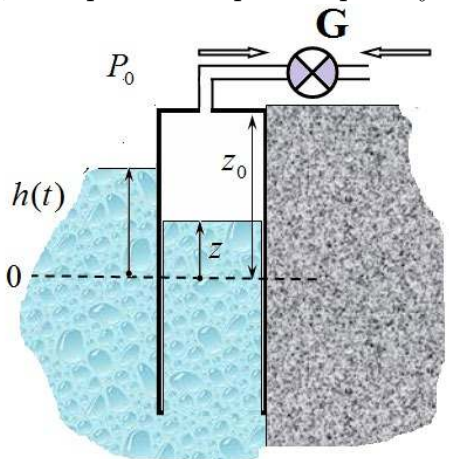


Условие

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.



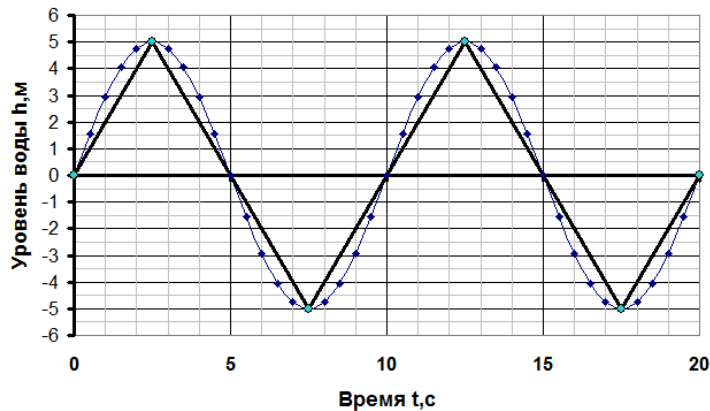
Упрощенная схема установки показана на рисунке. Прочный открытый снизу цилиндр вертикально закреплен у береговой скалы. Морская вода может поступать в этот рабочий цилиндр снизу. В верхней части трубы находится воздух. Выходная труба соединяет цилиндр с электрогенератором G , выходная труба генератора 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, может рассчитываться 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 рабоче-

го 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.

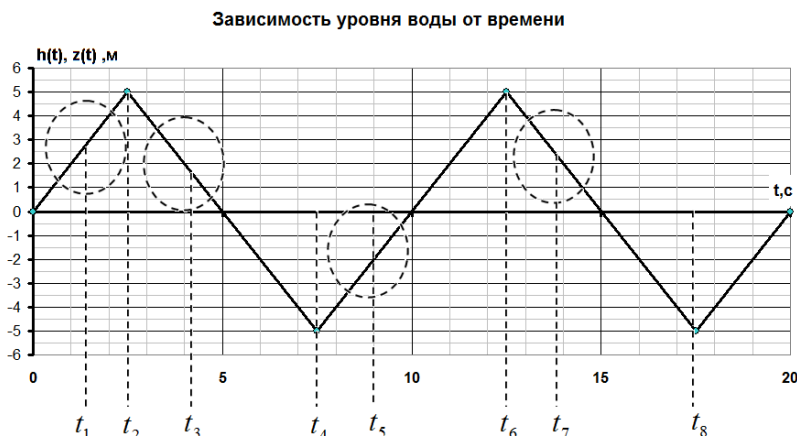
Далее будем считать, что амплитуда волн остается постоянной и равной $A = 5,0\text{ м}$.

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 генератора 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.



Республиканская физическая олимпиада
2025 года
(Заключительный этап)
Теоретический тур