Республиканская физическая олимпиада 2025 года

(Заключительный этап)

Теоретический тур

Решения задач
10 класс
(для жюри)

Уважаемые члены жюри!

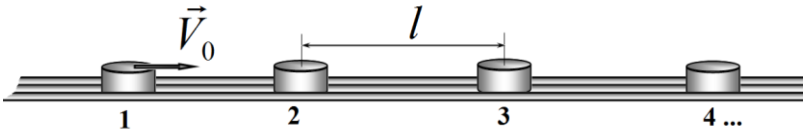
Задачи, предложенные школьникам для решения на олимпиаде, не стандартные и достаточно сложные. Предложенные здесь варианты путей решений не являются единственно возможными. Участники олимпиады могут предложить свои способы решения. Если эти способы приводят к правильным ответам и физически обоснованы, то задача (или ее отдельные пункты) должны оцениваться максимальными баллами.

Не забывайте, что Вы должны оценивать не только конечные ответы, но и отдельные правильные шаги в ходе решения!

Не жалейте баллов (если, конечно, есть за что!) для наших замечательных школьников!

Задание 1. Три цепочки.

Задача 1.1



Обозначим скорость шарика номер k сразу после его столкновения - v_k. Из закона сохранения импульса

$$mV_0 = kmv_k\,, \qquad (1)$$

Следует, что она равна

$$v_k = \frac{V_0}{k}. \qquad (2)$$

Поэтому время движения k «слипшихся» шайб до очередного столкновения равно

$$\tau_k = \frac{l}{v_k} = k\frac{l}{V_0}. \qquad (3)$$

Последняя шайба сдвинется через время T, которой равно сумме времен

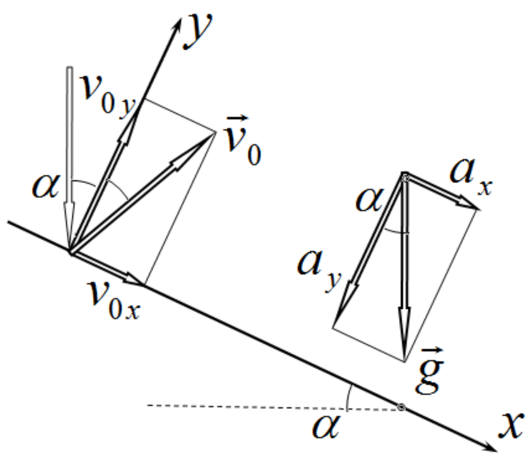
$$T = \sum_{k=1}^{N-1}\tau_k = \frac{l}{V_0}\sum_{k=1}^{N-1}k\,. \qquad (4)$$

Используя формулу для суммы членов арифметической прогрессии, получаем нужный результат

$$\boxed{T = \frac{N(N-1)}{2}\frac{l}{V_0}. \qquad (5)}$$

Задача 1.2

Движение шарика в данной задаче удобно рассматривать в системе координат, связанной с наклонной плоскостью. Направим ось x вдоль наклонной плоскости, а ось y перпендикулярно к ней. Начало отсчета совместим с точкой первого удара. В этой системе проекции ускорения на оси координат равны



$$\begin{cases} a_x = g\sin\alpha \\ a_y = -g\cos\alpha \end{cases}. \qquad (1)$$

А проекции начальной скорости после первого удара (с учетом абсолютной упругости) описываются формулами

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0\sin\alpha \\ v_{0y} = v_0\cos\alpha \end{cases}. \qquad (2)$$

где

$$v_0 = \sqrt{2gh} \qquad (3)$$

модуль скорости шарика после первого удара.

Так как в моменты ударов силы направлены перпендикулярно плоскости, то проекция скорости на ось x изменяться во время ударов изменяться не будет. Следовательно, движение в проекции на ось x будет равноускоренным:

$$x = v_0 t\sin\alpha + \frac{g\sin\alpha}{2}t^2\ . \qquad (4)$$

Запишем закон движения шарика вдоль оси y после первого столкновения:

$$y = v_0 t\cos\alpha - \frac{g\cos\alpha}{2}t^2 \ . \qquad (5)$$

Из этого выражения следует, что второй удар произойдет через время τ, равное

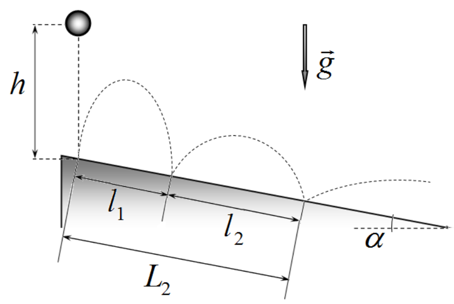
$$v_0\tau\cos\alpha - \frac{g\cos\alpha}{2}\tau^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{2v_0}{g} \ . \qquad (6)$$

Проекция скорости v_y в этот момент времени будет равна

$$v_{y1} = v_0\cos\alpha - g\cos\alpha\,\tau = v_0\cos\alpha - g\cos\alpha\frac{2v_0}{g} = -v_0\cos\alpha \,. \qquad (7)$$

Таким образом, после второго отскока проекция скорости v_y останется такой же, как и после первого отскока, следовательно, после каждого столкновения эта проекция остается неизменной. Отсюда следует важный вывод – время между последовательными ударами постоянно и определяется формулой (5)!

Поэтому проще сначала найти ответ на второй вопрос задачи, а затем на первый.



1.2.2 Время k пролетов равно

$$t_k = k\tau = k\frac{2v_0}{g} \,. \qquad (8)$$

Координата x (равная искомой величине L_k) задается законом движения (4):

$$L_k = v_0(k\tau)\sin\alpha + \frac{g\sin\alpha}{2}(k\tau)^2 = k(k+1)\frac{2v_0^2}{g}\sin\alpha \ . \qquad (9)$$

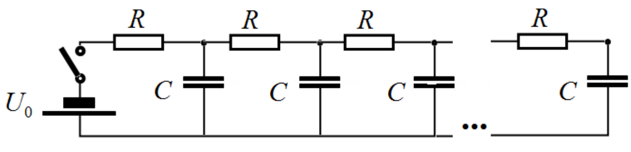
С учетом формулы для начальной скорости (3), получаем

$$\boxed{L_k = 4k(k+1)h\sin\alpha} \qquad (10)$$

1.2.1 Расстояния между последовательными ударами рассчитываются по формуле

$$\boxed{l_k = L_k - L_{k-1} = 8kh\sin\alpha \,.} \qquad (11)$$

Задача 1.3



1.3.1 Если конденсатор не заряжен, то напряжение на нем равно нулю, поэтому он является проводником. Следовательно, в момент замыкания цепи ток пойдет только через первый резистор, поэтому его сила равна

$$\boxed{I_0 = \frac{U}{R}} \qquad (1)$$

1.3.2 Когда конденсаторы зарядятся, ток в цепи прекратится. В этом случае напряжения на резисторах станут равными нулю (т.е. их можно считать проводниками). В этом случае напряжение на всех конденсаторах станет равным напряжению источника.

Поэтому суммарный заряд цепи станет равным

$$\boxed{q = N\frac{U}{C} \,.} \qquad (2)$$

Задание 2. Столкновение ядер (Решение)

Часть 1. Порог реакции

1.1 Основная проблема рассмотренного типа ускорения заключается в том, что ядро-мишень также приходит в движение. Поэтому не все кинетическая энергия движущегося ядра переходит в энергию их взаимодействия. При сближении положительно заряженных ядер возрастает энергия их кулоновского взаимодействия, которое препятствует их столкновению. Не сложно понять, что при минимальном сближении ядер их скорости становятся равными. Запишем закон сохранения энергии для рассматриваемых ядер

$$\frac{m_1 V_0^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)V^2}{2} + W(r). \tag{1}$$

Здесь: V_0 - скорость ускоренного ядра; V скорости ядер в момент максимального сближения; $W(r)$ - потенциальная энергия кулоновского взаимодействия в этот же момент времени.

Так как ядра должны сблизиться на расстояние $(r_1 + r_2)$, потенциальная энергия взаимодействия должна достичь величины

$$W = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 (r_1 + r_2)}, \tag{2}$$

где q_1, q_2 - электрические заряды ядер. Скорость ядер в момент максимального сближения можно выразить их закона сохранения импульса

$$m_1 V_0 = (m_1 + m_2)V \quad \Rightarrow \quad V = \frac{m_1}{m_1 + m_2} V_0 \tag{3}$$

Подставим в уравнение (1) и преобразуем его:

$$\frac{m_1 V_0^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2)}{2}\left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} V_0\right)^2 + W(r) \quad \Rightarrow \quad \frac{m_1 V_0^2}{2}\frac{m_2}{m_1 + m_2} = W(r). \tag{4}$$

Кинетическую энергию налетающего ядра выразим через ускоряющую разность потенциалов U:

$$\frac{m_1 V_0^2}{2} = q_1 U\ . \tag{5}$$

Эти уравнения позволяют записать выражение

$$q_1 U \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 (r_1 + r_2)}, \tag{6}$$

Из которого находим

$$U = \frac{m_1 + m_2}{m_2}\frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 (r_1 + r_2)}. \tag{7}$$

Наконец выразим характеристики ядер через их массовые и зарядовые числа

$$U = \frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)}\frac{Z_2}{A_2}\frac{e}{4\pi\varepsilon_0 a}\ . \tag{8}$$

Подставляя численные значения всех величин, получим

$$\boxed{U_0 = \frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)}\frac{Z_2}{A_2}\frac{e}{4\pi\varepsilon_0 a} = \frac{12 + 207}{\left(12^{1/3} + 207^{1/3}\right)}\frac{82}{207}\frac{1{,}6\cdot 10^{-19}}{4\pi\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 1{,}3\cdot 10^{-15}} = 1{,}2\cdot 10^7\, B\ . \quad (9)}$$

1.2 Для вычисления скорости налетающего ядра воспользуемся формулами (5) и (8):

$$\frac{A_1 m_p V_0^2}{2} = Z_1 eU = Z_1 e \frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)} \frac{Z_2}{A_2} \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 a} \quad \Rightarrow$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)} \frac{Z_2 Z_1}{A_2 A_1} \frac{e^2}{2\pi\varepsilon_0 a m_p}} \quad . \qquad (10)$$

Численное значение этой величины равно

$$\boxed{V_0 = \sqrt{\frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)} \frac{Z_2 Z_1}{A_2 A_1} \frac{e^2}{2\pi\varepsilon_0 a m_p}} = 3{,}35 \cdot 10^7 \ \frac{м}{с} \quad . \qquad (11)}$$

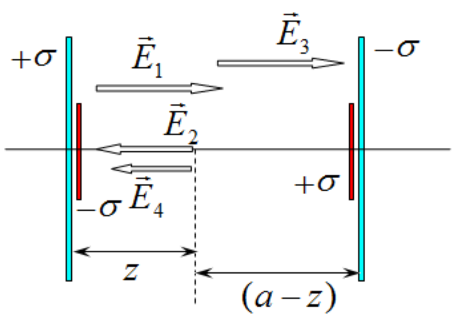
1.3 Если ядра пометь местами, то это приведет к изменению индексов в конечных формулах. Тогда ускоряющая разность потенциалов для атома свинца оказывается равной

$$\boxed{U_0 = \frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)} \frac{Z_1}{A_1} \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 a} = 1{,}5 \cdot 10^7 \ B \quad . \qquad (12)}$$

Формула для скорости симметрична по индексам, поэтому скорость ядра свинца должна остаться прежней

$$\boxed{V_0 = \sqrt{\frac{A_1 + A_2}{\left(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}\right)} \frac{Z_2 Z_1}{A_2 A_1} \frac{e^2}{2\pi\varepsilon_0 a m_p}} = 3{,}35 \cdot 10^7 \ \frac{м}{с} \quad . \qquad (13)}$$

Часть 2. Ускоряющая система



2.1 Для расчета энергии, которую получает ядро при пролете через ускоряющую ячейку, необходимо рассмотреть электрическое поле между пластинами.

Для расчета поля используем принцип суперпозиции и достаточно традиционную идею: вместо отверстия будем рассматривать сплошную пластину с поверхностной плотностью заряда $+\sigma$, на которую наложен диск, радиус которого равен радиусу отверстия, с противоположной плотностью заряда $-\sigma$. Аналогично будем рассматривать и вторую пластину с отверстием.

При таком подходе напряженность электрического поля на оси отверстий можно представить в виде следующей суммы полей (в проекции на направление движения частиц):

- поле положительно заряженной пластины $E_1 = E_0$;

- «поле отверстия» в этой пластине $E_2 = -E_0\left(1 - \dfrac{z}{R}\right)$;

- поле отрицательно заряженной пластины $E_3 = E_0$;

- «поле отверстия» во второй пластине $E_4 = -E_0\left(1-\frac{a-z}{R}\right)$.

Сумма этих полей оказывается равной

$$E_\Sigma = E_0\frac{a}{R}. \tag{14}$$

Таким образом, в рамках приближенной модели поля диска, поле на оси отверстий оказывается однородным. Следовательно, разность потенциалов между центрами отверстий равна

$$\Delta\varphi_{CC} = E_\Sigma a = E_0\frac{a^2}{R}. \tag{15}$$

При прохождении этой разности потенциалов энергия ядра увеличится на величину

$$\Delta W = q\Delta\varphi_{CC} = qE_0\frac{a^2}{R}. \tag{16}$$

На большом удалении от отверстий поле между пластинами однородное, его напряженность равна E_0. Следовательно, разность потенциалов (или напряжение) между пластинами равна

$$U_0 = aE_0. \tag{17}$$

Наконец, из последних формул следует, что при пролете через ускоряющую систему ядро приобретет энергию равную

$$\boxed{\Delta W = qU_0\frac{a}{R}.} \tag{18}$$

2.2 Формула для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \tag{19}$$

И определение емкости

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\sigma S}{2E_0 d}, \tag{20}$$

(здесь E_0 - напряженность поля, создаваемого одной платиной) позволяют выразить напряженность поля одной пластины через поверхностную плотность заряда на ней

$$\boxed{E_0 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}.} \tag{21}$$

Часть 3. Линейный ускоритель

3.1 Чтобы разгон ядра проходил в каждой ускоряющей ячейке, необходимо, чтобы ядро подлетало к очередной ячейке в момент включения поля. То есть времена пролета между ячейками должны быть одинаковыми. Так как в каждой ячейке кинетическая энергия увеличивается на одну и туже величину ΔW , то после пролета n ячеек энергия и скорость ядра будут равны

$$W = n\Delta W\begin{cases} W_n = n\Delta W \\ \dfrac{mV_n^2}{2} = W_n \end{cases} \Rightarrow \quad V_n = V_1\sqrt{n}. \tag{22}$$

Из условия постоянства времен пролета

$$\frac{l_1}{V_1} = \frac{l_n}{V_n} = \frac{l_n}{V_1\sqrt{n}}. \tag{23}$$

следует, что длины труб должны удовлетворять условию

$$\boxed{l_n = l_1\sqrt{n}} \tag{24}$$

Задание 3. ВЭС – волновая электростанция. (Решение)

1.1 Давление воздуха внутри рабочего цилиндра следует из условия равновесия воды

$$\boxed{P = P_0 + h - z \qquad (1)}$$

1.2 При подъеме уровня воды моря начнется подъем уровня воды в цилиндре и сжатие воздуха в нем. Так как клапан выпускной клапан открывается, если давление воздуха внутри цилиндра достигнет значения

$$P_2 = P_0 + \delta P \qquad (2)$$

Чтобы генератор начал работать, необходимо, чтобы при максимальном подъеме уровня воды $h = A$ давление воздуха достигло значения, определяемого формулой (2). Так как процесс сжатия происходит при постоянной температуре и постоянной массе воздуха в цилиндре, то он описывается законом Бойля - Мариотта $PV = const$, которое можно записать в виде

$$(P_0 + A - z_2)(z_0 - z_2) = P_0 z_0 \qquad (3)$$

Принимая во внимание формулу (2), получим, что максимальный уровень подъема воды в рабочем цилиндре должен стать равным z_2, который можно найти из уравнения

$$(P_0 + \delta P)(z_0 - z_2) = P_0 z_0 \quad \Rightarrow \quad z_0 - z_2 = \frac{P_0}{P_0 + \delta P} z_0 \quad \Rightarrow \quad z_2 = \frac{\delta P}{P_0 + \delta P} z_0 . \qquad (4)$$

Найденное значение позволяет найти минимальную высоту волны

$$P_0 + A - z_2 = P_0 + \delta P \quad \Rightarrow \quad A = \delta P + z_2 . \qquad (5)$$

Окончательно находим

$$\boxed{A_{\min} = \frac{\delta P}{P_0 + \delta P} z_0 + \delta P = 3{,}2\ м . \qquad (6)}$$

1.3 Модуль скорости движения воды снаружи равен

$$\boxed{v = \frac{4A}{T} = 2{,}0 \frac{м}{с} . \qquad (7)}$$

1.4 Параметры в состоянии 1 задаются начальными условиями.
На временном интервале между точками 1 и 2 (а также 2 и 3) подъем уровня воды вне цилиндра происходит по закону

$$h = vt \qquad (8)$$

Процесс 1-2 (до открытия клапана) есть процесс изотермический при постоянной массе воздуха, поэтому описывается уравнением

$$(P_0 + h - z)(z_0 - z) = P_0 z_0 . \qquad (9)$$

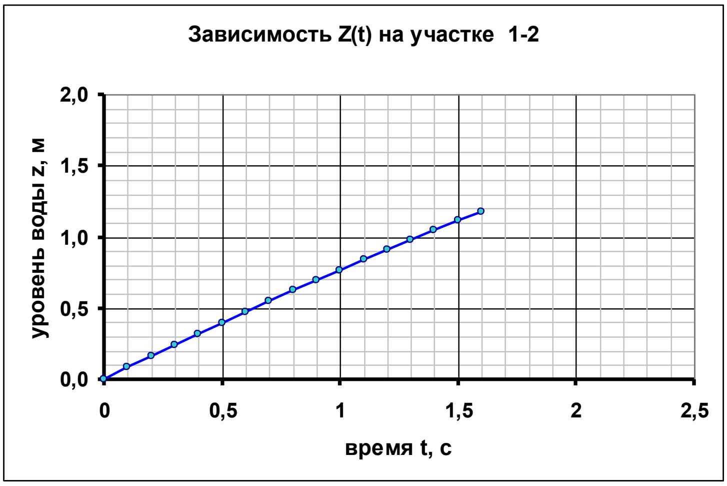
Из этого квадратного уравнения, которое после раскрытия скобок имеет стандартный вид

$$z^2 - z(P_0 + z_0 + h) + hz_0 = 0 \qquad (10)$$

находим зависимость высоты уровня воды цилиндре от времени

$$\boxed{z = \frac{(P_0 + z_0 + vt)}{2} - \sqrt{\frac{(P_0 + z_0 + vt)^2}{4} - vtz_0} \qquad (11)}$$

График этой зависимости показан на рисунке.



1.5 Для расчета характеристик воздуха в момент времени t_1 следует принять во внимание, что в этот момент открывается клапан, т.е. давление достигает значения

$$P_1 = P_0 + \delta P = 12 м. \qquad (12)$$

Тогда из уравнения (8) можно получить линейное уравнение

$$(P_0 + \delta P)(z_0 - z_1) = P_0 z_0. \qquad (13)$$

Из которого легко находятся все необходимые параметры воздуха в состоянии 2:

$$z_1 = z_0 - \frac{P_0}{P_0 + \delta P} z_0 = \frac{\delta P}{P_0 + \delta P} z_0 = 1{,}17 м$$

$$\delta P = h_1 - z_1 \quad \Rightarrow \quad h_1 = z_1 + \delta P = \frac{\delta P}{P_0 + \delta P} z_0 + \delta P = 3{,}17\ м \qquad (14)$$

$$h_1 = vt_1 \quad \Rightarrow \quad t_1 = \frac{1}{v}\left(\frac{\delta P}{P_0 + \delta P} z_0 + \delta P\right) = 1{,}58 c$$

1.6

<u>*Участок 1-2.*</u> В момент времени t_2 клапан откроется и воздух начнет выходить в атмосферу, при это разность давлений с наружи и внутри будет оставаться постоянной и равной δP. Давление внутри, высота уровня воды внутри цилиндра и вне его будут описываться линейными функциями

$$h(t) = vt$$
$$P(t) = P_0 - \delta P = const \qquad (15)$$
$$z(t) = h - \delta P = h - vt$$

В точке 3 параметры воздуха станут равными

$$t_2 = \frac{T}{4} = 2{,}5 c$$
$$h_2 = A = 5{,}0 м$$
$$z_2 = A - \delta P = 3{,}0 м \qquad (16)$$
$$P_2 = P_0 - \delta P = 8{,}0 м$$

<u>*Участок 2-3.*</u> Далее уровень воды вне цилиндра начнет уменьшаться, следовательно, начнет понижаться и уровень воды в рабочем цилиндре. Давление воздуха внутри уменьшится.

поэтому клапан закроется. Поэтому процесс 3-4 будет изотермическим при постоянной массе газа, т.е. описываться уравнением

$$(P_0 + h - z)(z_0 - z) = (P_0 + \delta P)(A - \delta P) \tag{17}$$

Высота z будет уменьшаться до тех пор, пока давление внутри цилиндра не станет равным

$$\boxed{P_3 = P_0 - \delta P = 8{,}0\text{м}} \tag{18}$$

В этот момент воздух начнет поступать в цилиндр. Теперь из уравнения (17) с учетом выражения (18) можно рассчитать все характеристики состояния воздуха в точке 3:

$$\begin{aligned}
&(P_0 - \delta P)(z_0 - z_3) = (P_0 + \delta P)(A - \delta P) \quad \Rightarrow \quad z_3 = z_0 - \frac{(P_0 + \delta P)(A - \delta P)}{P_0 - \delta P} = 2{,}5\text{м} \\
&P_0 + h_3 - z_3 = P_0 - \delta P \quad \Rightarrow \quad h_3 = z_3 - \delta P = 0{,}50\text{м} \\
&h_3 = A - v\Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{A - h_3}{v} = 2{,}25c \quad \Rightarrow \quad t_3 = \frac{T}{4} + \Delta t = 4{,}75c
\end{aligned} \tag{19}$$

<u>Участок 3-4.</u> Далее процесс будет идти при постоянной разности давлений, вплоть до того момента пока уровень воды не начнет снова повышаться, т.е. на в точках 5 и 6 значения h определяются заданным в условии графиком. а значения z и P рассчитываются «в уме» по формулам

$$\begin{aligned} P_4 &= P_0 - \delta P \\ z_4 &= h_4 + \delta P \end{aligned}. \tag{20}$$

Численные значения параметров в этой точке равны:

$$\boxed{t_4 = 7{,}5c; \quad h_4 = -A = -5{,}0\text{м}; \quad z_4 = -A + \delta P = -3{,}0\text{м}; \quad P_5 = 8{,}0\text{м}} \tag{21}$$

<u>Участок 4-5.</u> На участке 4-5 (при подъеме уровня воды) клапан опять закроется, масса воздуха в цилиндре будет неизменной, давление будет изотермически возрастать до открытия клапана (когда давление станет равным $P_5 = P_0 + \delta P$). Для определения параметров в состоянии 5 следует воспользоваться системой уравнений, которые аналогичны уравнениям, записанным ранее:

$$\begin{aligned}
&(P_0 + \delta P)(z_0 - z_5) = (P_0 - \delta P)(z_0 - z_5) = (P_0 - \delta P)(z_0 + A - \delta P) \\
&(P_0 + \delta P) = P_0 + h_5 - z_5
\end{aligned} \tag{21}$$

Из этой системы без труда находим:

$$\begin{aligned}
z_5 &= z_0 - \frac{P_0 - \delta P}{P_0 + \delta P}(z_0 + A - \delta P) = 0{,}33\text{м} \\
h_5 &= z_5 + \delta P = 2{,}3\text{м}
\end{aligned}. \tag{22}$$

Момент времени, когда уровень воды достигнет значения h_7, находится из закона движения

$$-A + v(t_5 - t_4) = h_5. \tag{23}$$

Из которого вычисляем

$$\boxed{t_5 = t_4 + \frac{A + h_5}{v} = 11{,}2c} \tag{24}$$

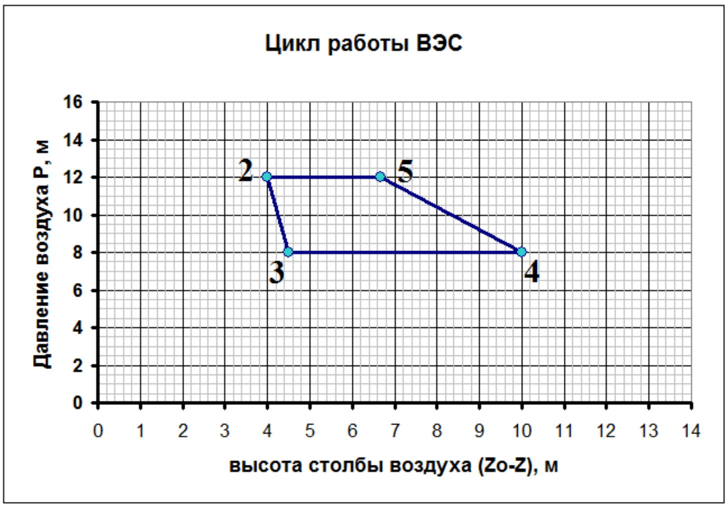
Далее значения параметров h, z, P будут периодически повторяться. Т.е. значения в точке 6 совпадают со значениями в точке 2 и т.д. Для расчета времен следует прибавить период волны, т.е. 10 с. Все эти значения переписаны в Таблице 1.

Таблица 1. Узловые точки

Номер точки	время t, с	высота воды снаружи h, м	высота воды внутри z, м	Давление внутри P, м
0	0	0	0	10
1	1,6	3,2	1,2	12
2	2,5	5,0	3,0	12
3	4,8	0,5	2,5	8,0
4	7,5	-5,0	-3,0	8,0
5	11,2	2,3	0,33	12
6	12,5	5,0	3,0	12
7	14,8	0,5	2,5	8,0
8	17,5	-5	-3	8,0

График рассчитанной зависимости (все данные, необходимые для построения графика приведены в Таблице 1) показан ниже.

1.7 Рассчитанные значения параметров позволяют построить диаграмму рабочего цикла рассматриваемой установки. Результат построения – на рисунке.



1.8 Циклический процесс начинается в точке 2, конец цикла – точка 5.

Часть 2. Энергетические характеристики ВЭС.

2.1 Генератор вырабатывает электроэнергию, когда воздух проходит через турбину в любом направлении. Это происходит на участках цикла 3-4 (воздух всасывается внутрь рабочего цилиндра) и 5-6 (воздух выталкивается из цилиндра).

2.2 Воздух вытесняется из цилиндра на участке 5-6. На этом участке давление воздуха внутри цилиндра постоянно и равно $P = P_0 + \delta P$. Объем вытесненного воздуха равен

$$\Delta V = S(z_6 - z_5) \tag{25}$$

Масса вытесненного воздуха рассчитывается с помощью уравнения состояния

$$P\Delta V = \frac{\Delta m}{M} RT \ . \tag{26}$$

При численных расчетах необходимо все величины выразить в системе СИ (прежде всего это касается давления). Подставляя эти численные значения, находим

$$\boxed{\Delta m = \frac{MS(P_0 + \delta P)(z_6 - z_5)}{RT} = \frac{29 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль} \cdot 12 \cdot 10^4\, Па \cdot (3{,}0 - 0{,}33)м}{8{,}31 \frac{Дж}{моль \cdot К} \cdot (273 + 7{,}0)К} = 4{,}0\, кг} \tag{27}$$

2.3 Для расчета кинетической энергии необходимо найти скорость движения выходящего газа. Так как давление воздуха в цилиндре и выходной трубе одно и то же, то плотность воздуха остается постоянной, поэтому справедливо уравнение

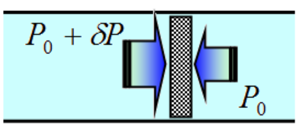
$$Sv = sv_1 \ . \tag{28}$$

где v - найденная ранее скорость подъема воды в цилиндре, v_1 - скорость воздуха в выходной трубе. Таким образом, кинетическая энергия выходящего воздуха равна

$$\boxed{E_{кин.} = \frac{\Delta m}{2} v_1^2 = \frac{\Delta m}{2}\left(\frac{S}{s} v\right)^2 = \frac{4{,}0кг}{2}\left(10 \cdot 2{,}0 \frac{м}{с}\right)^2 = 0{,}80 \cdot 10 Дж \ .} \tag{29}$$

<u>Примечание</u>. В реальности при протекании газа давления газа в цилиндре и в выходной трубе должны различаться, но по условию задачи этой разностью следует пренебрегать.

2.4 Можно считать, что со стороны цилиндра на турбину действует сила пропорциональная давления в цилиндре, а с другой – пропорциональная атмосферному давлению. Поэтому работа, совершенная над турбиной генератора, должна рассчитывать по формуле



$$A_{5-6} = \delta P \cdot \Delta V = \delta PS(z_6 - z_5) \tag{30}$$

Подставим численные значения и проведем расчет

$$\boxed{A_5 = \delta PS(z_6 - z_5) = 2{,}0 \cdot 10^4\, Па \cdot 10 м^2 \cdot 2{,}7 м = 5{,}4 \cdot 10^5\, Дж} \tag{31}$$

2.5 За полный цикл работа совершается и при всасывании воздуха (на участке 3-5). ЕЕ можно рассчитать по формуле аналогичной формуле (30):

$$A_{3-4} = \delta P \cdot \Delta V = \delta PS(z_3 - z_4) = 2{,}0 \cdot 10^4\, Па \cdot 10 м^2 \cdot 5{,}5 м = 11 \cdot 10^5\, Дж \tag{32}$$

Учитывая коэффициент полезного действия электрогенератора, для средней мощности установки получаем выражение

$$\boxed{N = \frac{\eta_0 \left(A_{3-4} + A_{5-6}\right)}{T} = \frac{0{,}60 \cdot \left(11 + 5{,}4\right) \cdot 10^4\,Дж}{10с} = 9{,}8 \cdot 10^4\,Вт\,. \qquad (33)}$$

Округляя, получаем мощность данной установки – примерно 100 киловатт.