



Республиканская физическая олимпиада 2025 года (Заключительный этап)

Теоретический тур

10 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.

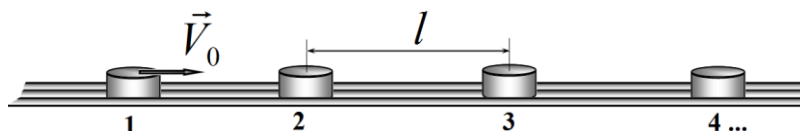
Пакет содержит:

- титульный лист (1 стр.);
- условия 3 теоретических заданий (6 стр.);
- лист ответов (5)



Задание 1. Три цепочки.

Задача 1.1

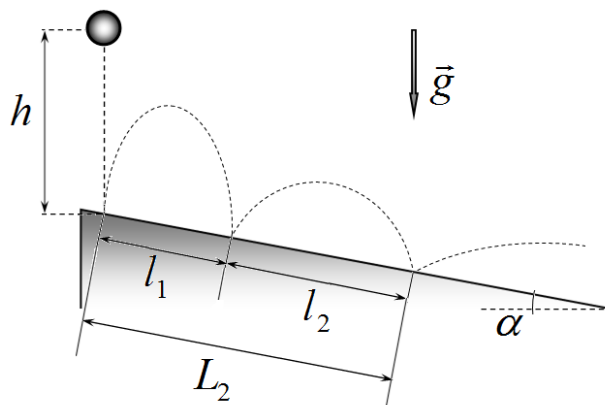


В гладком горизонтальном прямом желобе лежат N одинаковых шайб на равных расстояниях l друг от друга. Диаметры шайб значительно меньше расстояния между ними. Первой шайбе толчком сообщают скорость V_0 вдоль желоба. Столкновения между шайбами абсолютно неупругие.

1.1 Рассчитайте, через какое время после толчка сдвинется последняя шайба.

Задача 1.2

Небольшой гладкий шарик падает с высоты h на твердую длинную наклонную плоскость, составляющую угол α с горизонтом и абсолютно упруго отражается от нее. Сопротивлением воздуха пренебречь.



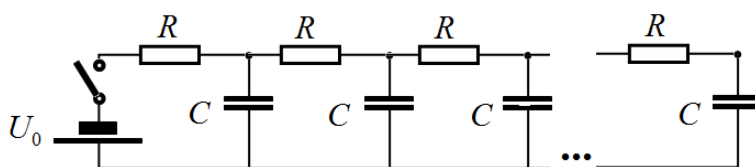
1.2.1 Найдите расстояние между точками последовательных столкновений шарика с плоскостью l_k (см. рис.).

1.2.2 Найдите смещение шарика вдоль наклонной плоскости L_k за k пролетов между ударами.

Задача 1.3

Электрическая цепь, состоящая из N одинаковых звеньев, подключена к источнику постоянного напряжения U_0 .

Сопротивление каждого резистора равно R , емкость каждого конденсатора - C . Конденсаторы не заряжены, ключ замыкают.



1.3.1 Найдите значение силы тока через источник сразу после замыкания цепи.

1.3.2 Найдите, какой суммарный электрический заряд протечет через источник до прекращения тока в цепи.



Задание 2. Столкновение ядер

Для изучения ядерных взаимодействий широко используется экспериментальный метод столкновения ядер различных химических элементов.

Для ускорения ядер, которые значительно тяжелее протонов, используются линейные ускорители. Во всех частях задачи считайте, что скорости частиц значительно меньше скорости света.

В данной задаче рассматривается столкновение ускоренных ядер углерода ${}_{12}^6\text{C}$ и неподвижных ядер свинца ${}_{207}^{82}\text{Pb}$.

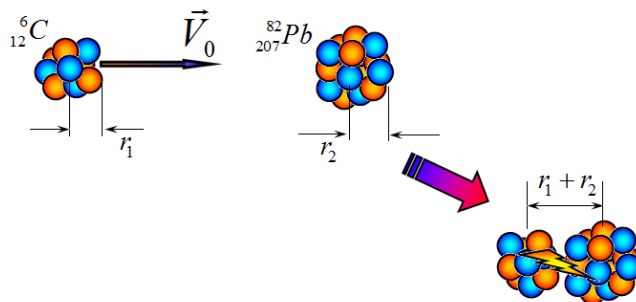
Числа в обозначениях ядер означают: верхнее число Z - зарядовое число (число протонов в ядре), нижнее число A - массовое число (общее число протонов и нейтронов в ядре). Эти числа позволяют найти

- заряд ядра $q = Ze$, где $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона;
- массу ядра, которая приближенно равна $m = Am_p$, где $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$;
- радиус ядра $r = aA^{1/3}$, где $a = 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}$.

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

Часть 1. Порог реакции

Ядро углерода ${}_{12}^6\text{C}$ ускоряется в ускорителе, проходя ускоряющую разность потенциалов U , и приобретая скорость V_0 . Ядро-мишень ядро свинца можно считать неподвижным и свободным. Чтобы между ядрами началась ядерная реакция, необходимо, чтобы центры ядер сблизились на расстояние меньшее, чем сумма их радиусов.



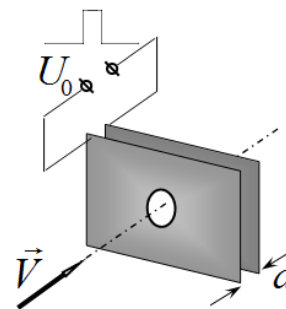
1.1 Рассчитайте, какую минимальную ускоряющую разность потенциалов U_0 должно пройти ядро углерода, чтобы началась ядерная реакция его взаимодействия с ядром свинца.

1.2 Рассчитайте, чему будет равна скорость ядра углерода V_0 при прохождении разности потенциалов U_0 .

1.3 Рассчитайте минимальную ускоряющую разность потенциалов и скорость ядра, если ускоряется ядро свинца, а мишенью является ядро углерода.

Часть 2. Ускоряющая система

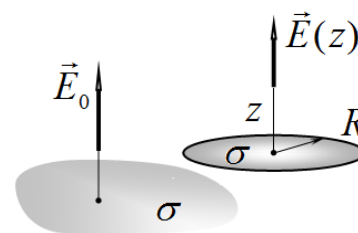
Для ускорения ядер используется несколько ячеек разгона. Каждая такая ячейка состоит из двух больших параллельных металлических пластин, расположенных перпендикулярно направлению движения частиц. В пластинах вырезаны два коаксиальных круглых отверстия радиуса R . Ускоряемые частицы движутся вдоль оси этих отверстий. Расстояние между пластинами равно a и в несколько раз меньше радиусов отверстия. На пластины подается импульсное напряжение U_0 , которое включается при подлете частиц к первой пластине и выключается при вылете частиц за вторую пластину.



2.1 Рассчитайте, какую кинетическую энергию ΔW приобретет ядро углерода при пролете через ускоряющую ячейку.

Подсказка. Равномерно заряженная с поверхностной плотностью заряда σ плоская пластина создает однородное электрическое поле, напряженность которого обозначим $\vec{E}_0$. Равномерно заряженный диск радиуса R создает такое электрическое поле, что на оси диска на расстояниях $z \ll R$ его напряженность описывается приближенной формулой

$$E(z) = E_0 \left(1 - \frac{z}{R} \right). \quad (1)$$



2.2 Используя определение электрической емкости и формулу для емкости плоского конденсатора, выразите напряженность поля E_0 , создаваемого равномерно заряженной плоскостью, через поверхностную плотность заряда σ .

Часть 3. Линейный ускоритель

Линейный ускоритель состоит из:

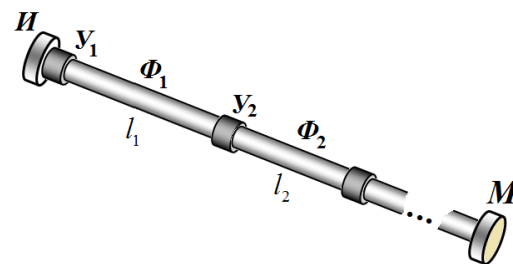
I – источник ускоряемых ядер;

$Y_1, Y_2 \dots$ - ускоряющие ячейки, их общее число равно N ;

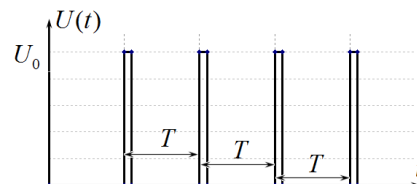
$\Phi_1, \Phi_2 \dots$ - трубы с фокусирующими магнитными устройствами (в данной задаче не рассматриваются), их длины обозначены $l_1, l_2 \dots$;

M – мишень с неподвижными ядрами.

Внутри системы находится вакуум.



Будем считать, что на входе в первую ускоряющую ячейку Y_1 скорости ядер равны нулю. На все ускоряющие ячейки одновременно подается импульсное напряжение, одинаковое на всех ускоряющих ячейках. Частота следования импульсов напряжения постоянна. Причем она настраивается так, что разгоняемые ядра ускоряются в каждой ячейке. Схематический вид зависимости напряжения, подаваемого на все ускоряющие ячейки, от времени показан на рисунке. Временем пролета частиц через ускоряющие ячейки пренебрежимо мало. Длина первой трубы равна l_1 .



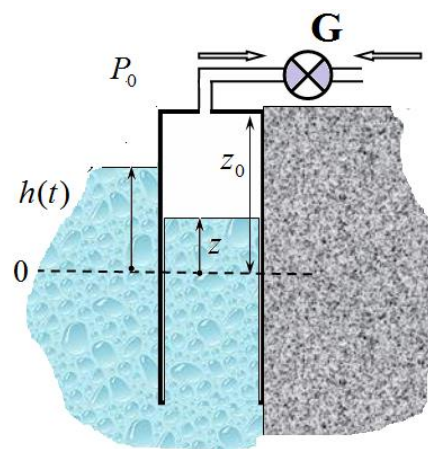
3.1 Рассчитайте длины остальных труб l_n , при которых ядра будут ускоряться в каждой ускоряющей ячейке.

Задание 3. ВЭС – волновая электростанция.



Одним из нетрадиционных возобновляемых источников энергии может служить энергия морских волн. К настоящему времени разработано более десятка различных волновых электростанций (ВЭС), некоторые из которых показаны на рисунке. В данном задании Вам необходимо проанализировать работу одного из типов, таких реально существующих ВЭС.

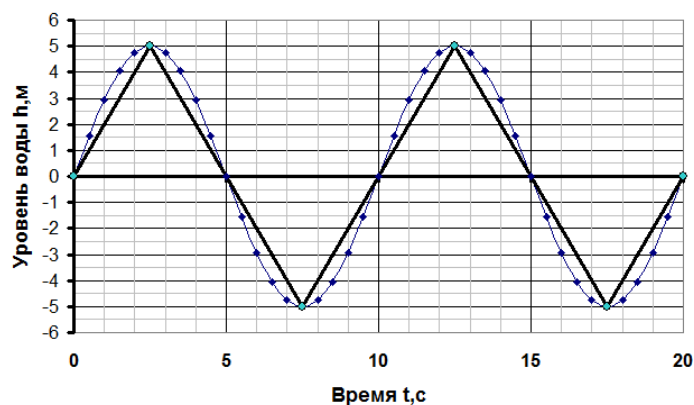
Упрощенная схема установки показана на рисунке. Прочный открытый снизу цилиндр вертикально закреплен у береговой скалы. Морская вода может поступать в этот рабочий цилиндр снизу. В верхней части трубы находится воздух. Выходная труба соединяет цилиндр с электрогенератором G , выходная труба генератора открыта в атмосферу. При подъеме уровня воды воздух вытесняется из цилиндра и приводит во вращение турбину генератора. При опускании уровня воды через ту же трубу атмосферный воздух всасывается внутрь рабочего цилиндра через ту же трубу. При этом турбина также может вращаться, что приводит к выработке электроэнергии.



Для описания работы этой установки используются следующие приближения.

- 1) Воздух можно считать идеальным газом.
- 2) Вода внутри и снаружи рабочего цилиндра все время находится в квазиравновесном состоянии, т.е. давление, создаваемое водой, можно рассчитывать по законам гидростатики.
- 3) Генератор снабжен клапаном, который открывается, если разность давлений с разных сторон генератора достигает некоторого значения ΔP . При меньшей разности давлений труба оказывается полностью перекрытой. При открытом клапане (из-за наличия турбины) разность давлений остается постоянной и равной ΔP .
- 4) Все процессы происходят при постоянной температуре.
- 5) Разностью давлений воздуха в рабочем цилиндре и выходной трубе можно пренебречь.
- 6) Уровень воды вблизи рабочего цилиндра изменяется по периодическому закону, который можно приближенно описать кусочно-линейной функцией. На графике: плавная кривая – реальная зависимость, ломаная линия – приближение, которое используется в решении данной задачи.

Зависимость уровня воды от времени



В данной задаче удобно в качестве единицы давления использовать «метр водяного столба» - гидростатическое давление, создаваемое 1 метром водяного столба. Считайте, что $1 \text{ м.в.с.} = 1,0 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Используйте следующие обозначения (смотри схему установки):

- высота уровня воды вблизи рабочего цилиндра $h(t)$ - график этой функции приведен выше;
- высота уровня воды внутри рабочего цилиндра $z(t)$;
- высота верхней крышки рабочего цилиндра z_0 .

Все эти величины отсчитываются от равновесного уровня моря.

В расчетах используйте следующие значения параметров:

- атмосферное давление $P_0 = 10 \text{ м}$ (водяного столба, что соответствует нормальному атмосферному давлению);
- температура воздуха и воды $t^\circ = 7,0^\circ \text{C}$;
- молярная масса воздуха $M = 29 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$;
- универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$;
- площадь поперечного сечения рабочего цилиндра $S_0 = 10 \text{ м}^2$;
- площадь поперечного сечения выходной трубы $s = 1,0 \text{ м}^2$;
- разность давлений, при котором открывается клапан, и которая поддерживается постоянной при протекании газа через турбину, $\Delta P = 2,0 \text{ м}$;
- высота цилиндра над уровнем моря $z_0 = 7,0 \text{ м}$;
- период волны $T = 10 \text{ с}$.
- амплитуда волны $A = 5,0 \text{ м}$.

Часть 1. Рабочий цикл установки.

1.1 Выразите давление воздуха в рабочем цилиндре (в метрах водяного столба) через атмосферное давление P_0 и высоты уровней воды вне цилиндра h и внутри его z .

Рассмотрим рабочий цикл установки. Считаем, что поверхность моря спокойна $h = 0$; вода в цилиндре находится также на нулевом уровне $z = 0$, давление воздуха внутри рабочего цилиндра равно атмосферному $P = P_0$. В момент времени $t = 0$ приходит волна.

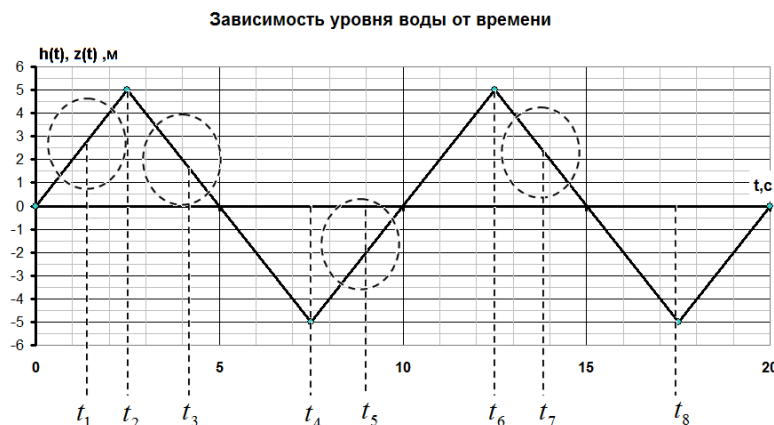
1.2 Рассчитайте, при какой минимальной амплитуде волны $A_{\min}$, установка начнет вырабатывать электроэнергию.

Далее будем считать, что амплитуда волн остается постоянной и равной $A = 5,0 \text{ м}$.

1.3 Рассчитайте численные значения модуля скорости подъема и опускания уровня воды вне установки v .

В данной части задания необходимо описать цикл работы установки, то есть найти зависимости уровня воды $z(t)$ и давления воздуха $P(t)$ в рабочем цилиндре от времени. Считаем, что в начальный момент времени $t = 0$ $z = 0$ и $P = P_0$. Уровень воды снаружи установки изменяется по закону, приведенному ранее на графике. В Бланках ответов приведен график этой зависимости.

На этом графике Вы должны построить зависимость $z(t)$. Для этого достаточно рассчитать значения указанных параметров в узловых точках, показанных на рисунке. Точки 1, 3, 5, 7 соответствуют открытию или закрытию клапана турбины генератора, их положение вам предстоит найти, поэтому на рисунке они показаны условно. График зависимости $z(t)$ можно изобразить в виде отрезков прямых между узловыми точками (за исключением участка 1-2).



- 1.4** Найдите явный вид зависимости уровня воды в цилиндре $z(t)$ в интервале времени от нуля до t_1 . Постройте график этой зависимости.
- 1.5** Найдите, в какой момент времени t_1 воздух начнет поступать в турбину. Рассчитайте уровень воды вне цилиндра h_1 , уровень воды z_1 и давление воздуха P_1 в цилиндре в этот момент времени.
- 1.6** Рассчитайте значения высоты уровня вне цилиндра h_k , уровня воды в цилиндре z_k , давления воздуха P_k в указанных узловых точках и соответствующие моменты времени t_k ($k=1,2,\dots,8$). Полученные значения занесите в Таблицу 1 Листов ответов. Приведите (там, где это необходимо) формулы, по которым проведены расчеты. Постройте схематический график зависимости $z(t)$.
- 1.7** На отдельном бланке постройте схематическую диаграмму процесса изменения состояния воздуха в рабочем цилиндре в координатах $(P, (z_0 - z))$.
- 1.8** Укажите, начиная с какой узловой точки процесс далее будет периодически повторяться, укажите также конечную точку цикла.

Часть 2. Энергетические характеристики ВЭС.

В этой части задания Вы должны рассчитать энергетические характеристики рассматриваемой установки в режиме установившегося цикла ее работы.

В данной части используйте обозначения и численные значения параметров, найденные в Части 1.

- 2.1** Укажите, на каких участках процесса (между какими узловыми точками) генератор вырабатывает электроэнергию.
- 2.2** Рассчитайте массу воздуха, который выходит из рабочего цилиндра за один цикл работы установки.
- 2.3** Оцените кинетическую энергию воздуха, выходящего из рабочего цилиндра на входе в турбину генератора за один цикл работы установки.
- 2.4** Рассчитайте работу, совершенную воздухом, выходящим из рабочего цилиндра, над турбиной генератором за один цикл работы установки.
- 2.5** Считая, что КПД электрогенератора равен $\eta_0 = 60\%$, рассчитайте среднюю мощность рассмотренной установки за один цикл ее работы.