



*Группа секретных физиков*



*Республиканская физическая  
олимпиада  
2017 года  
(Заключительный этап)  
Теоретический тур*

*Гродно  
2017*

9 класс

**Задание 9-1. «Разминка»**

*Данное задание состоит из 2 не связанных между собой задач.*

**Задача 1.1**

В вашем распоряжении имеется переменный резистор (его сопротивление  $R_0$  можете задавать произвольным) регулируемый источник напряжения (его напряжение  $U_0$  можете задавать произвольным), идеальный вольтметр, терморезистор. Электрическое сопротивление терморезистора  $R$  зависит от температуры  $t$  (в градусах Цельсия) в диапазоне от  $20^\circ\text{C}$  до  $70^\circ\text{C}$  по закону

$$R = \frac{a - bt}{t}, \quad (1)$$

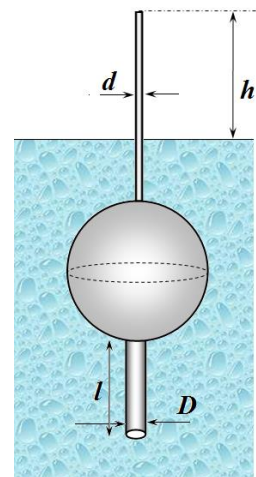
где  $a = 5,2 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{град}$ ,  $b = 800 \text{ Ом}$  - постоянные величины.

Предложите электрическую схему, позволяющую измерять температуру так, чтобы показания вольтметра в милливольтках равнялись температуре терморезистора в градусах Цельсия. Укажите численные значения сопротивления переменного резистора  $R_0$  и напряжения источника  $U_0$ , которые необходимо использовать в вашей схеме.

**Задача 1.2**

Для измерения плотности жидкости используется простой прибор, который называется *ареометром*.

В данной задаче рассматривается ареометр, состоящий из сферического баллона, объем которого равен  $V_0$ . К нижней части баллона прикреплена тонкостенная металлическая трубка, внутренний диаметр которой равен  $D$ , длина  $l$ , с открытым нижним концом и закрытым верхним. К верхней части баллона прикреплен легкий стержень диаметра  $d$ .



К верхней части баллона прикреплен легкий стержень диаметра  $d$ .

1.2.1 Ареометр аккуратно вертикально помещают в горячую воду. Ареометр приходит в состояние равновесия, при этом баллон оказывается полностью погруженным в воду, а над поверхностью воды стержень выступает на высоту  $h$ . Вода начинает медленно остывать. Что будет происходить с ареометром (всплывать, или погружаться) при остывании воды? Найдите изменение высоты стержня над уровнем воды

$\frac{\Delta h}{\Delta t^\circ}$  при изменении температуры на малую величину  $\Delta t^\circ$ .

1.2.2 Ареометр достают из воды, плотно закрывают нижний конец трубки и опять погружают в горячую воду. Что будет происходить с ареометром (всплывать, или погружаться) при остывании воды в этом случае? Найдите изменение высоты стержня над уровнем воды  $\frac{\Delta h}{\Delta t^\circ}$  при изменении температуры на малую величину  $\Delta t^\circ$  при закрытой трубке.

*Подсказка. При изменении температуры изменение объемов тел подчиняется формуле*

$$\Delta V = V_0 \alpha \Delta t^\circ. \quad (2)$$

Где  $V_0$  - начальный объем тела,  $\Delta V$  - изменение объема при изменении температуры на величину  $\Delta t^\circ$ ,  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения вещества. Считайте, что коэффициенты теплового расширения воды  $\alpha_1$  и воздуха  $\alpha_2$  известны, причем  $\alpha_2 \gg \alpha_1$ .

*Изменением объема всех частей ареометра можно пренебречь. Также считайте, что объем баллона значительно больше объемов трубки и стержня.*

## Задача 9-2. Векторная кинематика

Исследовательский космический аппарат сделал снимки выбросов вещества из гейзера некоторой планеты. Снимки делались с интервалом в одну секунду, однако из-за технического сбоя сохранилось только три снимка: в момент времени  $t_0 = 0,0$  с, в момент времени  $t_1 = 1,0$  с и в момент времени  $t_4 = 4,0$  с. Положения одного из точечных объектов в данные моменты времени показаны на рис.1. Кроме того, известно (из показаний других датчиков), что регистрируемый объект упал на поверхность планеты в момент времени  $t_5 = 5,0$  с. Также известно, что точка падения и точка вылета находятся на одной высоте. Отметим, что момент времени  $t_0 = 0,0$  с не совпадает с момент вылета рассматриваемого объекта из жерла гейзера.

Поверхность планеты в кадр не попала. Атмосфера на планете отсутствует. Масштаб рисунка: длина стороны клеточки равна  $1,0$  м.

*При решении данной задачи допускается использование промежуточных численных расчетов. Все построения выполняйте на выданных Вам бланках (они одинаковы). Выполнение пп. 1-2 проведите на первом бланке, пп. 3-6 на втором бланке<sup>1</sup>. расчеты и комментарии выполняйте в тетради.*

По данному снимку вам необходимо найти кинематические характеристики движения объекта и восстановить траекторию движения.

1. Найдите вектор ускорения свободного падения  $\vec{g}$  на данной планете: рассчитайте его модуль; постройте на бланке в соответствующем масштабе вектор  $\vec{S}_1 = \vec{g}t_1^2$ .
2. Определите вектор скорости  $\vec{v}_0$  объекта в момент времени  $t_0 = 0,0$  с: рассчитайте его модуль; постройте на бланке вектор  $\vec{S}_2 = \vec{v}_0 t_1$

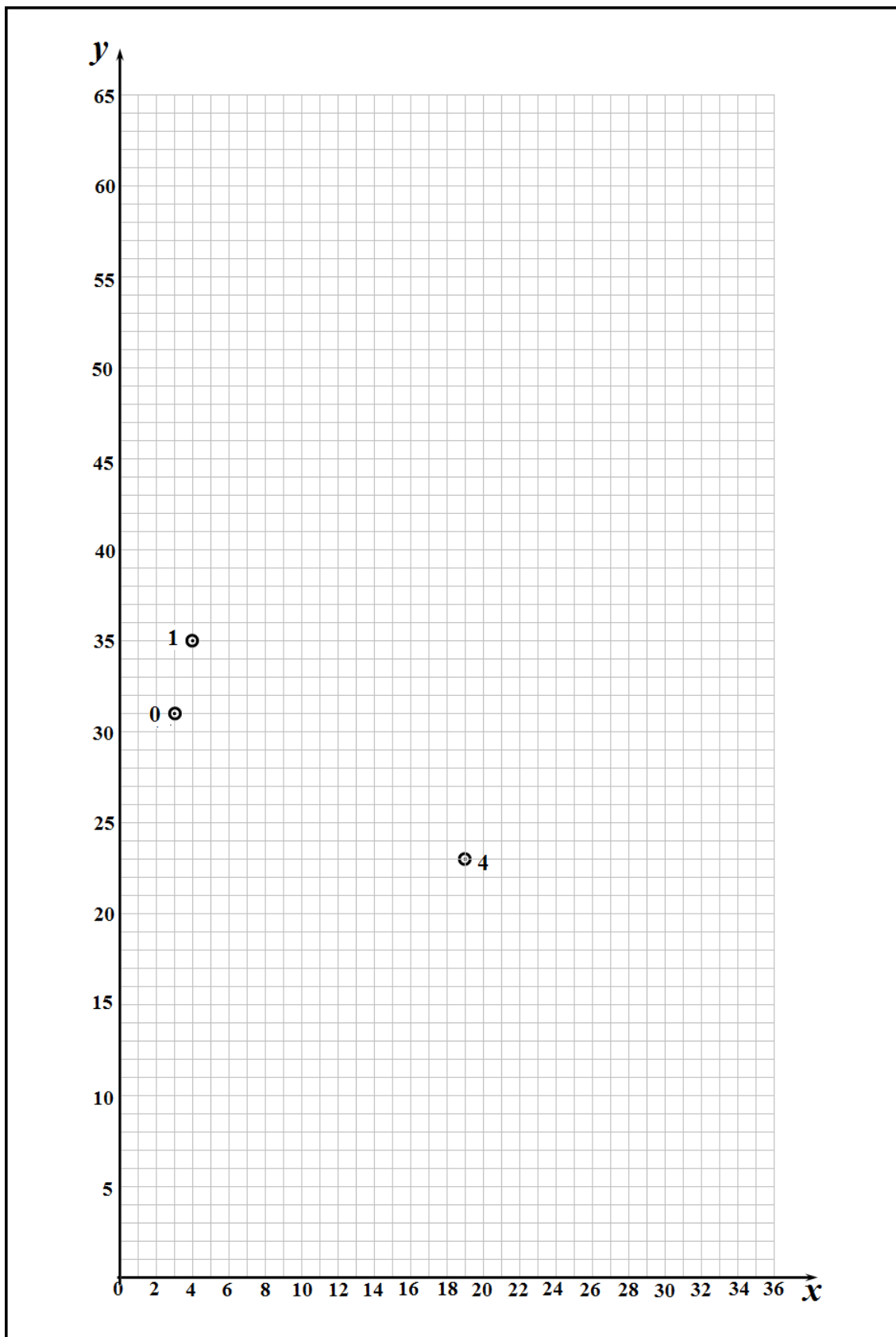
Подсказка. Далее рекомендуем все расчеты построения проводить, используя построенные векторы  $\vec{S}_1$  и  $\vec{S}_2$ .

3. Найдите и укажите на бланке точку падения рассматриваемого объекта.
4. Постройте на бланке линию горизонта.
5. Постройте всю траекторию полета объекта (достаточно указать его положения с интервалом в 1 с).
6. Постройте (с точностью  $\pm 0,2$  м) на бланке положение гейзера (точку вылета объекта).
7. Постройте (с точностью  $\pm 0,5$  м) на бланке положение верхней точки траектории.

---

<sup>1</sup> Бланки одинаковы, поэтому здесь приводится только один.

Бланк 1





### Задача 9-3. Опыты Джоуля

Долгое время (более 200 лет с начала ее изучения) природа теплоты была не известна. Основной теорией теплоты являлась теория *теплорода*. Согласно этой теории теплота есть некая невесомая жидкость, заполняющая все нагретые тела; передача теплоты есть простое перетекание теплорода из одного тела к другому и т.д.

Только в середине XIX века утвердилась «механическая теория теплоты» согласно этой теории теплота (точнее, тепловая или внутренняя энергия) есть кинетическая энергия движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия.

Важнейшую роль в развитии механической теории теплоты сыграли тщательные эксперименты, выполненные английским физиком Дж. П. Джоулем, результаты которых были опубликованы в 1847 году. Основная цель этих экспериментов – измерение, так называемого, *механического эквивалента теплоты*.

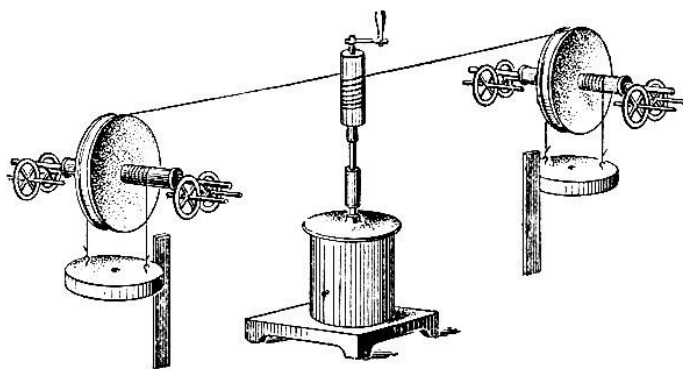
Еще когда природа теплоты была неизвестна, для ее измерения была введена специальная единица измерения – калория, количество теплоты которое требуется для нагревания 1 грамма воды на 1 градус Цельсия. Следовательно, теплоемкость воды равна

$c_0 = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$  (точно, по определению). Но так, как теплота есть мера энергии, то она должна

измеряться в единицах измерения энергии и работы (в системе СИ – это Джоуль). Таким образом, основной задачей Дж. П. Джоуля являлось установление количественного соотношения между единицей теплоты *калорией* и единицей механической энергии *Джоулем*<sup>2</sup>.

Схема установки Джоуля показана на рисунке. В медном баке с водой находилась система латунных лопастей, которые приводились во вращение с помощью системы опускающихся грузов, нитей и блоков.

Высота, с которой опускались грузы, их масса легко измеряемы. Также тщательно измерялось изменение температуры воды из-за вязкого трения лопастей. По этим экспериментальным данным можно рассчитать искомую величину механического эквивалента теплоты.



0. Пусть грузы общей массы  $m$  опустились на высоту  $h$ , при этом вода массы  $m_0$  нагрелась на  $\Delta t$  градусов Цельсия. Пренебрегая всеми теплоты и механической энергии, получите формулу для удельной теплоемкости воды  $c_0$ , выраженной в единицах механической энергии.

<sup>2</sup> Конечно, сам Дж. П. Джоуль использовал английскую систему мер. Так механическую работу он измерял в футо-фунтах – энергия которая требуется, чтобы поднять 1 фунт на высоту в 1 фут, температура измерялась в градусах Фаренгейта, масса измерялась в гранах и т.д. Для упрощения вашей работы все численные данные, приведенные в условии данной задачи (взяты непосредственно из работы Дж. П. Джоуля) переведены в привычные для вас единицы измерения.

Однако такой подход приводит к слишком большим систематическим ошибкам. Дж. П. Джоуль был великолепным экспериментатором, поэтому в своей работе он учел многочисленные поправки, рассчитать которые по данным Дж. П. Джоуля предстоит и вам. Вопросы задачи выделены рамками. В ответе на каждый вопрос приведите расчетную формулу и численный результат с необходимым числом значащих цифр.

### 1. Теплоемкость системы.

Масса медного бака  $m_1 = 1655,0 \text{ г}$ . Лопастей состоят из латуни (сплава меди и цинка) и содержат  $m_2 = 969,90 \text{ г}$  меди и  $m_3 = 254,85 \text{ г}$  цинка. Масса воды в баке  $m_0 = 6041,11 \text{ г}$ . Отношение удельной теплоемкости меди к удельной теплоемкости воды равно

$$\frac{c_{Cu}}{c_w} = 0,09512, \text{ а отношение удельной теплоемкости цинка к удельной теплоемкости воды}$$

$$\frac{c_{Zn}}{c_w} = 0,09555.$$

1. Найдите эффективную массу воды  $M_0$ , то есть массу воды, которая имеет такую же теплоемкость, как теплоемкость бака с водой и лопастями.

### 2. Нагрев воды и теплообмен с окружающей средой.

Процитируем работу Дж. П. Джоуля. *Метод проведения опытов состоял в следующем. Определялась температура прибора трения<sup>3</sup>, грузы удерживались в подвешенном состоянии, ... определялось точное положение грузов над землей, вал освобождался и ему давали возможность вращаться до тех пор, пока грузы не достигали вымощенного плитам пола лаборатории, опускаясь примерно на 63 дюйма. ... После того, как эта процедура повторялась **20 раз**, эксперимент завершался новым наблюдением температуры прибора. Средняя температура лаборатории определялась в начале, середине и при завершении каждого эксперимента. Непосредственно перед каждым опытом или сразу после него я проводил проверку воздействия передачи теплоты телу из атмосферы, или в обратном направлении... При этих проверках положение аппарата, количество содержащейся в нем воды, **время проверки**, метод наблюдения термометров, положение экспериментатора – короче говоря, все условия, за исключением того, что аппарат покоился, были такими же, как и в экспериментах, в которых наблюдался эффект трения.*

Результаты одной из серий экспериментов приведены в Таблице 1. Все температуры приведены в градусах Цельсия

Эксперимент	Общая высота опускания грузов (м)	Средняя температура воздуха	Температура прибора в начале опыта	Температура прибора в конце опыта
С вращением	31,927	14,277	12,843	13,208
Без вращения	0	14,371	13,208	13,268

2.1 Рассчитайте по этим данным, на сколько градусов нагрелась бы вода, если бы не было теплообмена с окружающей средой.

<sup>3</sup> Имеется в виду бака с водой.

### 3. Ускорение свободного падения и потери механической энергии.

По утверждению Дж. П. Джоуля кинетическая энергия тела, движущегося со скоростью  $v = 2,420 \frac{\text{дюйм}}{с}$ , равна потенциальной энергии того же тела, поднятого на высоту  $h = 0,00760 \text{дюйм}$ .

3.1 Рассчитайте по этим данным ускорение свободного падения в лаборатории. (1 дюйм = 2,540см).

Общая масса опускающихся грузов равна  $M_1 = 26317,9г$ . Для учета сил трения в осях блоков и оси вала были проведены дополнительные измерения. Если отсоединить лопасти, то для того, чтобы грузы пришли в движение на один из них необходимо положить дополнительный перегрузок массы  $\Delta m = 183,8г$ .

3.2 Найдите механическую энергию (в Джоулях) опускающихся грузов, пошедшую на нагревания бака с водой.

### 4. Механический эквивалент теплоты.

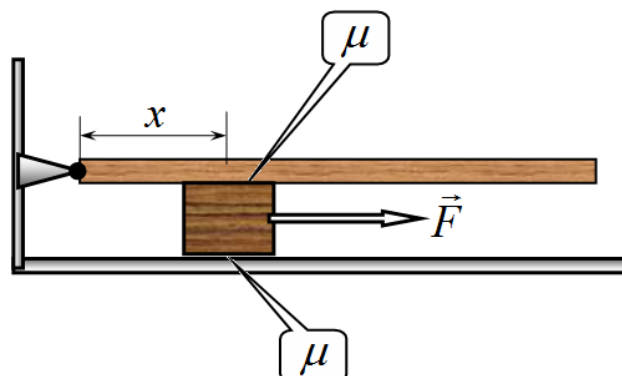
4. Используя все приведенные и полученные вами данные, рассчитайте, чему равна 1 калория в Джоулях.

## Задача 10-1. «Разминка»

Данное задание состоит из двух несвязанных между собой задач.

## Задача 1.1

Однородная доска массы  $M$  и длины  $l$  шарнирно прикреплена к стене, так что может вращаться вокруг оси шарнира в вертикальной плоскости. Доска опирается на брусок массы  $m$  так, что при движении этого бруска доска все время остается в горизонтальном положении. Коэффициенты трения между бруском и доской и между бруском и полом одинаковы и равны  $\mu$ .



Найдите зависимость модуля горизонтальной силы  $\vec{F}$ , которую необходимо прикладывать к бруску, что он мог двигаться с постоянной скоростью, от положения бруска  $x$ . Постройте график данной зависимости. Оцените, какую минимальную работу необходимо совершить, чтобы медленно вытянуть брусок из-под доски, если вначале он находился на расстоянии  $x_0 = \frac{l}{4}$  от шарнирного крепления доски.

Считайте, что размеры бруска значительно меньше длины доски.

## Задача 1.2

При протекании газа по трубе на него действуют силы вязкого трения со стороны стенок трубы. Расход газа (объем газа, протекающего через поперечное сечение трубы в единицу времени) определяется формулой Пуазейля

$$q = \frac{r^4 \Delta P}{8\pi\eta l}, \quad (1)$$

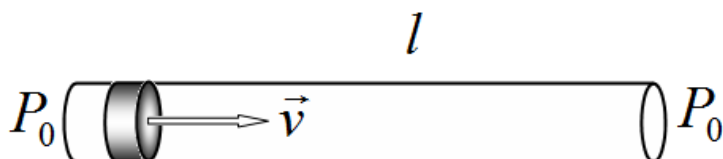
где  $l$  - длина трубы,  $r$  - ее внутренний радиус,  $\Delta P$  - разность давлений на концах трубы,  $\eta$  - коэффициент вязкости протекающего газа.

**1.2.1** Воздух пропускают через тонкую трубку, прикладывая к ее концам разность давлений  $\Delta P_0$ . При этом расход газа равен  $q_0$ . Чему будет равен расход газа через трубку такой же длины, но в два раза большего радиуса, при той же разности давлений на ее концах?

Две описанных трубки соединены последовательно. Чему будет равен расход газа через эту составную трубку, если к ее концам приложить такую же разность давлений  $\Delta P_0$ ?

**1.2.2** В очень длинной тонкостенной медной трубе длины  $l$  и радиуса  $r$  находится воздух. В трубу вставляют поршень, который может двигаться по трубе. Какую работу необходимо совершить, чтобы с помощью поршня вытолкнуть весь воздух из трубы, двигая его с постоянной скоростью  $v$ , значительно меньшей скорости звука в воздухе?

Считайте, что на свободном конце трубы и за поршнем давление постоянно и равно  $P_0$ . Трением поршня о стенки трубы можно пренебречь.

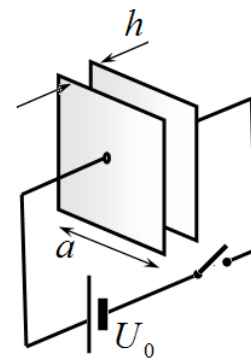


Во всех пунктах задачи считайте, что избыточное давление мало, так, что изменением объема газа при изменении давления можно пренебречь.



## Задача 10-2. «Конденсатор»

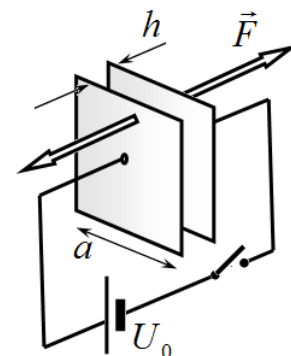
Плоский конденсатор состоит из двух металлических пластин, имеющих форму квадрата со стороной  $a$ . Расстояние между пластинами равно  $h$  и значительно меньше их размеров ( $h \ll a$ ). Конденсатор подключен через ключ к источнику постоянного напряжения  $U_0$ .



0. Запишите формулу для емкости такого конденсатора  $C_0$ . В дальнейшем можете использовать эту величину как известную.

### Часть 1.

Конденсатор полностью заряжают и ключ отключают. После этого пластины медленно раздвигают, прикладывая к ним силы, направленные перпендикулярно пластинам. В результате расстояние между пластинами увеличилось в 2 раза.



1.1 Какую минимальную силу следует приложить к пластинам, что их раздвинуть? Как зависит эта сила от расстояния между пластинами?

1.2 Используя найденное выражение для силы, рассчитайте какую минимальную работу необходимо совершить, чтобы расстояние между пластинами увеличилось в два раза?

1.3 Найдите изменение энергии конденсатора при увеличении расстояния между пластинами в 2 раза.

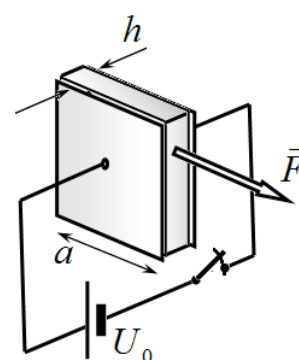
1.4 Выполняется ли в данной системе закон сохранения энергии? Ответ обоснуйте: . укажите все виды изменяющейся энергии, покажите, что «баланс энергий» сходится.

### Часть 2.

2.1 – 2.4 Ответьте на все вопросы части 1, при условии, что ключ не размыкают (т.е. конденсатор оказывается все время подключенным к источнику).

### Часть 3.

Пластины снова устанавливают на расстоянии равном  $h$ . Между ними располагают плоскую диэлектрическую пластинку (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ), размеры которой равны размерам пластин конденсатора, а толщина равна  $h$ . Конденсатор подключают к источнику напряжения и далее не отключают. После этого пластинку достают из конденсатора.



3.1 Какую минимальную силу следует приложить к пластинке, чтобы извлечь ее из конденсатора? Как зависит эта сила от смещения пластинки? Качественно покажите механизм возникновения силы, стремящийся втянуть пластинку внутрь конденсатора.

## Задача 10-3 Цикл Ренкина

Несмотря на современное многообразие способов получения электроэнергии с помощью сжигания различных типов топлива, использования солнечного света или энергии ядерных реакции, в подавляющем большинстве электростанций указанного типа используются паросиловые установки. В таких установках энергия, получаемая в результате сжигания топлива или выделяемая во время радиоактивного распада, направляется на подогрев и вскипание воды, вследствие чего водяной пар вращает турбину электрогенератора. Термодинамические процессы в большинстве подобных механизмов происходят в соответствии с одной из вариаций цикла Ренкина.

Цикл Ренкина является термодинамическим циклом с двухфазным рабочим телом, то есть во время процесса которого осуществляется фазовый переход жидкости в пар и наоборот. Стоит также упомянуть, что холодильники и кондиционеры, использующие фреон, работают на основе обратного цикла Ренкина. В данной задаче вам предлагается изучить цикл Ренкина, рассматривая в качестве рабочего тела некоторую приближенную модель водяного пара.

В качестве модели будем считать, что водяной пар является идеальным газом, молярная теплоемкость которого при постоянном объеме равна  $c_V = \frac{9}{2}R$ , где  $R$  – универсальная газовая постоянная. Также считайте, что плотность воды в жидком состоянии постоянна, то есть не зависит ни от давления, ни от температуры.

Для решения задачи вам может пригодиться график зависимости давления насыщенного пара воды от температуры, представленный на отдельном бланке. При желании вы можете делать любые пометки и построения на данном графике. По окончании работы вложите данный бланк в тетрадь с решением. **Ни в коем случае не подписывайте бланк-вкладыш с графиком!**

Все процессы, происходящие с рабочим телом, считайте квазистационарными, то есть достаточно медленными. На некотором этапе рабочее тело будет совершать адиабатический процесс, то есть процесс без теплообмена с окружающей средой. Известно, в квазистационарном адиабатическом процессе с идеальным газом сохраняется величина  $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$ , то есть  $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \text{const}$ , где  $p$  – давление идеального газа,  $T$  – его температура,  $\gamma$  – показатель адиабаты, а «const» обозначает некоторую постоянную. Показатель адиабаты  $\gamma$  – безразмерная величина, для идеального газа равная отношению  $c_p/c_V$  теплоемкостей при

постоянном давлении и объеме, соответственно.

Наконец, напомним вам некоторые физические постоянные (никто не гарантирует, что все из них вам понадобятся):

Универсальная газовая постоянная:  $R = 8,31$  Дж/(К·моль)

Постоянная Авогадро:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>

Постоянная Больцмана:  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

Молярная масса воды:  $M = 1,80 \cdot 10^{-2}$  кг/моль

Удельная теплоемкость воды:  $c_B = 4200$  Дж/(кг·°С)

Плотность воды:  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup>

Нормальное атмосферное давление:  $p_{\text{атм}} = 1,01 \cdot 10^5$  Па

Температура кипения воды при  $p_{\text{атм}}$ :  $T_{\text{кип}} = 100$  °С = 373 К

Удельная теплота парообразования воды при 100 °С:  $L_{100\text{ °С}} = 2,26$  МДж/кг

### Часть А. Пройдемся по циклу

В данной задаче с водой и водяным паром будет происходить следующий цикл, схематически изображенный на рисунке.

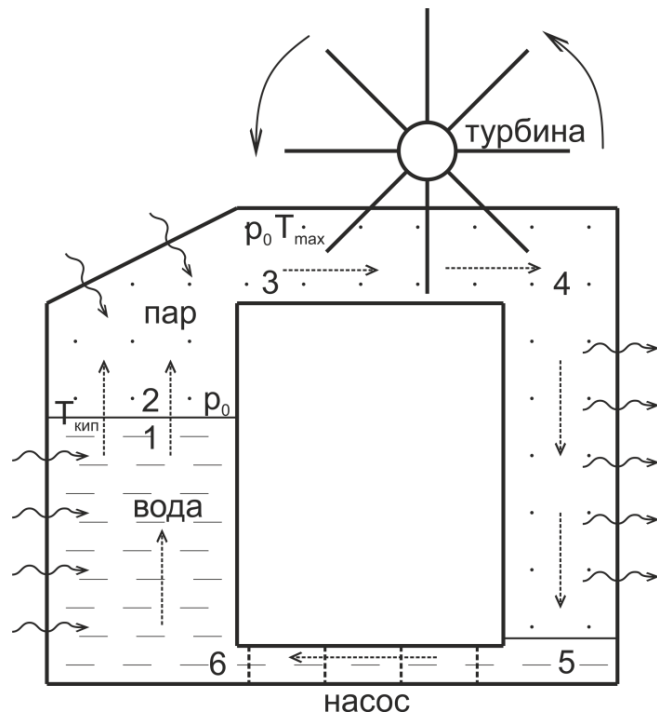


Рисунок 1 - Схема цикла

Первоначально (точка 1 на рисунке) вода находится в резервуаре при температуре кипения  $T_{\text{кип}}$ , а внешнее давление равно нормальному атмосферному  $p_{\text{атм}}$ . К воде подводится теплота, вследствие чего некоторая часть воды выкипает, превращаясь в водяной пар (точка 2). Получающийся водяной пар изобарно нагревают до температуры  $T_{\text{max}} = 120^\circ\text{C}$  (точка 3). Далее разогретый пар адиабатически раскручивает турбину, вращая ротор электрогенератора. Параметры турбины подобраны таким образом, чтобы давление пара упало настолько, насколько это возможно при условии, чтобы пар еще не начал конденсироваться (точка 4). После этого в конденсаторе весь пар изотермически переводят в жидкое агрегатное состояние (точка 5). Наконец, полученную воду адиабатически насосом перекачивают в исходный резервуар (точка 6), после чего ее нагревают до температуры кипения  $T_{\text{кип}}$  (точка 1), замыкая цикл.

**A1.** Получите выражение для количества теплоты, которое необходимо подвести, чтобы испарить некоторую порцию воды в процессе 1-2, в зависимости от массы  $m$  этой порции.

**A2.** Получите выражение для изменения внутренней энергии порции воды в процессе вскипания 1-2 в зависимости от массы  $m$  этой порции.

Далее вместо слов «в зависимости от массы  $m$  этой порции» будем просто указывать «( $m$ )» после вопроса, где это необходимо.

**A3.** Получите выражение для количества теплоты, необходимой для изобарного нагревания полученной порции водяного пара до температуры  $T_{\text{max}} = 120^\circ\text{C}$  в процессе 2-3. ( $m$ )

**A4.** Определите конечное давление пара после раскручивания турбины 3-4.

**A5.** Определите температуру конденсации в процессе 4-5.

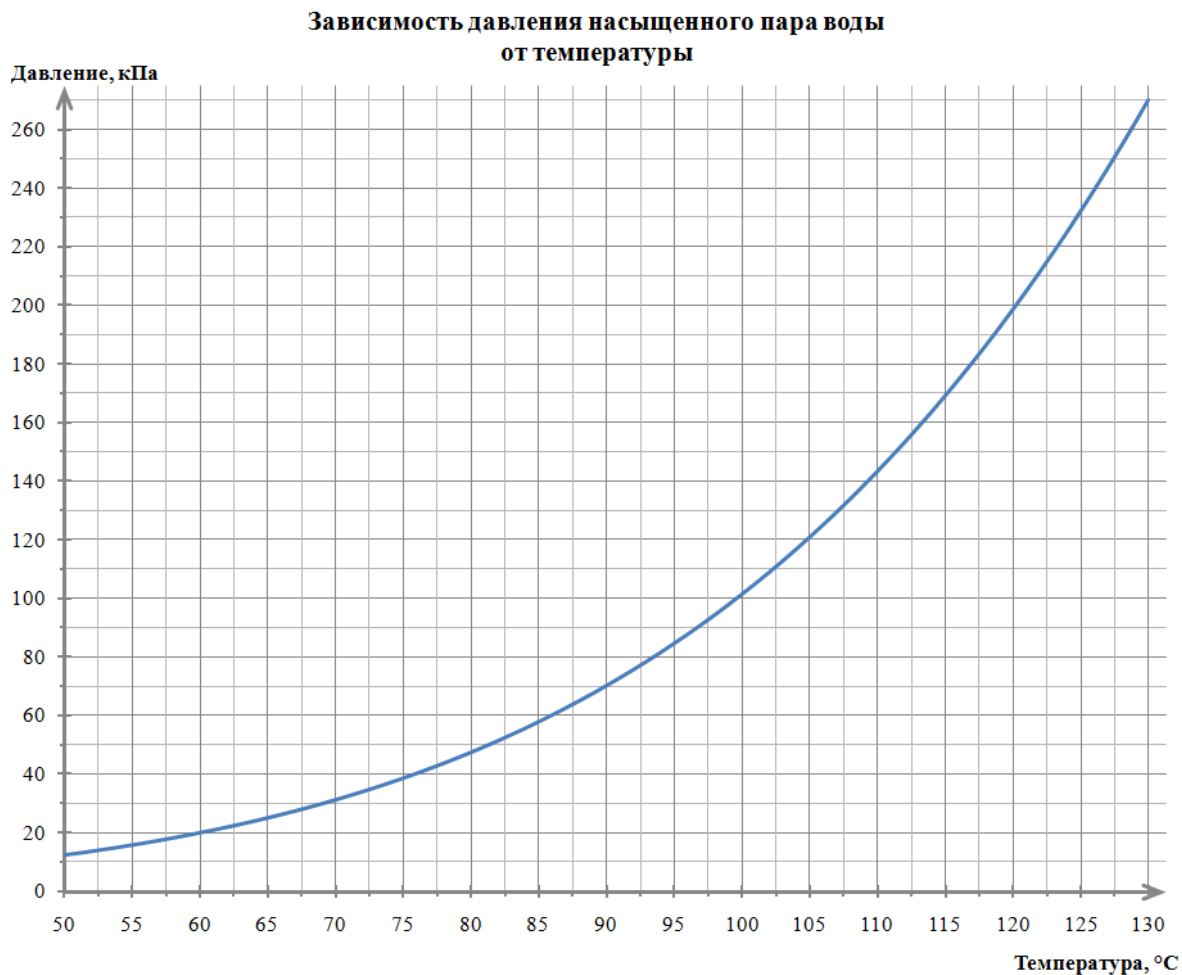
**A6.** Получите выражение для количества теплоты, которая вода получила во время перекачивания и нагрева (процесс 5-6-1). ( $m$ )

### Часть В. Исследуем цикл

**V1.** Схематически изобразите полученный цикл на диаграммах «давление-объем» ( $p$ - $V$ ) и «давление-температура» ( $p$ - $T$ ). Укажите на диаграммах точки 1, 2, ..., 6 согласно рисунку 1. Построение с точными числовыми значениями  $p$  и  $T$  не требуется.

**В2.** Определите удельную теплоту конденсации водяного пара в процессе 4-5. Также укажите разницу  $\Delta L$  между удельной теплотой парообразования (конденсации) в процессах 1-2 и 4-5.

**В3.** Определите КПД приведенного цикла. Сравните его с КПД цикла Карно, работающего при той же максимальной и минимальной температуре.

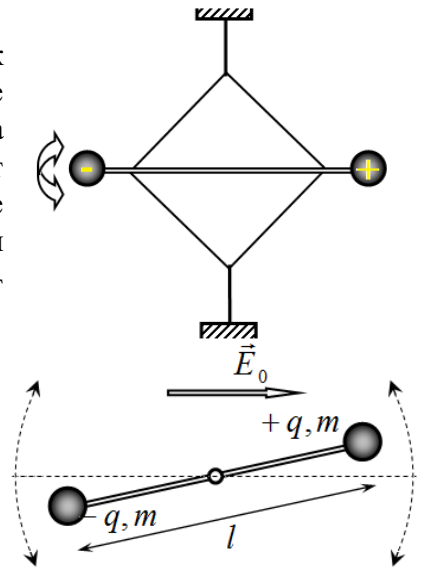


## Задача 11-1. «Разминка»

Задача состоит из двух не связанных между собой задач.

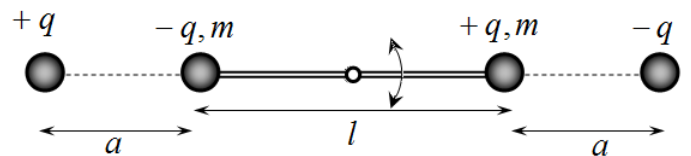
### Задача 1.1

Крутильный маятник состоит из легкого стержня длины  $l$ , к концам которого прикреплены два небольших шарика (которые можно считать материальными точками). Масса каждого шарика равна  $m$  и значительно больше массы стержня. Шарика несут электрические заряды, равные по величине и противоположные по знаку  $+q$  и  $-q$ . Стержень подвешен на нитяном подвесе и может свободно вращаться в горизонтальной плоскости вокруг фиксированной вертикальной оси.



1.1.1 Маятник помещают в горизонтальное однородное электрическое поле напряженности  $\vec{E}_0$  (на рисунке вид сверху). Найдите период малых колебаний маятника.

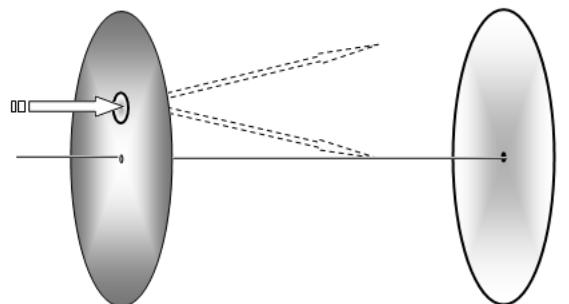
1.1.2 На расстоянии  $a$  от каждого шарика закрепили еще два таких же шарика. Модули зарядов всех шариков одинаковы, а знаки таковы, что ближайšie шарика притягиваются. Внешнее электрическое поле отсутствует. Чему равен период малых колебаний маятника в этом случае?



1.1.3 Пусть период колебаний маятника в однородном поле (как в п.1.1.1) равен  $T_1$ , а при наличии дополнительных зарядов (как в п. 1.1.2) равен  $T_2$ . Чему будет равен период колебаний, если на маятник воздействует как внешнее однородное поле, так и дополнительные заряды?

### Задача 1.2

Круглая дифракционная решетка состоит из чередующихся прозрачных и черных концентрических колец одинаковой толщины  $b = 10 \mu\text{м}$ . На решетку посылают нормально пучок лазерного света с длиной волны  $\lambda = 550 \text{нм}$ . Сечение пучка является круглым, диаметр пучка  $a = 2,0 \text{мм}$ . На расстоянии  $L = 1,0 \text{м}$  от решетки находится круглый экран, радиуса  $R = 10 \text{см}$ . Оси решетки и экрана совпадают.



1.2.1 Центр лазерного пучка падает на решетку, так что его центр находится на расстоянии  $l = 2,0 \text{см}$  от центра решетки. Нарисуйте схематически дифракционную картину на экране. Укажите геометрические размеры ее основных элементов.

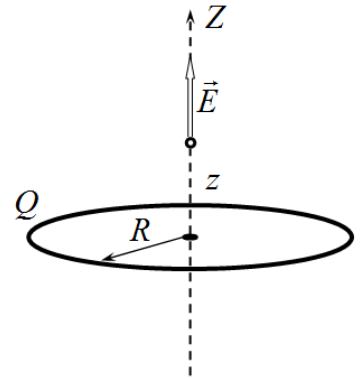
1.2.2 Опишите изменение параметров дифракционной картины, если расстояние от центра пучка до центра решетки станет равным  $l = 4,0 \text{см}$ .

## Задача 11- 2. «Кольцевая»

*Построение всех графиков выполняйте на отдельных, выданных Вам бланках!*

### Часть 1. Электрическое поле кольца.

Суммарный электрический заряд тонкого равномерно заряженного кольца равен  $Q$ , радиус кольца -  $R$ . Совместим ось  $Z$  с осью кольца, начало отсчета поместим в центр кольца.



1.1 Найдите зависимость проекции вектора напряженности электрического поля  $E_z(z)$  на ось  $Z$  от координаты на оси кольца.

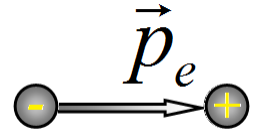
Обозначим  $E_0 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$ .

1.2 Постройте график зависимости величины  $\frac{E_z(z)}{E_0}$  от величины  $\xi = \frac{z}{R}$ .

1.3 Получите упрощенный вид зависимости  $E_z(z)$  при  $z \gg R$ .

1.4 На оси кольца на расстоянии  $z$  находится электрический диполь с дипольным моментом  $\vec{p}_e$ . Считая, что  $z \gg R$  найдите силу  $\vec{F}$ , действующую на диполь.

Электрическим диполем называется система из двух точечных зарядов, одинаковых по величине и противоположных по знаку  $+q, -q$ , находящихся на малом расстоянии  $a$  друг от друга. Характеристикой диполя является его дипольный момент, который определяется как  $\vec{p}_e = qa$ .



Подсказка. Покажите, что сила, действующая на диполь равна  $F_z = p_e \frac{\Delta E_z}{\Delta z}$ .

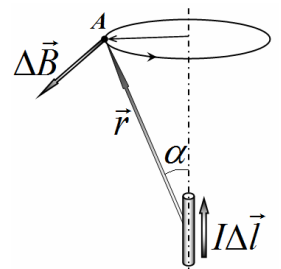
### Часть 2. Магнитное поле кольца.

Закон Био - Савара:

Малый элемент тока  $I\Delta l$  создает в произвольной точке  $A$  магнитное поле, индукция которого определяется по формуле

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\Delta l}{r^2} \sin \alpha \quad (1)$$

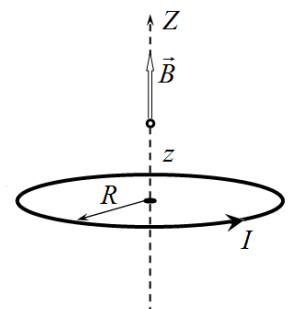
где  $I$  - сила тока, протекающего по элементу длиной  $\Delta l$ ,  $r$  - расстояние от элемента тока до точки  $A$ ,  $\alpha$  - угол между направлением элемента тока и направлением на точку  $A$ . Вектор  $\Delta \vec{B}$  перпендикулярен плоскости, в которой лежит элемент тока и точка  $A$ .



По проволочному кольцу радиуса  $R$  протекает постоянный электрический ток силы  $I$ .

Совместим ось  $Z$  с осью кольца, начало отсчета поместим в центр кольца.

2.1 Найдите зависимость проекции вектора индукции магнитного поля  $B_z(z)$  на ось  $Z$  от координаты на оси кольца.



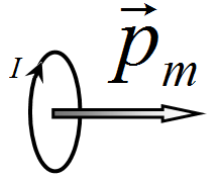
Обозначим  $B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}$ .

2.2 Постройте график зависимости величины  $\frac{B_z(z)}{B_0}$  от величины  $\xi = \frac{z}{R}$ .

2.3 Получите упрощенный вид зависимости  $B_z(z)$  при  $z \gg R$ .

2.4 На оси кольца на расстоянии  $z$  находится магнитный диполь с дипольным моментом  $\vec{p}_m$ . Считая, что  $z \gg R$  найдите силу  $\vec{F}$ , действующую на диполь.

Магнитным диполем является малое кольцо с током. Магнитный дипольный момент определяется как произведение силы тока на площадь кольца  $p_m = IS$ . Направление вектора дипольного момента совпадает с осью кольца.

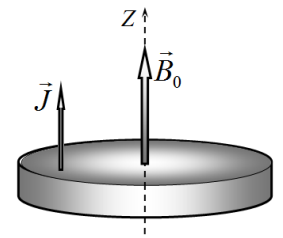


Подсказка. Известно, что сила, действующая на магнитный диполь равна  $F_z = p_m \frac{\Delta B_z}{\Delta z}$ .

### Часть 3. Взаимодействие постоянных магнитов.

Постоянные магниты изготавливаются из намагниченных ферромагнетиков. Характеристикой степени намагниченности является вектор намагничения  $\vec{J}$ , равный дипольному моменту единицы объема вещества.

Постоянный магнит имеет форму тонкого диска радиуса  $R$  и толщины  $h$  ( $h \ll R$ ). Диск намагничен однородно его вектор намагничения равен  $\vec{J}$  и направлен вдоль оси диска.

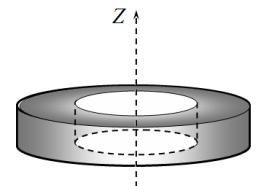


3.1 Найдите индукцию магнитного поля  $\vec{B}_0$  в центре диска.

3.2 Найдите зависимость проекции вектора индукции на ось диска  $B_z(z)$  в точках находящихся на оси диска, в зависимости от расстояния от его центра.

3.3 На большом расстоянии  $L$  ( $L \gg R$ ) от магнита расположили еще один такой же магнит. Оси магнитов совпадают. Найдите зависимость силы взаимодействия между магнитами от расстояния между ними.

В описанном дисковом магните вырезают полость в цилиндра радиуса  $\frac{R}{2}$ , соосную с магнитом. В результате чего получился кольцевой магнит.



3.3 Найдите зависимость проекции вектора индукции на ось диска  $B_z(z)$  в точках находящихся на оси магнита, в зависимости от расстояния от его центра. Постройте схематический график зависимости величины  $\frac{B_z(z)}{B_0}$  от величины  $\frac{z}{R}$ .

Величина  $B_0$  - та, что определена вами в п.3.1.

### Задача 11- 3. «Пилообразный и импульсный ток»

1. Пусть некоторый источник напряжения (ИН) создаёт напряжение  $U(t)$  «пилообразной» формы в зависимости от времени  $t$  (рис.1). К данному источнику подключают конденсатор ёмкостью  $C=1,0\text{мкФ}$  (рис.2).



Рисунок 1.

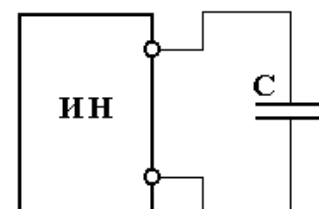


Рисунок 2.

- 1.1. Определите период  $T$  колебаний напряжения источника.
- 1.2. Получите уравнения зависимостей  $U(t)$  на временных интервалах  $0,0 - 0,50\text{мс}$  и  $0,50 - 2,5\text{мс}$ .
- 1.3. Получите уравнения зависимостей силы тока  $I(t)$  в данной цепи на временных интервалах  $0,0 - 0,50\text{мс}$  и  $0,50 - 2,5\text{мс}$ .
- 1.4. Постройте на «Бланке построений» График №1 полученных зависимостей  $I(t)$  на временном интервале в два периода.

2. Источник включают в режим, при котором он задаёт напряжение в соответствии с графиком на рисунке 3. К источнику подключают катушку с индуктивностью  $L=1,0\text{мГн}$  (рис.4). Активное сопротивление катушки считайте равным нулю.

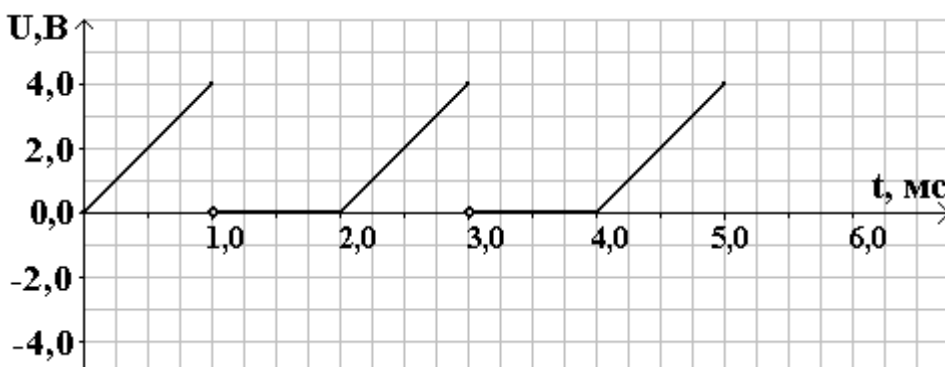


Рисунок 3.

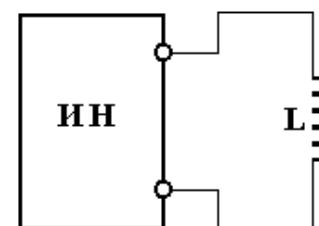


Рисунок 4.

- 2.1. Получите уравнения зависимостей  $I(t)$  на временных интервалах  $0,0 - 1,0\text{мс}$  и  $1,0 - 2,0\text{мс}$ .
- 2.2. Постройте на «Бланке построений» График №2 полученных зависимостей  $I(t)$  на временном интервале  $0,0 - 5,0\text{мс}$ .

3. Источник включают в режим, при котором он задаёт напряжение в соответствии с графиком на рисунке 5. К источнику подключают резистор сопротивлением  $R_0$  (рис.6).



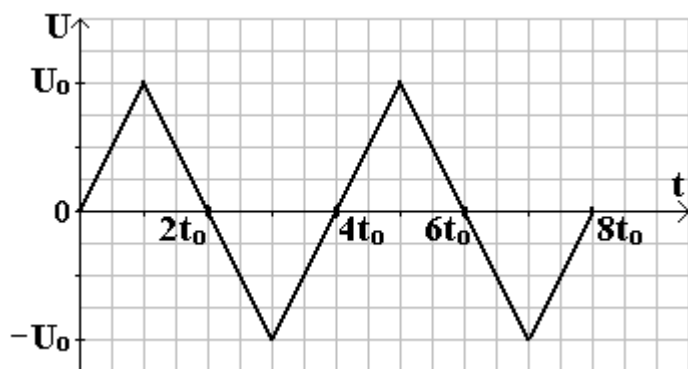


Рисунок 5.

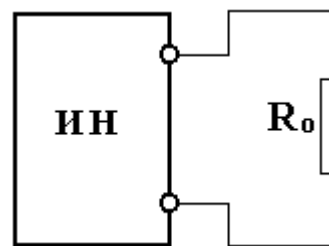


Рисунок 6.

3.1. Постройте на «Бланке построений» График №3 зависимости мощности, выделяющейся на резисторе, от времени.

3.2 Рассчитайте среднюю мощность, выделяющуюся на резисторе, за большой промежуток времени.

4. Источник включают в режим, при котором он задаёт напряжение  $U(t)$  в соответствии с графиком на рисунке 7. К источнику подключают электрическую схему (рис. 8). Сопротивления всех резисторов  $R_1 = R_3 = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4,0 \text{ Ом}$ . Диоды считайте идеальными.

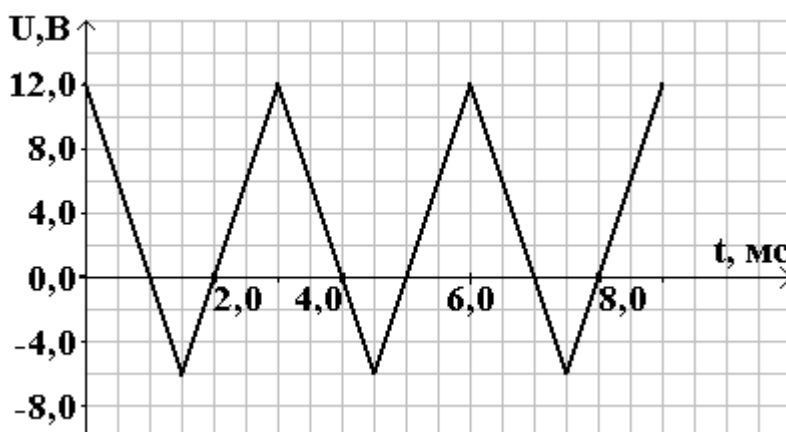


Рисунок 7.

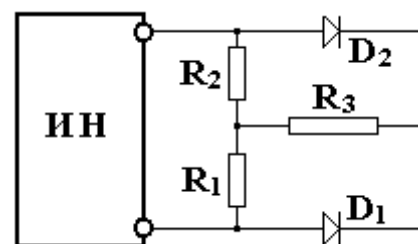


Рисунок 8.

4.1. Постройте на «Бланке построений» График №4 зависимости силы тока от времени  $I_3(t)$  на резисторе  $R_3$  на временном интервале в два периода.

4.2. Определите количество теплоты  $Q$ , выделившееся на резисторе  $R_3$  за промежуток времени  $\Delta t = 6,0 \text{ мс}$ .

**Примечание:** во всех пунктах данной задачи источник напряжения считайте идеальным (т.е. создаваемое им напряжение на внешней цепи не зависит от параметров этой цепи), сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

**Указание:** каждый график **обязательно** строить на выданном вам «Бланке построений».

**Подсказка.** Если физические величины  $y$  и  $x$  связаны прямо пропорционально  $y = kx$ , или линейно  $y = kx + b$ , то изменения этих физических величин связаны прямо пропорционально  $\Delta y = k\Delta x$ . При изменении некоторой величины  $x$  на малую величину  $\Delta x$  справедливы соотношения:

$$\frac{1}{2}\Delta(x^2) = x\Delta x, \quad \frac{1}{3}\Delta(x^3) = x^2\Delta x.$$