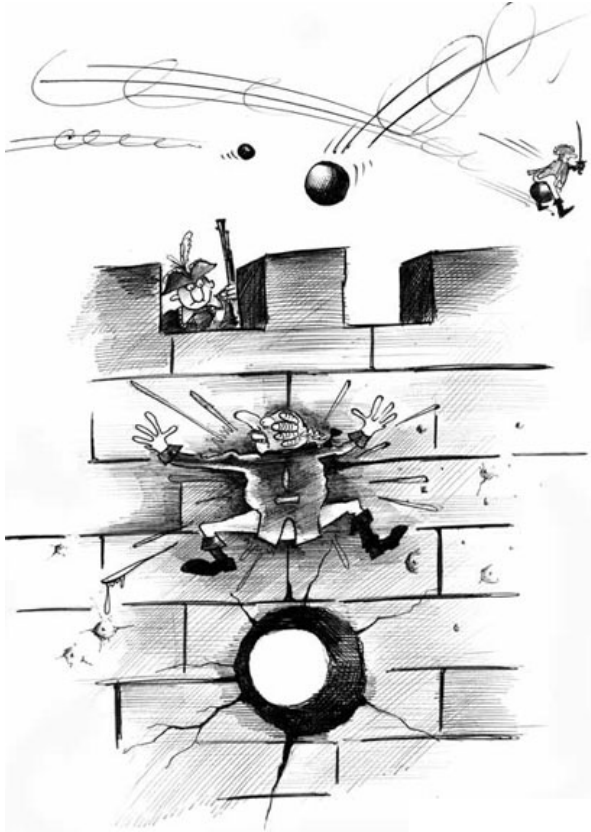




***А.И. Слободянюк  
В.В. Барашков  
Л.Г. Маркович  
Н.В. Лаппо  
К.Д. Сечко***



***Республиканская физическая  
олимпиада 2014 года  
(заключительный этап)***

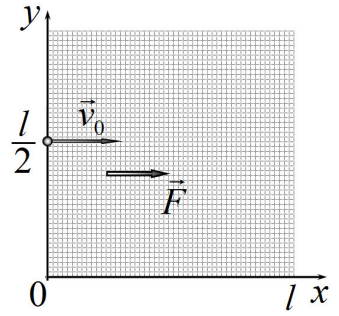
***Теоретический тур.***

***Могилев  
2014***

## Условия задач.

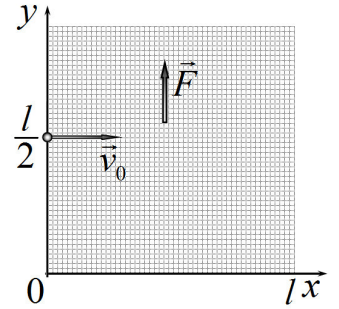
### Задача 9- 1.

**1.1** Частица массы  $m$  влетает с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , направленной вдоль оси  $Ox$ , в квадратную область со стороной  $l$  в точке с координатами  $x_0 = 0, y_0 = \frac{l}{2}$ . Оси координат совпадают с границами выделенной области. В этой области на частицу действует постоянная сила  $\vec{F}$ , направленная вдоль оси  $Ox$ . Модуль начальной скорости частицы равен  $v_0 = \frac{l}{\tau}$ , а модуль действующей силы равен  $F = \frac{2ml}{\tau^2}$  (в этих формулах  $\tau$  - известный параметр).



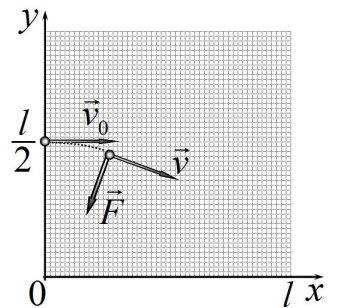
Найдите координаты точки, в которой частица покинет выделенную область, и время, через которое это произойдет. Изобразите схематически траекторию движения частицы.

**1.2** Частица массы  $m$  влетает с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , направленной вдоль оси  $Ox$ , в квадратную область со стороной  $l$  в точке с координатами  $x_0 = 0, y_0 = \frac{l}{2}$ . Оси координат совпадают с границами выделенной области. В этой области на частицу действует постоянная сила  $\vec{F}$ , направленная вдоль оси  $Oy$ . Модуль начальной скорости частицы равен  $v_0 = \frac{l}{\tau}$ , а модуль действующей силы равен  $F = \frac{2ml}{\tau^2}$  (в этих формулах  $\tau$  - известный параметр).



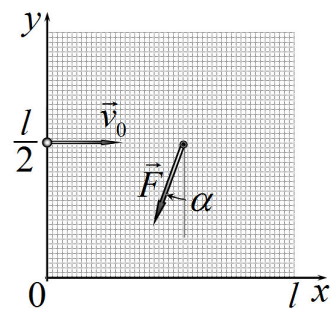
Найдите координаты точки, в которой частица покинет выделенную область, и время, через которое это произойдет. Изобразите схематически траекторию движения частицы.

**1.3** Частица массы  $m$  влетает с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , направленной вдоль оси  $Ox$ , в квадратную область со стороной  $l$  в точке с координатами  $x_0 = 0, y_0 = \frac{l}{2}$ . Оси координат совпадают с границами выделенной области. В этой области на частицу действует сила  $\vec{F}$ , направленная все время перпендикулярно вектору скорости. Модуль начальной скорости частицы равен  $v_0 = \frac{l}{\tau}$ , а модуль действующей силы постоянен и равен  $F = \frac{4mv_0^2}{l}$  (в этих формулах  $\tau$  - известный параметр).



Найдите координаты точки, в которой частица покинет выделенную область, и время, через которое это произойдет. Изобразите схематически траекторию движения частицы.

**1.4** Частица массы  $m$  влетает с начальной скоростью  $\vec{v}_0$ , направленной вдоль оси  $Ox$ , в квадратную область со стороной  $l$  в точке с координатами  $x_0 = 0, y_0 = \frac{l}{2}$ . Оси координат совпадают с границами выделенной области. В этой области на частицу действует сила  $\vec{F}$ , направление которой изменяется по закону  $\alpha = 2 \frac{v_0}{l} t$ , где угол  $\alpha$  отсчитывается от направления,



противоположному направлению оси  $Oy$ . Модуль начальной скорости частицы равен  $v_0 = \frac{l}{\tau}$ , а модуль действующей силы постоянен и равен  $F = \frac{mv_0^2}{l}$  (в этих формулах  $\tau$  - известный параметр).

Найдите координаты точки, в которой частица достигнет границы выделенной области, и время, через которое это произойдет. Изобразите схематически траекторию движения частицы.

### Задача 9-2

Если оставить на столе кружку с горячим чаем, то через некоторое время напиток остынет. Это происходит вследствие потерь теплоты в окружающую среду, которыми в школьных задачах по физике нередко пренебрегают. В данной задаче мы рассмотрим процесс подогрева воды, учитывая данные потери в рамках двух моделей.

Воду для разогрева налили до уровня  $H = 20$  см в цилиндрический тонкостенный сосуд радиусом  $r = 5,0$  см, теплоемкостью которого можно пренебречь. Сосуд расположен на плитке, полезную мощность которой в данных условиях считайте равной  $P = 2,0$  кВт. Изначально температура воды была равна температуре окружающего воздуха  $T_1 = 20$  °С. Считайте, что при нагреве температура воды достаточно быстро выравнивается по всему объему.

Табличные данные для воды: плотность  $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , удельная теплоемкость

$$c = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}.$$

Потоком теплоты называют количество теплоты, переходящее за одну секунду через единицу площади:  $q = \frac{Q}{St}$ . Единица измерения потока теплоты в СИ – Вт/м<sup>2</sup>.

#### 1. Постоянные потери

В данной части задачи будем считать, что поток тепловых потерь постоянный и равен  $q_0 = 8,5$  кВт/м<sup>2</sup>. Будем также считать, что он одинаков как для поверхности воды в сосуде, так и для стенок сосуда.

- 1.1. Найдите время, необходимое для нагрева воды в сосуде до температуры  $T_2 = 50$  °С.
- 1.2. До какой высоты  $H_{\text{max}}$  можно налить воду в сосуд, чтобы ее еще возможно было нагреть до температуры  $T_2 = 50$  °С? Предполагаем, что цилиндрический сосуд достаточно высокий.
- 1.3. Пусть сосуд на плитке используют, как подогреватель проточной воды: каждую секунду в сосуд приходит некоторый объем воды при температуре  $T_1$  и уходит такой же объем при температуре  $T_3$ , уровень  $H$  при этом остается постоянным. Определите, с какой скоростью (в литрах в минуту) необходимо подавать и забирать воду, чтобы она успевала подогреваться до температуры  $T_3 = 30$  °С.

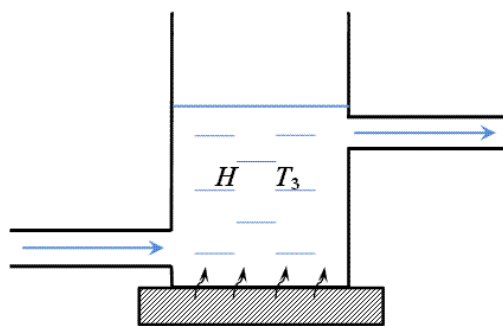


Рисунок 1 - К пункту 1.3

## 2. Переменные потери

На самом деле поток тепловых потерь будет расти с увеличением температуры воды относительно температуры воздуха. В простейшем случае эту зависимость можно записать в линейном виде:  $q = \beta(T - T_1)$ , где  $T$  – температура воды,  $T_1$  – температура окружающего воздуха,  $\beta$  – так называемый коэффициент теплоотдачи. Как и прежде будем считать, что он одинаков как для теплоотдачи с поверхности жидкости, так и со стенок сосуда.

2.1 Пусть коэффициент теплоотдачи для изучаемого сосуда с водой равен  $\beta = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ . Определите, до какой максимальной температуры  $T_{\text{max}}$  возможно нагреть воду.

2.2 Заранее узнать значение коэффициента теплоотдачи, как, вообще говоря, и полезной мощности плитки для конкретного сосуда, не так легко. Проще их получить, анализируя экспериментальные данные. В данном пункте предполагаем, что полезная мощность плитки заранее неизвестна. Используя график зависимости температуры воды от времени (рис. 1), определите полезную мощность плитки и коэффициент теплоотдачи.

2.3 Пусть после 10 минут нагревания, изображенного на рис. 1, плитку отключили. Постройте график зависимости температуры воды от времени в ходе дальнейших 10 минут остывания.

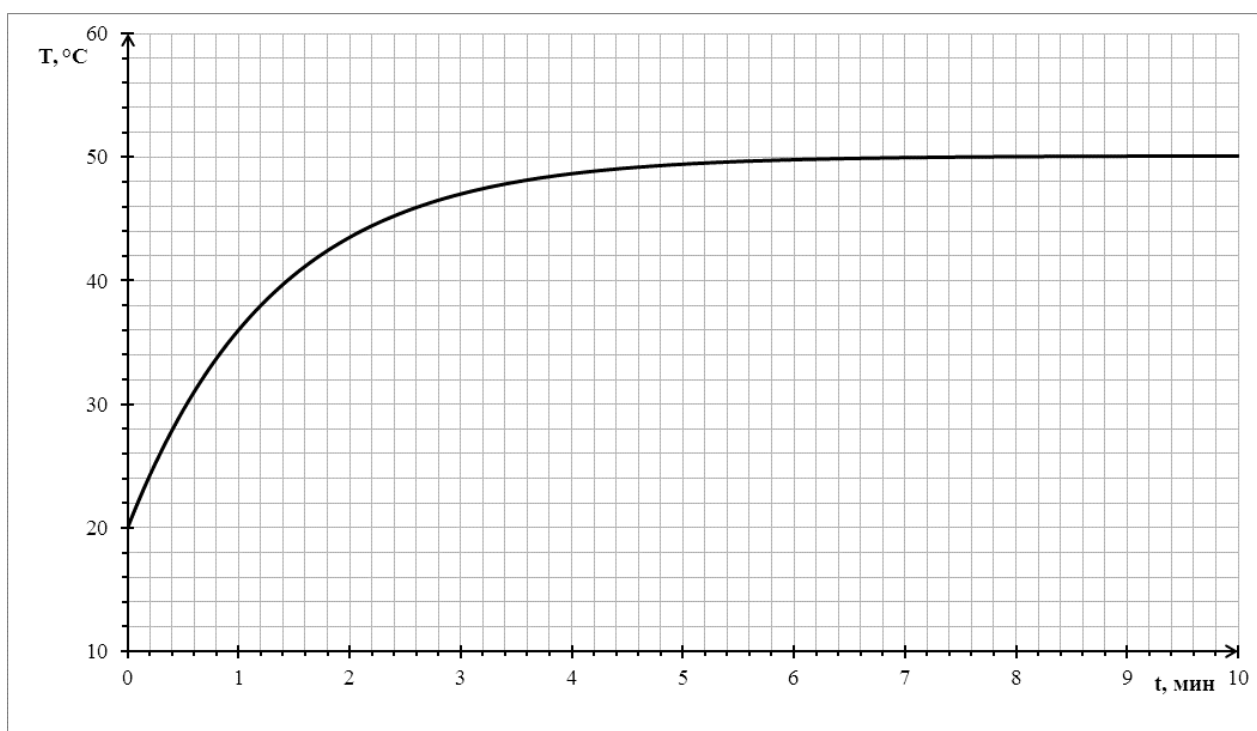
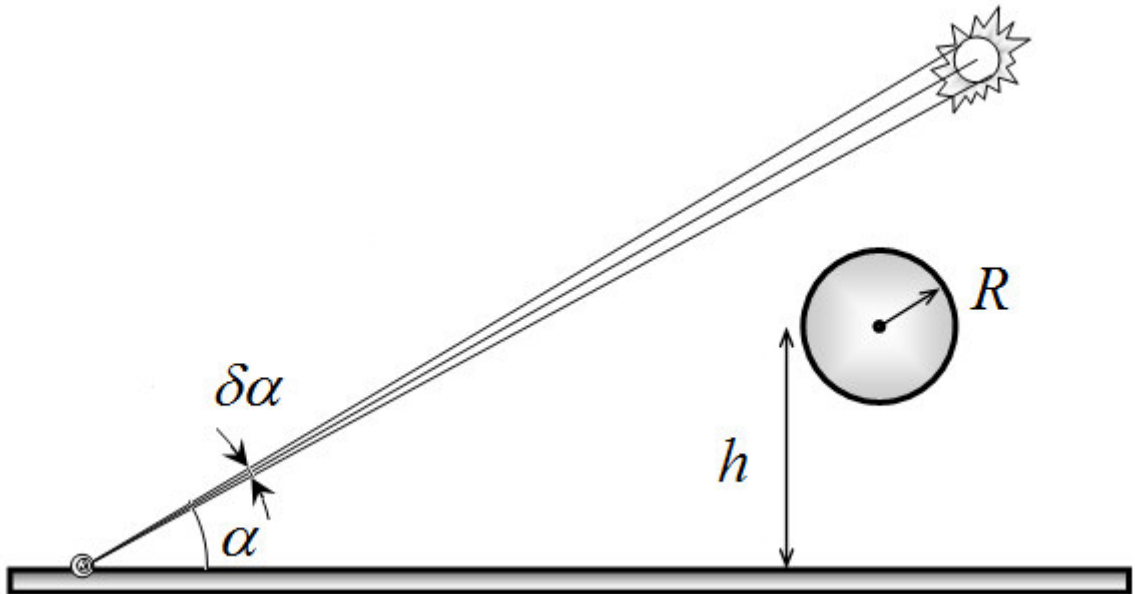


Рисунок 2 - Зависимость температуры воды в сосуде от времени

### Задача 9-3

Представьте, что вы находитесь на борту самолета, который в ясный солнечный день заходит на посадку. Если вы сидите у окна, то в некоторых случаях вы можете увидеть тень самолета на поверхности земли. Если самолет находится высоко, то его тень на поверхности земли отсутствует.

Будем считать, что самолет имеет форму шара радиуса  $R = 20\text{ м}$ . Высота солнца над горизонтом  $\alpha = 45^\circ$ , видимый угловой размер диска Солнца  $\delta\alpha = 0,5^\circ$ . Оцените, на какой максимальной высоте  $h$  может находиться шар, чтобы на поверхности земли была видна его тень.



## Задача 10-1.

Для описания упругих свойств веществ используются различные характеристики, одной из которых является модуль Юнга  $E$ . Рассмотрим небольшой брусок в форме параллелепипеда. Пусть перпендикулярно одной из граней с площадью  $S$  к бруску приложены две равные по модулю и противоположные по направлению силы  $\vec{F}, \vec{F}'$ , под действием которых длина бруска увеличилась на малую величину  $x$  (при длине в недеформированном состоянии  $l$ ). В качестве меры возникающих сил упругости используется механическое напряжение  $\sigma$ , равное отношению нормальной силы упругости к площади поперечного сечения  $S$ :  $\sigma = \frac{F}{S}$ , мерой

деформации служит относительная деформация  $\varepsilon = \frac{x}{l}$ . Связь между этими величинами выражается законом Гука

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (1)$$

Важно отметить, что модуль Юнга зависит только от свойств материала, а не от размеров бруска. Модуль Юнга является важной характеристикой вещества, так, например, скорость звука в веществе также зависит от модуля Юнга и определяется формулой

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность вещества.

В данной задаче рассматривается тонкий цилиндр длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , изготовленный из материала с модулем Юнга  $E$  и плотности  $\rho$ .

### 1.1 Модуль Юнга и коэффициент жесткости.

Цилиндр растягивают, прикладывая к нему постоянные силы, направленные вдоль его оси. В 9 классе вы использовали следующую формулу закона Гука для силы упругости

$$F_{\text{упр.}} = kx, \quad (2)$$

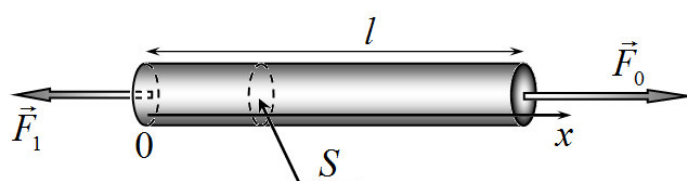
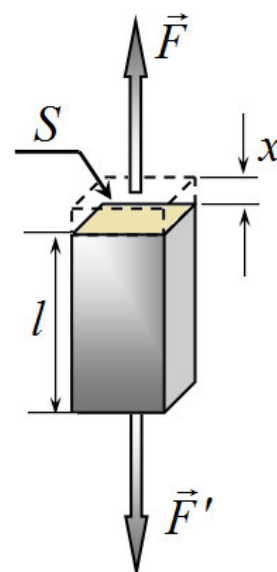
где  $x$  - удлинение цилиндра,  $k$  - коэффициент жесткости.

1.1.1 Выразите коэффициент жесткости цилиндра через его геометрические размеры и модуль Юнга.

1.1.2 Пусть сила упругости растянутого цилиндра равна  $F_0$ . Выразите энергию упругих деформаций цилиндра через его модуль Юнга и относительную деформацию  $\varepsilon$ . Найдите объемную плотность энергии упругих деформаций.

### 1.2 Деформации и движение.

К торцам цилиндра прикладывают две силы, направленные вдоль оси цилиндра и равномерно распределенные по его торцам: к правому торцу  $F_0$ , к левому  $F_1$ . Совместим ось  $Ox$  с осью



цилиндра, а ее начало с левым торцом. В части 1.2 рассмотрите три случая: а)  $F_1 = F_0$ ; б)

$F_1 = \frac{1}{2}F_0$ ; в)  $F_1 = 0$ .

1.2.1 Постройте графики зависимости относительной деформации  $\varepsilon$  от координаты  $x$ .

1.2.2 Найдите максимальное удлинение стержня.

1.2.2 Найдите максимальную энергию деформации стержня.

### 1.3 Разгон и деформации

Найденное Вами распределение деформаций не устанавливается мгновенно, требуется некоторое время, чтобы волна деформаций распространилась по стержню.

Пусть к правому торцу стержня в момент времени  $t = 0$  прикладывают постоянную силу  $F_0$ , при этом левый конец стержня остается свободным.

1.3.1 Оцените время установления стационарного распределения деформаций, в стержне после начала его движения.

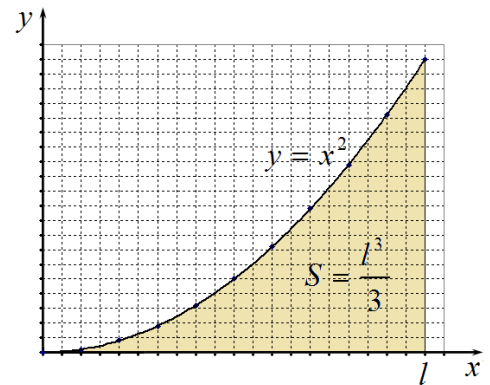
1.3.2 Оцените, через какой промежуток времени кинетическая энергия стержня станет равной энергии ее упругих деформаций.

*Самостоятельно предложите простую модель распространения деформаций в стержне в процессе его разгона и воспользуйтесь ею.*

#### **Математическая подсказка.**

Площадь под параболой  $y = x^2$  на участке от 0 до  $l$

равна  $S = \frac{l^3}{3}$  (это вычислил еще Архимед!)



## Задача 10-2

Все современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) подразделяются на две основные группы:

1. Двигатели, в которых используется цикл с подводом тепла при постоянном объеме  $v=const$  (цикл Отто).
2. Двигатели, в которых используется цикл с подводом тепла при постоянном давлении  $p=const$  (цикл Дизеля).

Исследование работы реального поршневого двигателя является сложной теоретической и экспериментальной задачей. Поэтому вам предстоит рассмотреть их упрощенные модели.

Так как в термодинамике исследуются лишь идеальные обратимые циклы, то для исследования цикла ДВС примем следующие допущения: рабочее тело – идеальный газ с постоянной теплоемкостью; количество рабочего тела постоянно; между рабочим телом и источниками теплоты имеет место бесконечно малая разность температур; подвод теплоты к рабочему телу производится не за счет сжигания топлива, а от внешних источников теплоты. То же самое справедливо и для отвода теплоты.

### 0. Уравнение адиабаты

Для исследования термодинамических циклов Вам понадобится уравнение адиабаты:  $p \cdot V^k = const$ , где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  — показатель адиабаты,  $c_p, c_v$  — изобарная и изохорная теплоемкости газа. Получите уравнение адиабаты в координатах  $pT$  и  $VT$ .

### 1. Цикл Отто

Рассмотрим идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом теплоты. Цикл в  $pV$  координатах представлен на рис. 1. Идеальный газ с начальными параметрами  $p_1, V_1, T_1$  сжимается по адиабате 1-2. В изохорном процессе 2-3 рабочему телу от внешнего источника теплоты передается количество теплоты  $q_1$ . В адиабатном процессе 3-4 рабочее тело расширяется до первоначального объема  $V_4=V_1$ . В изохорном процессе 4-1 рабочее тело возвращается в исходное состояние с отводом от него теплоты  $q_2$  в теплоприемник. Характеристиками цикла являются:

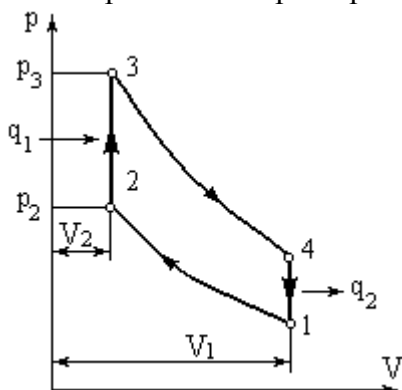


Рисунок 3.

Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным подводом теплоты

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

— Степень сжатия

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

— Степень повышения давления;

Определите:

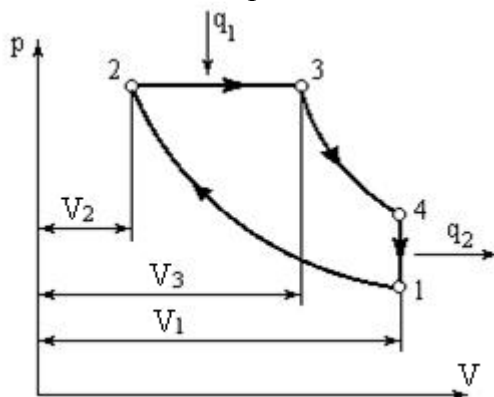
- 1.1 Параметры  $P, V, T$  в точках цикла 2, 3, 4 через параметры  $p_1, V_1, T_1, \varepsilon, \lambda, k$ .
- 1.2 Термический КПД цикла, выразив его через параметры  $\varepsilon, \lambda, k$ .



## 2. Цикл Дизеля

В таких двигателях топливо сгорает постепенно в процессе такта «рабочий ход», а также осуществляется раздельное сжатие топлива и воздуха. Воздух сжимается в цилиндре, а жидкое топливо распыляется сжатым воздухом от компрессора. Поэтому здесь можно достигать значительно более высоких степеней сжатия. Воздух при высоких давлениях имеет настолько высокую температуру, что подаваемое в цилиндр топливо самовоспламеняется без всяких специальных приспособлений. Раздельное сжатие позволяет применять высокие степени сжатия (до  $\varepsilon = 20$ ), исключая преждевременное самовоспламенение топлива. Постоянство давления при горении топлива обеспечивается соответствующей регулировкой топливной форсунки. Конструкция такого двигателя впервые была разработана немецким инженером Дизелем.

Рассмотрим идеальный цикл двигателя с подводом теплоты при постоянном давлении в  $pV$ - диаграмме рис.3. Этот цикл осуществляется следующим образом. Газообразное рабочее тело с начальными параметрами  $p_1, v_1, T_1$  сжимается по адиабате 1-2. В изобарном процессе 2-3 телу сообщается некоторое количество теплоты  $q_1$ . В адиабатном процессе 3-4 происходит расширение рабочего тела до первоначального объема. В изохорном процессе 4-1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние с отводом в теплоприемник теплоты  $q_2$ . Характеристиками цикла являются:



$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{— Степень сжатия}$$

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} \quad \text{— Степень предварительного расширения}$$

### Определите:

2.1 Параметры  $p, V, T$  в точках цикла 2, 3, 4 через параметры  $p_1, V_1, T_1, \varepsilon, \rho, k$ .

2.2 Термический КПД цикла, выразив его через параметры  $\varepsilon, \rho, k$ .

Рисунок 3.

Идеальный термодинамический цикл ДВС с изобарным подводом теплоты

## 3. Сравнение циклов Отто и Дизеля

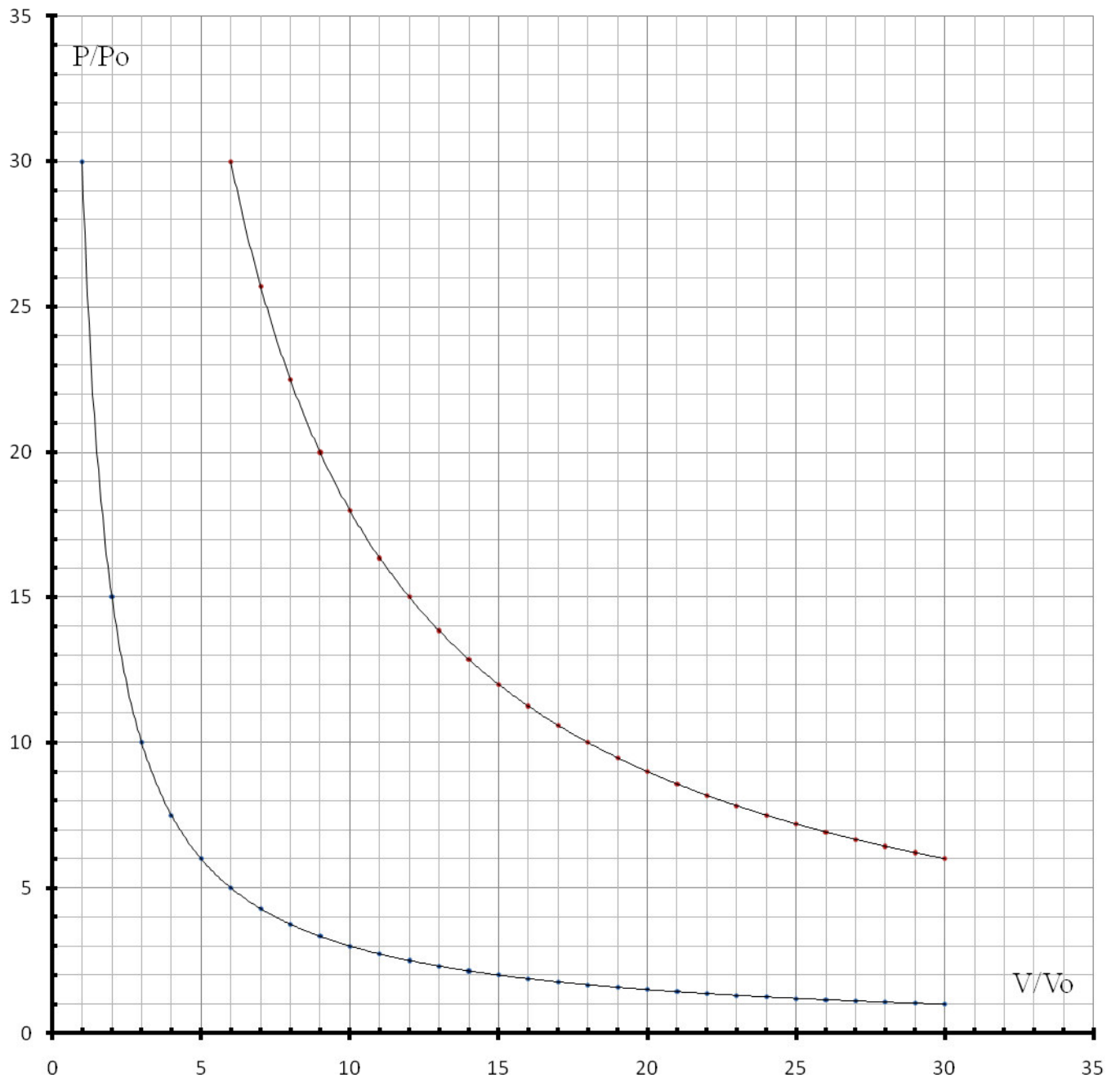
Сравните циклы Отто и Дизеля при одинаковых максимальных и минимальных температурах и давлениях, одинаковых полных объемах цилиндров  $V_1$ . Сравнение выполните, рассмотрев конкретный пример. Полный объем цилиндра для обоих циклов в относительных единицах примите равным  $\frac{V_1}{V_0} = 30$ . Показатель адиабаты  $k = 1,67$ .

Степень сжатия для цикла Отто  $\varepsilon_{\gamma} = 5$ .

4.1 На подготовленном для Вас бланке постройте графики данных циклов. (На данных бланках указаны изотермы для максимальной и минимальной температур в данных циклах).

4.2 Используя формулы, полученные Вами в пп. 1.2 и 2.2 рассчитайте термический КПД данных циклов.

Бланк к задаче 10-2



### Задача 10-3 Установление равновесия.

#### Математическое введение.

Пусть скорость изменения некоторой физической величины, описываемой функцией  $X(t)$ , пропорциональна самой величине, то есть подчиняется уравнению

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = -aX, \quad (M1)$$

где  $a$  - некоторая постоянная величина.

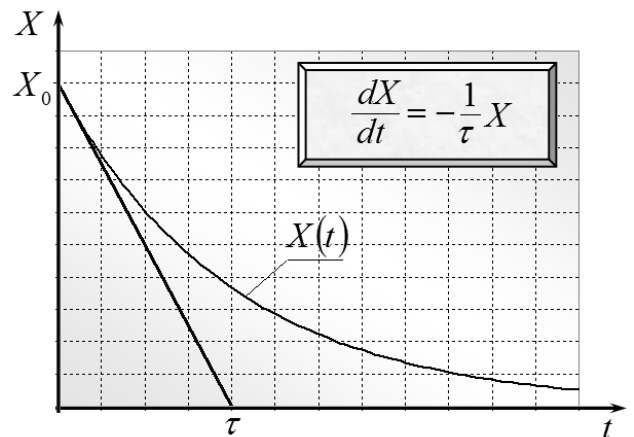
Для однозначного определения функции  $X(t)$  уравнение (1) необходимо дополнить начальным условием: значением функции  $X_0$  (для определенности будем считать, что  $X_0 > 0$ ) в момент времени  $t_0 = 0$ .

Качественно решение этого уравнения описывается следующим образом (см рис):

при  $t=0$  значение функции задается начальным условием  $X_0$ , затем функция начинает убывать, причем сначала скорость убывания равна

$$\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_{t=0} = -aX_0,$$

по мере уменьшения значения функции  $X$  скорость ее убывания падает. Поэтому графиком этой функции будет монотонно убывающая кривая. Характерное время убывания функции оценивается как время, за которое функция стала бы равной нулю, если скорость ее убывания остается такой же, как в начальный момент времени



нулю, если скорость ее убывания остается такой же, как в начальный момент времени

$$\tau = \frac{X_0}{\left|\left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right)_{t=0}\right|} = \frac{1}{a}. \quad (M2)$$

Отметим также, что строгим решением уравнения (1) является функция

$$X = X_0 e^{-at} \quad (M3)$$

#### Часть 1. Лодка.

При движении моторной лодки массы  $m$  на нее действует тормозящая сила, пропорциональная скорости

$$\vec{F} = -\beta\vec{v}, \quad (1)$$

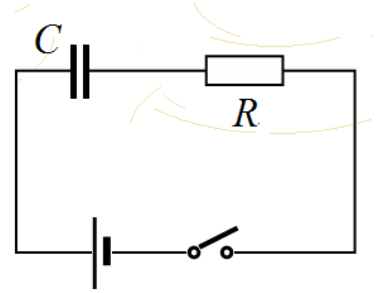
Где  $\beta$  - известный параметр.

1.1 Лодка двигалась с постоянной скоростью  $v_0$ . Мотор лодки выключают. Нарисуйте примерный график зависимости скорости лодки от времени. Найдите характерное время торможения. Определите. Какой путь пройдет лодка до остановки.

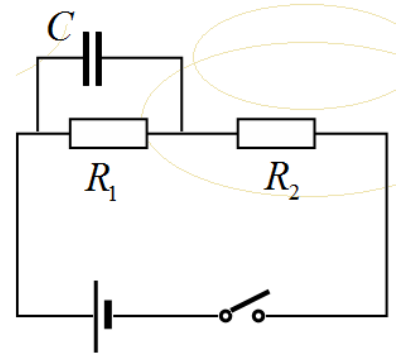
1.2 Лодка покоилась, после чего запускают мотор. Считая, что вращение винта приводит к действию постоянной силы  $F_0$ , постройте примерный график зависимости скорости лодки от времени. Найдите характерное время разгона лодки.

## Часть 2 Конденсатор.

2.1 Конденсатор включен в цепь, показанную на рисунке. Источник создает в цепи постоянное напряжение  $U_0$ . Постройте примерные графики зависимости напряжения на конденсаторе и силы тока через резистор от времени при замыкании цепи. Найдите характерное время зарядки конденсатора.



2.2 Цепь изменили, добавив еще один резистор. Первоначально конденсатор не заряжен. Постройте примерные графики зависимостей напряжений на резисторах от времени при замыкании цепи. Найдите характерное время установления тока в этой цепи.



2.3 После полной зарядки конденсатора ключ размыкают. Найдите характерное время разрядки конденсатора в этом случае.

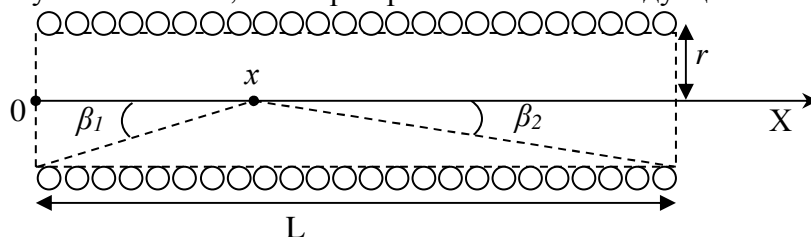
## Задача 11-1

### 1. Край соленоида

В цилиндрической катушке длины  $L$  и радиуса  $r$  с числом витков  $N$  индукция магнитного поля в любой точке с координатой  $x$  на оси катушки определяется по формуле

$$B_x = \frac{\mu_0 IN}{2L} (\cos \beta_1 + \cos \beta_2),$$

где  $I$  – сила тока в катушке,  $\beta_1, \beta_2$  – углы под которыми видны края катушки из точки, в которой рассчитывается индукция поля.



1.1 Определите индукцию магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида  $\hat{A}_\infty$ .

1.2 Определите максимальное  $B_{x(max)}$  и минимальное  $B_{x(min)}$  значение индукции магнитного поля соленоида конечной длины  $L$  ( $L \gg r$ ).

*Рекомендуем использовать формулу приближения:  $(1 + \delta)^n \approx 1 + n \cdot \delta$*

1.3 Изобразите примерную картину силовых линий магнитного поля бесконечного соленоида и соленоида конечной длины  $L$  ( $L \gg r$ ) при одинаковых значениях  $I, \frac{N}{L}, r$ .

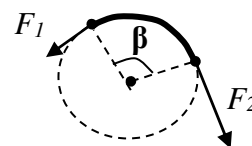
### 2. Край стола

Гибкая цепочка длины  $L$  и массы  $m$  лежит на горизонтальной поверхности стола. Край стола представляет собой полуокружность радиуса  $R$  ( $R \ll L$ ). Коэффициент трения цепочки о стол равен  $\mu = \frac{2}{\pi}$ .

2.1 Определите минимальную длину цепочки, свисающую с края стола, при которой цепочка начинает соскальзывать без учета взаимодействия цепочки с краем стола.

2.2 При протягивании цепочки по закруглению сила натяжения цепочки изменяется по закону:  $F_2 = F_1 e^{\mu\beta}$

Определите минимальную длину цепочки, свисающую с края стола, при которой цепочка начинает соскальзывать с учетом взаимодействия цепочки с краем стола.



### 3. «Край» электрического диполя

Система двух одинаковых по величине разноименных точечных зарядов  $+q$  и  $-q$ , расстояние между которыми  $L$ , называется электрическим диполем. Прямая, проходящая через оба заряда, называется осью диполя.

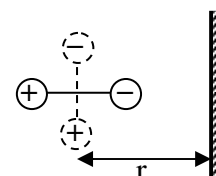
Определите силу взаимодействия диполя с бесконечной проводящей плоскостью:

3.1 ось диполя перпендикулярна плоскости;

3.2 ось диполя параллельна плоскости.

*Примечание:*

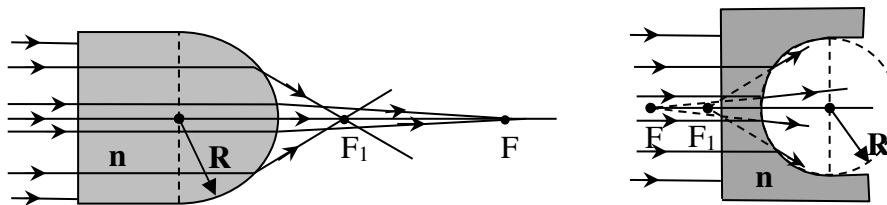
- $r$  – расстояние от центра диполя до проводящей плоскости,  $r \gg L$ .



- *Рекомендуем использовать формулу приближения:  $(1 + \delta)^n \approx 1 + n \cdot \delta$*

#### 4. Край сферической линзы

Широкий пучок монохроматических параллельных лучей падает из вакуума перпендикулярно на плосковыпуклую и плосковогнутую сферическую поверхность с показателем преломления  $n$ .



4.1 Определите максимальную сферическую aberrацию  $\Delta F = |F - F_1|$  вдоль главной оптической оси для двух поверхностей.

4.2 Предложите способы устранения сферической aberrации для сферической поверхности раздела двух сред с разными показателями преломления.

Примечание:

- $F$  – параксиальный фокус (фокус для узкого пучка лучей вблизи оси).
- $F_1$  – краевой фокус (фокус для крайних лучей пучка)

#### Задача 11-2

В данной задаче рассмотрим известное явление фотоэффекта немного глубже, чем в обычном школьном курсе физики.

Важной характеристикой фотоэффекта, которая пригодится нам в задаче, является его квантовый выход  $Y$ , представляющий собой отношение числа вылетающих с поверхности электронов к числу падающих фотонов. Квантовый выход, вообще говоря, зависит от многих параметров: материала поверхности, угла падения излучения, частоты падающего излучения и прочих. В данной задаче можете считать квантовый выход постоянной величиной во всех пунктах, за исключением последнего вопроса. Также отметим, что будем рассматривать только одноэлектронный фотоэффект.

Напомним, одним из простых примеров конфигурации электромагнитного поля является плоская волна. Для плоской волны плотность энергии электромагнитного поля, то есть энергию в единице объема, можно рассчитать по формуле  $w = \frac{\epsilon_0 E_0^2}{2}$ , где  $E_0$  – амплитуда напряженности электрического поля, изменяющейся со временем по гармоническому закону,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Некоторые физические постоянные: скорость света  $c = 3,0 \cdot 10^8$  м/с, постоянная Планка  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Рассмотрим следующий классический эксперимент по регистрации фотоэффекта. На металлическую пластину падает плоская электромагнитная волна, модуль вектора напряженности которой в каждой точке меняется со временем по закону:  $E(t) = E_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ , где амплитуда  $E_0 = 15$  В/м, угловая частота  $\omega = 9,5 \cdot 10^{15}$  рад/с,  $\varphi_0$  – некоторая начальная фаза (назовем данную волну пробной). Полученная в этом случае зависимость силы тока в цепи от напряжения представлена на рисунке 2. Основные характеристики, используемые для описания вольт-амперной характеристики фотоэлемента, это задерживающее напряжение  $U_3$  (обратное напряжение, при котором ток в цепи прекращается) и ток насыщения  $I_{\max}$  (максимальный ток при данном освещении пластины).

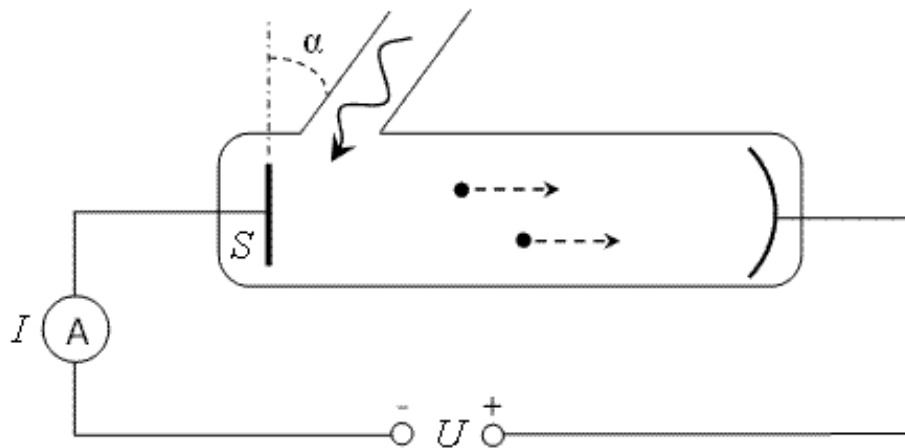


Рисунок 3 - Схема эксперимента

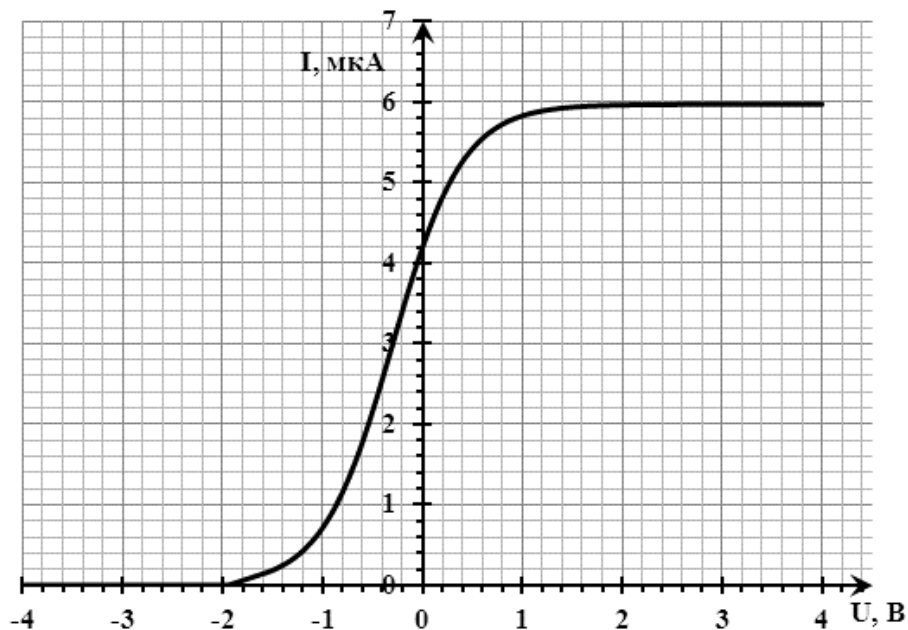


Рисунок 4 - Зависимость силы тока в цепи от напряжения при освещении пластины пробной волной

## 1. Меняем волну

- 1.1. Пусть теперь на пластину падает плоская волна, модуль вектора напряженности которой со временем меняется по закону  $E(t) = E_1 \cos(\omega t + \varphi_0)$ , где новая амплитуда равна  $E_1 = 25$  В/м,  $\omega$  – как у пробной волны. Определите задерживающее напряжение и ток насыщения.
- 1.2. Пусть теперь на пластину падает плоская волна, модуль вектора напряженности которой со временем меняется по закону  $E(t) = E_0 \cos(\omega' t + \varphi_0)$ , где новая угловая частота равна  $\omega' = 8,0 \cdot 10^{15}$  рад/с,  $E_0$  – как у пробной волны. Определите задерживающее напряжение и ток насыщения.

## 2. Сложные волны

- 2.1. Определите задерживающее напряжение и ток насыщения, если на пластину падает волна, модуль вектора напряженности которой изменяется со временем следующим образом:

2.1.a)  $E(t) = E_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ ,

где угловые частоты:  $\omega_1 = 9,50 \cdot 10^{15}$  рад/с,  $\omega_2 = 1,5 \cdot 10^{14}$  рад/с.

$$2.1.b) E(t) = E_0(1 + \cos \omega t) \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$E_0, \omega$  – как у пробной волны.

- 2.2. Примерно изобразите на графиках зависимости тока в цепи от приложенного напряжения для случаев 2.1.a и 2.1.b. Отметьте на них ключевые значения соответствующих величин.

### 3. Квантовый выход

- 3.1. Площадь пластины, на которую падает пробная волна,  $S = 0,05 \text{ м}^2$ , при этом освещение падает под углом  $\alpha = 30^\circ$  к поверхности (см. рис. 1). Используя имеющиеся данные, определите квантовый выход  $\gamma$  фотоэффекта.

- 3.2. Вообще говоря, зависимость квантового выхода от частоты излучения весьма существенна, и пренебрегать ей можно, разве что, в модельных задачах. Для измерения данной зависимости пластину, описанную в пункте 3.1, освещали электромагнитными волнами различной частоты и постоянной амплитуды:

$E_i(t) = E_0 \cos(\omega_i t + \varphi_0)$ , где  $E_0$  по-прежнему равно 15 В/м. Полученные значения задерживающего напряжения и тока насыщения представлены в таблице 1.

Используя имеющиеся данные, постройте приближенный график зависимости квантового выхода фотоэффекта от частоты падающего излучения в максимально возможном диапазоне частот.

№ опыта	$U_z, \text{ В}$	$I_{\text{max}}, \text{ мкА}$
1	0,7	1,5
2	1,3	4,5
3	1,7	5,5
4	2,0	6,0
5	2,4	6,5
6	2,8	6,6
7	3,1	6,5
8	3,8	6,3

Таблица 1 – Результаты измерений задерживающего напряжения и тока насыщения

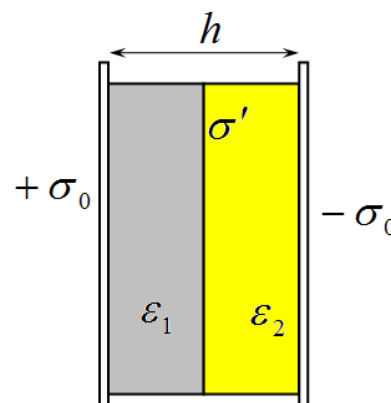
## Задача 11-3

С развитием технологий появляются все новые материалы с удивительными свойствами. Два таких метаматериала рассматриваются в данной задаче.

### Часть 1. Переменная диэлектрическая проницаемость.

1.1.1 Плоский конденсатор состоит из двух металлических параллельных пластин площади  $S$ , находящимися на расстоянии  $h$  друг от друга. Пространство между пластинами заполнено двумя слоями диэлектрика (толщины этих слоев одинаковы) с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ . Найдите емкость такого конденсатора.

1.1.2 На внешние металлические пластины подают постоянное напряжение  $U_0$ . Найдите поверхностные плотности зарядов на пластинах  $\sigma_0$  и на границе раздела диэлектриков  $\sigma'$





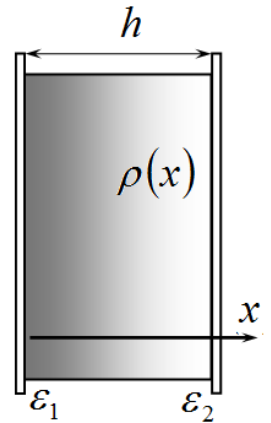
1.2 Плоский конденсатор состоит из двух металлических параллельных пластин площади  $S$ , находящихся на расстоянии  $h$  друг от друга. Пространство между пластинами заполнено диэлектриком, проницаемость которого плавно изменяется от  $\epsilon_1$  у левой пластины до  $\epsilon_2$  у правой. Закон изменения проницаемости от координаты  $x$  имеет вид

$$\epsilon = (ax + b)^{-1}.$$

1.2.1 Выразите параметры этой зависимости через значения  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ .

1.2.2 Найдите емкость этого конденсатора.

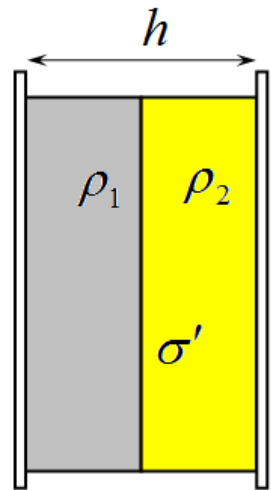
1.2.3 На внешние металлические пластины подают постоянное напряжение  $U_0$ . При этом внутри диэлектрика возникают объемные поляризационные заряды. Найдите их объемную плотность как функцию координаты  $x$   $\rho(x)$



## Часть 2. Переменная проводимость.

2.1.1 Плоский резистор состоит из двух металлических параллельных пластин площади  $S$ , находящихся на расстоянии  $h$  друг от друга. Пространство между пластинами заполнено двумя слоями слабо проводящих веществ (толщины этих слоев одинаковы) с удельными сопротивлениями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Найдите сопротивление такого резистора.

2.1.2 На внешние металлические пластины подают постоянное напряжение  $U_0$ . Найдите поверхностную плотность заряда  $\sigma'$  на границе раздела слоев. Поляризационными зарядами пренебречь.



2.2.1 Плоский резистор состоит из двух металлических параллельных пластин площади  $S$ , находящихся на расстоянии  $h$  друг от друга. Пространство между пластинами заполнено веществом, удельное сопротивление которого плавно изменяется от  $\rho_1$  у левой пластины до  $\rho_2$  у правой по линейному закону.

1.2.1 Запишите формулу, описывающую изменение удельного сопротивления вещества.

1.2.2 Найдите сопротивление этого резистора.

1.2.3 На внешние металлические пластины подают постоянное напряжение  $U_0$ . При этом внутри вещества возникают объемные заряды. Найдите их объемную плотность как функцию координаты  $x$ .