосуд, так и откачивать его из сосуда. Для этого только необходимо изменить направление пропускания клапанов (см. рис).



2.1 Пусть после k циклов давление в сосуде опустилось до значения P_k. Постройте схематический график цикла откачки воздуха из сосуда (P, v), где P, v - давление и объем газа в камере. Началом цикла считайте положение полностью задвинутого поршня (v_1) и давление в камере насоса P_0.

Запишите уравнения всех процессов $P(V)$, укажите начальные и конечные значения параметров газа на каждом участке цикла. Все результаты (в виде формул) занесите в Таблицу 2, аналогичную Таблице 1.

2.2 Получите формулу, описывающую давление в сосуде P_k в зависимости от числа совершенных циклов k.

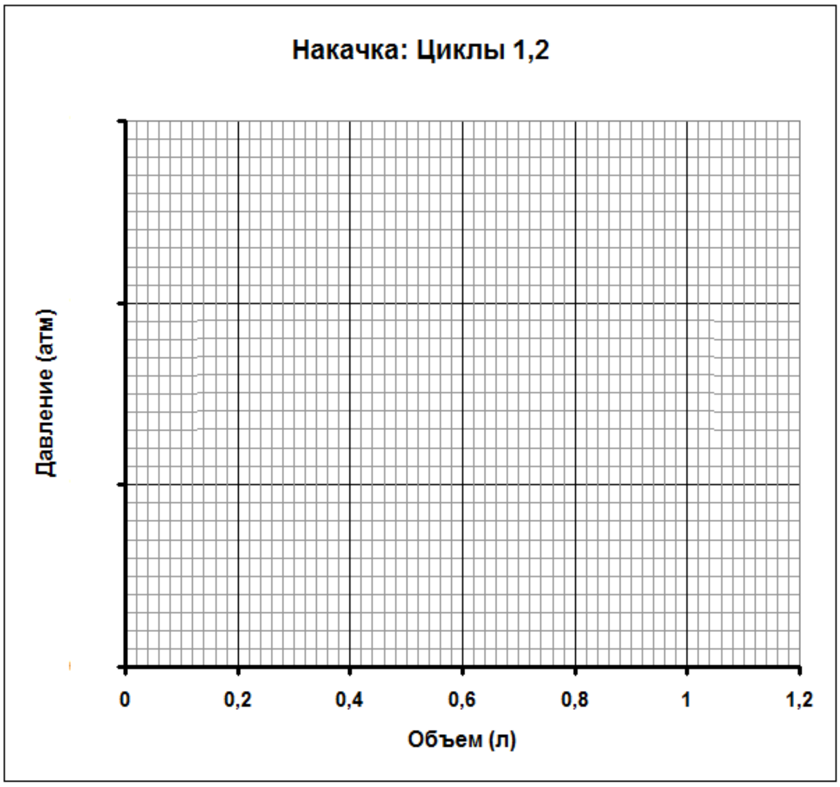
2.3 Рассчитайте, до какого значения понизится давление в сосуде после 50 циклов работы насоса.
2.4 До какого минимального значения можно понизить давление в сосуде?

Бланк к задаче 10-3 «Насос»

Циклы 1, 2

Таблица состояний.

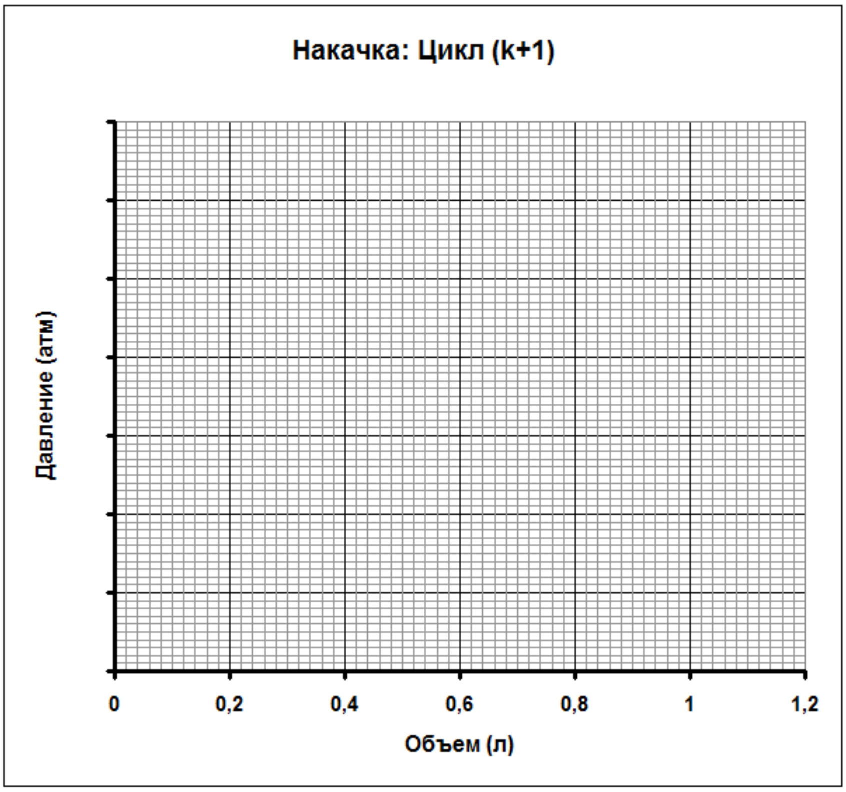
Точка	Объем v (л)	Давление P (атм.)
Цикл 1		
Цикл 2		



Цикл $(k+1)$

Таблица состояний.

Точка	Объем v (л)	Давление P (атм.)

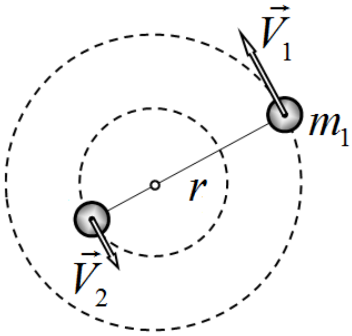


11 класс

Задача 11- 1. Разминка.

«Разминка» состоит из двух почти не связанным между собой задач.

Задача 1.1.



Две заряженные частицы движутся по круговым траекториям с постоянной угловой скоростью ω, расстояние между частицами равно r, массы частиц равны m_1 и m_2. Частицы взаимодействуют только между собой, внешних сил нет. Найдите полную энергию данной системы. Чему будет равна эта энергия, если $m_2 >> m_1$?

Задача 1.2

В учебнике физики (В.В. Жилко, Л.Г. Маркович: Физика учебное пособие для 11 классов…)
приведена формула для энергий стационарных состояний атома водорода

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 m_e e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \qquad (1)$$

Далее на основании этой формулы рассчитывается спектр излучения атома водорода. Из приведенной формулы следует, что спектр излучения водорода и его тяжелого изотопа дейтерия должны совпадать. Однако тщательно проведенные измерения показали, что длины волн излучения водорода и его изотопа дейтерия незначительно, но все же отличаются.

Рассчитайте относительное **изменение** длины волны, соответствующей переходу из состояния $n = 3$ в состояние $n = 2$ (основная линия серии Бальмера), при замене обычного водорода на дейтерий:

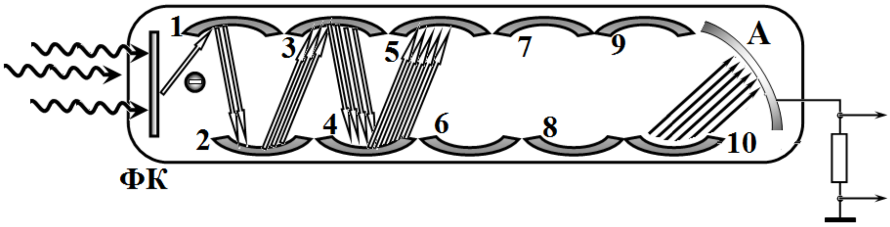
$$\varepsilon = \frac{\lambda_D - \lambda_H}{\lambda_H} \qquad (2)$$

где λ_H, λ_D -длины волн указанной линии для обычного водорода и дейтерия соответственно.

Дейтерий – изотоп водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона.
Считайте, что массы протона и нейтрона равны, а отношение массы электрона к массе протона равно $\frac{m_e}{m_p} = \beta \approx 5{,}5 \cdot 10^{-4}$.

Задача 11-2 Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

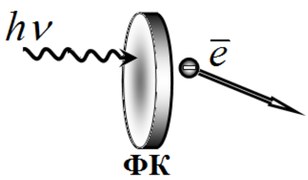
Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – электронный прибор, используемый для регистрации слабых световых потоков. Схематически устройство ФЭУ показано на рисунке



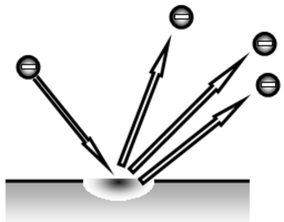
В сосуде, из которого полностью откачан воздух, расположен *фотокатод* (ФК), 10 одинаковых динодов (металлических пластин, покрытых слоем окисла) и *собирающий анод* (А). Все эти элементы далее будем называть *электродами*. На рисунке диноды обозначены числами от 1 до 10. От каждого динода, катода и анода сделаны выводы, позволяющие подключать к ним электрическую схему питания. Между всеми электродами прикладывается постоянное электрическое напряжение. Свет попадает на фотокатод, который в результате фотоэффекта может испустить электрон (внутрь баллона). Этот электрон ускоряется электрическим полем и попадает на первый динод в результате вторичной электронной эмиссии, динод испускает несколько вторичных электронов. Эти электроны разгоняются и летят ко второму диноду, каждый из электронов может выбить из второго динода несколько электронов, которые летят к следующему диноду и т.д. В результате между динодами развивается электронная лавина. Электроны, испущенные последним динодом, собираются на аноде и создают импульс тока в выходной цепи, который регистрируется счетным устройством (на схеме его вход показан стрелками).

Одним из основных способом регистрации световых потоков является **метод счета фотонов**. В этом режиме регистрируются и подсчитываются отдельные импульсы тока, возникающие при появлении единственного электрона, вылетевшего из фотокатода при поглощении кванта света. Существенно, что в этом режиме импульсы от различных фотонов не должны перекрываться, так как регистрирующее устройство подсчитывает число этих импульсов.

Именно режим счета фотонов рассматривается в данной задаче.



<u>Фотокатод.</u> Основной характеристикой фотокатода является квантовый выход фотоэффекта η, который равняется вероятности того, что квант света, попавший на фотокатод, приведет к появлению свободного электрона. Также можно сказать, что квантовый выход равен отношению числа испущенных фотоэлектронов к числу попавших на катод фотонов.



<u>Вторичная электронная эмиссия</u>. Электрон, обладающий достаточной энергией попадающий на поверхность твердого тела, может выбить из этой поверхности несколько электронов (которые называются вторичными). Среднее число вторичных электронов, испущенных при попадании одного первичного электрона, называется коэффициентом вторичной эмиссии σ. Этот коэффициент зависит от энергии падающих электронов.

Вторичные электроны имеют различные энергии. Для описания этих энергий используется функция распределения энергии $f(E)$. Эта функция имеет следующий смысл: для малого интервала энергий ΔE величина $f(E)\Delta E$ равна доле вторичных электронов, энергии которых лежат в интервале от E до $E+\Delta E$.

Время вылета вторичных электронов из поверхности пренебрежимо мало. Каждый падающий электрон приводит к появлению вторичных электронов не зависимо от количества первичных электронов.

В данной задаче рассматривается ФЭУ со следующими характеристиками:

Фотокатод является круглой пластинкой диаметра $D = 2{,}50 см$;

Фотокатод равномерно освещается монохроматическим световым потоком с длиной волны $\lambda = 450 нм$;

Квантовый выход фотоэффекта для данной длины волны равен $\eta = 4{,}0 \cdot 10^{-2}$.

Чтобы избежать вторичной эмиссии электронов с анода и его излишнего разогрева напряжение между последним динодом и анодом устанавливается равным 20 В.

Площадь каждого динода равна $S = 2{,}0 см^2$.

Все вторичные электроны, испущенным динодом, попадают на следующий динод. Движение электронов между последовательными электродами можно приближенно считать равноускоренным, расстояния между всеми последовательными электродами одинаковы и равны $l = 3{,}0 см$.

Считайте, что скорости электронов значительно меньше скорости света.

Зависимость коэффициента вторичной эмиссии энергии первичных электронов для всех динодов одинакова и показана на рисунке. Шкала энергий первичных электронов в электрон-вольтах (эВ).

Функция распределения энергии вторичных электронов не зависит от энергии первичных электронов и также показана на рисунке. Шкала энергий вторичных электронов также в электрон-вольтах (эВ).

Физические постоянные:

Постоянная Планка $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$

Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{м}$.

Скорость света $c = 3{,}00 \cdot 10^{8} \frac{м}{с}$.

Заряд электрона $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ Кл$.

Масса электрона $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ кг$.

Наконец, вопросы данной задачи.

Модель работы ФЭУ, которая рассматривается в этой задаче, естественно, является весьма упрощенной, поэтому при решении задачи используйте разумные приближения. При оценивании вашей работы, прежде всего, будут учитываться основные физические идеи. Если записанные вами формулы и численные значения будут иметь погрешность менее 10%, они будут рассматриваться как правильные. Кроме того, при решении данной задачи допускается и приветствуется проведение промежуточных численных расчетов.

1. Развитие электронной лавины.

В режиме счета фотонов лавина порождается одним электроном вылетевшем из фотокатода под действием кванта падающего света.

1.1 Каким должно быть напряжение ΔU между катодом и первым динодом, а также между соседними динодами, чтобы число электронов, попадающих на анод, было максимальным?
1.2 Чему равно среднее значение числа электронов $\overline{N}$, попадающих на анод, при оптимальном режиме работы ФЭУ?
1.3 Рассчитайте среднее время пролета лавины от катода до анода $\overline{T}$ в оптимальном режиме.
1.4 Рассчитайте длительность импульса тока τ на входе в регистрирующую систему.

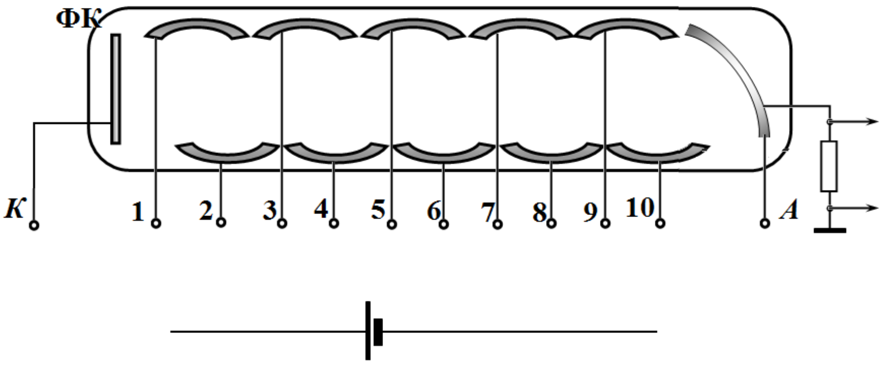
<u>Подсказка.</u> *Считайте, что энергии вторичных электронов лежат в интервале ΔE, который определяется на полувысоте функции распределения (см. рис).*

1.5 Найдите среднее значение силы тока в выходном импульсе.
1.6 При работе ФЭУ в рассматриваемом режиме возможно появление, так называемых, «темновых» импульсов, которые возникают из-за электронов, которые вылетают из динодов вследствие термоэлектронной эмиссии (испускание электронов нагретой металлической поверхностью). Что бы исключить подсчет этих паразитных импульсов на входе регистратора устанавливается пороговое устройство (дискриминатор), которое пропускает только те импульсы, у которых среднее значение силы тока превышает некоторое пороговое значение $I_{пор.}$. Укажите значение порогового значения силы тока, позволяющее отсечь большую часть «темновых» импульсов.
1.7 Определите максимальную интенсивность светового потока, при которой число зарегистрированных импульсов в единицу времени пропорционально интенсивности падающего потока.

2. Схема питания ФЭУ в режиме счета фотонов.

Для правильной работы ФЭУ необходимо собрать схему его питания, создающую оптимальные условия для работы прибора. Желательно иметь схему, потребляющую минимальный ток от источника.

Для питания ФЭУ имеется источник постоянного напряжения $U_0 = 1{,}0\,кВ$.



2.1 На рисунке показан ФЭУ с выводами от динодов (они пронумерованы), катода и анода. Нарисуйте схему питания ФЭУ, используя только источник питания и резисторы с произвольными сопротивлениями. В данном пункте вам необходимо указать только соотношения между сопротивлениями резисторов. Окончательно значения сопротивлений вы должны установить позже.

Для расчета значений сопротивлений необходимо учесть два дополнительных условия, обеспечивающих работу ФЭУ в режиме счета фотонов.

1) Среднее значение силы тока в анодной цепи при прохождении импульса тока должно быть в примерно в 10 раз меньше силы тока в цепи питания ФЭУ.
2) Характерное время установления зарядов на динодах должно быть примерно в 2 раза меньше длительности импульса.

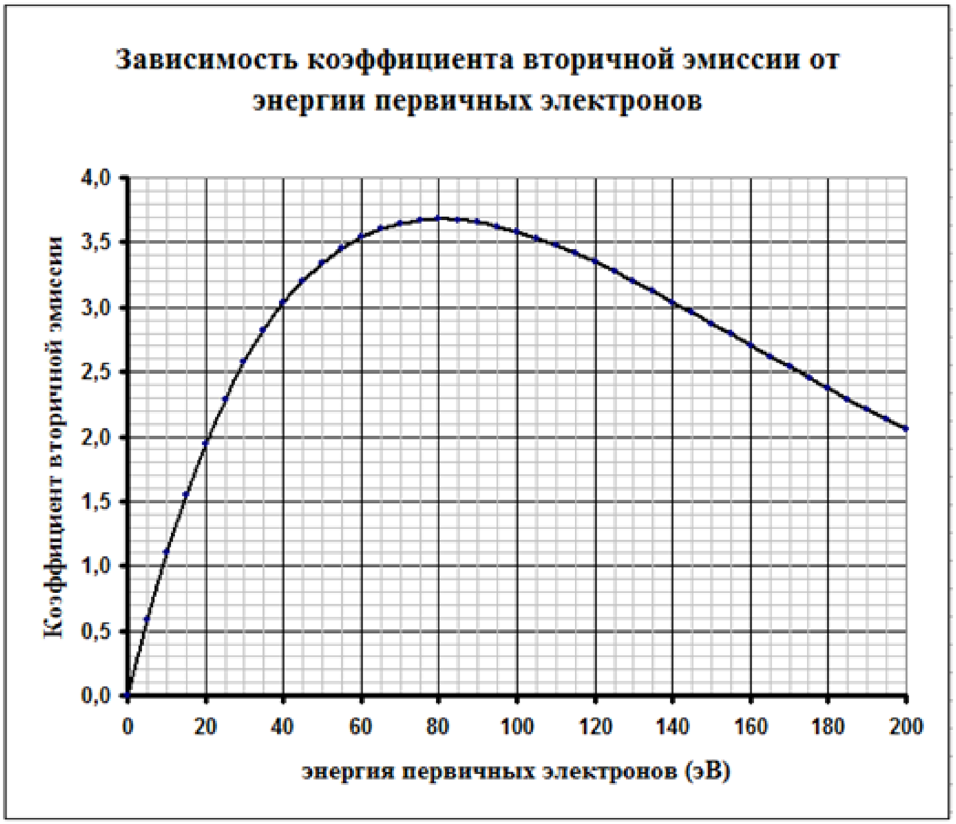
2.2 Рассчитайте значения сопротивлений резисторов в цепи питания, при которых удовлетворяется первое условие.

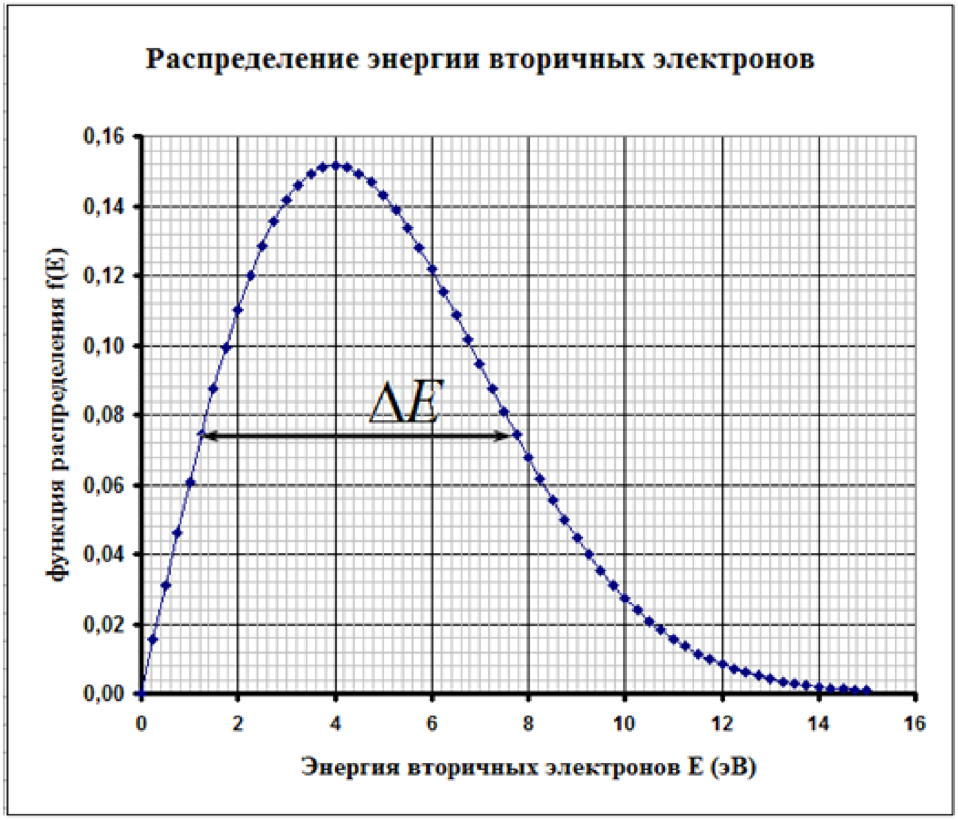
2.3.1 Пару последовательных динодов можно рассматривать как обкладки конденсатора. Оцените емкость такого конденсатора.

2.3.2 Оцените характерное время зарядки динодов посредством цепи питания. Определите сопротивления резисторов в цепи питания, при которых выполняется второе условие правильной работы ФЭУ в рассматриваемом режиме.

2.4 Укажите значения сопротивлений резисторов в схеме питания ФЭУ.

К задаче 11-2 ФЭУ





Задача 11-3 Преломление… звука

Так как и звук, и свет являются волнами (конечно, разной природы), то законы распространения звука и света аналогичны. Например, в однородных средах и свет, и звук распространяются прямолинейно; преломление световых и звуковых лучей подчиняется закону Снеллиуса и т.д.

Часть 1. Скорость звука в воздухе.

Скорость звука в газе (молярная масса которого равна M) зависит от давления P и плотности газа ρ по формуле, которую можно представить в виде

$$c = AP^{\alpha}\rho^{\beta} \qquad (1)$$

Здесь A - безразмерный коэффициент пропорциональности.

1.1 Используя метод размерностей, определите показатели степеней α, β в этой формуле.
1.2 Найдите зависимость скорости звука в газе от абсолютной температуры T. Считайте, что коэффициент A в формуле (1) известен.
1.3 Пусть скорость звука при температуре T_0 равна c_0. Произвольную температуру представим в виде $T = T_0 + \Delta T$. Получите формулу для зависимости скорости звука от величины ΔT. В этой формуле все параметры должны быть точно известны.

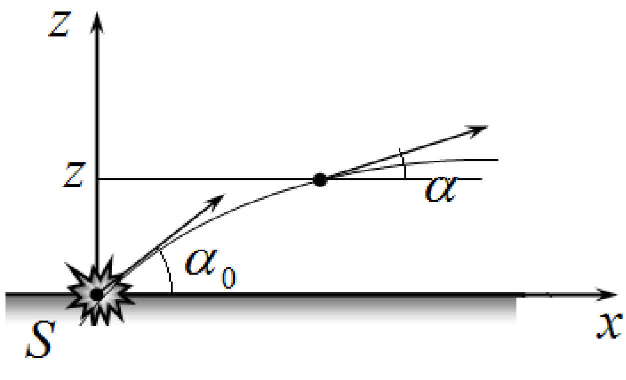
Часть 2. Распространение звука в неоднородно нагретой атмосфере.

Пусть температура воздуха изменяется с высотой z по закону

$$T = T_0 + \gamma z \qquad (2)$$

Параметры этой зависимости считайте известными, параметр γ может быть как положительным, так и отрицательным.

При распространении звука в описанной атмосфере звуковые лучи слегка искривляются. Пусть источник звука S находится на поверхности земли, которую будем считать плоской. Совместим с этим источником начало системы координат (x, z), как показано на рисунке. Рассмотрим звуковой луч, выходящий из источника под углом α_0 к горизонту.



2.1 Нарисуйте схематически семейство лучей, выходящих из источника в двух случаях: если параметр γ в формуле (2) положительный $\gamma > 0$; если он отрицательный $\gamma < 0$.

Далее будем считать, температура воздуха у поверхности земли равна $t_0 = 20°C$ (при этой температуре скорость звука равна $c_0 = 340\frac{м}{с}$) и уменьшается на $1°C$ при подъеме на каждые 100 метров.

2.2 Получите зависимость скорости звука от высоты при заданных условиях $c(z)$. Рассчитайте численные значения параметров в полученной формуле.

Математические подсказки.
1. При малом изменении температуры траекторию луча можно приближенно считать параболой, описываемой функцией $z(x)$. Кроме того, рассматриваются лучи, распространяющиеся под малыми углами α к горизонту. В этом приближении (с точностью до малых второго порядка α^2) справедливы приближенные формулы

$$tg\,\alpha \approx \sin\alpha \approx \alpha$$
$$\cos\alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \quad . \tag{3}$$

2.3 Запишите в явном виде квадратичную функцию $z = f(z)$, график которой проходит через начало координат. **2.4** Выразите ее производную $f'(x)$ как функцию z.

В дальнейшем используйте полученное соотношение для описания траекторий лучей в квадратичном приближении.

2.5 Получите уравнение луча, выходящего из источника под углом α_0 к горизонту, используя квадратичное приближение. **2.6** На каком максимальном расстоянии от источника может услышать звук человек, уши которого находятся на высоте 2,0 м над поверхностью земли? Затуханием звука в воздухе можно пренебречь.

Часть 3. Не кричите против ветра!

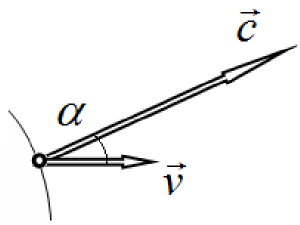
В данной части задачи температуру воздуха будем считать постоянной и равной $t_0 = 20°C$.
Но над поверхностью земли дует постоянный ветер, скорость которого направлена горизонтально и возрастает с высотой по линейному закону

$$v(z) = v_0 + \beta z \, . \tag{4}$$

Где $v_0 = 10\frac{м}{с}$, $\beta = 5{,}0 \cdot 10^{-2} с^{-1}$ - постоянные величины. Источник звука по-прежнему находится на поверхности земли, используйте прежнюю систему координат.

При распространении звука в движущемся воздухе скорость распространения звукового волнового фронта равна сумме скоростей звука в неподвижном воздухе c_0 и нормальной (к волновому фронту) составляющей скорости ветра $\vec{v}$

$$c = c_0 + v\cos\alpha \tag{5}$$



3.1 Нарисуйте схематически семейство звуковых лучей, распространяющихся от источника под разными углами как по ветру, так и против ветра. **3.2** Пусть звуковой луч на высоте z распространяется под углом α к горизонту. Получите уравнение, описывающее изменение угла α при малом изменении высоты Δz. **3.3** Получите функцию $z(x)$, описывающую траекторию луча, вышедшего под углом α_0 из источника в квадратичном приближении. Рассмотрите лучи, распространяющиеся по ветру и против ветра. 3.4 На основании вашего решения задачи, кратко сформулируйте основную причину того, что по ветру звук распространяется дальше, чем против ветра.