

# Семинар по школьной олимпиадной физике

## ОЛИМПИАДНАЯ ФИЗИКА 10 КЛАСС

*Ничто не дается даром в этом мире, и приобретение знания — труднейшая из всех задач, с какими человек может столкнуться. Человек идет к знанию так же, как он идет на войну — полностью пробужденный, полный страха, благоговения и безусловной решимости. Любое отступление от этого правила — роковая ошибка.*

*Карлос Кастанеда, американский антрополог и писатель (1925–1998).*



**Организатор: Анатолий Найдин**



**г. Томск, ТФТЛ**

**2024**

## Занятие 1. Молекулы.

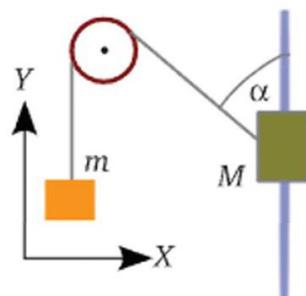
### I. Вопросы: (повторим физику):

1. На горизонтальной поверхности с коэффициентом трения  $\mu$  лежит брусок массы  $m$ . К бруску приложена сила  $F$ , направленная под углом  $\alpha$  к горизонту. При каком минимальном значении величины силы можно сдвинуть брусок с места? Под каким углом к горизонту для этого следует приложить усилие?  
 $\operatorname{tg}\alpha = \mu$
2. Шар радиуса 5 см, изготовленный из материала с плотностью  $\rho = 0,3 \text{ г/см}^3$ , плавает в воде. Определите глубину погружения шара. Указание. Объем шарового сегмента  $V = \pi h^2(R - h/3)$ .
3. Постройте график зависимости силы тяжести  $F$ , действующей на тело массы  $m$ , от расстояния от центра Земли.
4. Лыжник съезжает с горы высотой  $H$ , оканчивающейся горизонтальным трамплином. При какой высоте трамплина  $h$  лыжник пролетит наибольшее расстояние  $S_{\max}$  по горизонтали, и каково это расстояние? Трением лыж о поверхность горы и сопротивлением воздуха пренебречь. Как и максимальная дальность полета струи из дырки в сосуде.  $h = \frac{H}{2}, S_{\max} = H$

### II. Задачи:

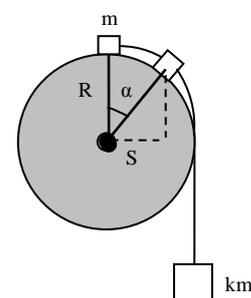
1. Однородный стержень длиной  $\ell = 0,6 \text{ м}$  может свободно вращаться относительно горизонтальной оси, проходящей через один из его концов. Какую наименьшую скорость надо сообщить нижнему концу стержня, находящемуся в положении равновесия, чтобы он сделал полный оборот вокруг оси?  $8,83 \text{ м/с}$

2. Груз массы  $m = 1 \text{ кг}$  и муфта массы  $M = 2 \text{ кг}$  связаны нитью, перекинутой через неподвижный блок. Под действием груза муфта скользит снизу вверх по вертикальному штоку. Пренебрегая трением и массой нити, определить ускорение груза в момент, когда угол  $\alpha$  между нитью и штоком равен  $\alpha = 60^\circ$ .  $10 \text{ м/с}^2$ .



$$\text{м/с}^2. a_1 = \frac{Mg - mg \cos \alpha}{(M + m) \cos \alpha}$$

3. Дан цилиндр радиусом  $R = 2 \text{ м}$ , ось цилиндра ориентирована горизонтально. На цилиндре лежит удерживаемый груз массой  $m = 1 \text{ кг}$ , к нему закреплён на нити другой груз, свисающий ниже цилиндра. Масса второго груза  $km$ . После того, как мы отпустили первый груз, и он прошёл расстояние по горизонтали  $S = R/2$ , он потерял контакт с поверхностью цилиндра. Определить  $k$ , скорость груза и ускорение в момент потери контакта с поверхностью цилиндра.  $3,3, 4,16 \text{ м/с}, 8,67 \text{ м/с}^2$



**III.** Что изучает молекулярная физика? **Тепловые явления**, поскольку обусловлены изменением температуры тел. В Древней Греции человек объяснял тепловые явления переходом «огня». **Физические объекты**, с которыми происходят тепловые явления: газ, жидкость, твёрдое тело.

**Молекулярная физика** изучает тепловые явления, а также свойства и поведение вещества на основе представлений о его молекулярном строении.

1. **Атом** – мельчайшая часть химического элемента, носитель его свойств.  
**Вещество построено из атомов и молекул.** Примеры: гелий, железо, вода, серная кислота.
2. **Молекула** – мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства и состоящая из атомов, объединённых химическими связями.
3. **Молярная масса ( $M_B$ )** – масса одного моля данного вещества.
4. **Количество вещества ( $\nu$ )** – свойство макроскопического тела, измеряемое отношением массы вещества к его молярной массе. 
$$\nu = \frac{m}{M_B}$$
5. **Как узнать число частиц в теле?**  $N = \nu \cdot N_A$
6. Как измерить массу атома или молекулы данного вещества?  $m_0 = \frac{M_B}{N_A}$

**Вывод.** Зная количество вещества ( $\nu = \frac{m}{M_B}$ ), можно определить число частиц

в теле ( $N = \nu \cdot N_A$ ), а также определить массу одной частицы.

#### IV. Задачи (блиц):

1. Микроскопическая капля тумана имеет радиус 0,3 мкм. Из сколько миллиардов молекул воды состоит эта капля?  $11,3 \cdot 10^9$
2. В озеро, имеющее среднюю глубину 10 м и площадь поверхности 20 км<sup>2</sup>, бросили кристаллик поваренной соли массой 0,01 г. Сколько молекул этой соли оказалось бы в наперстке воды объемом 2 см<sup>3</sup>, зачерпнутой из озера, если полагать, что соль, растворившись, равномерно распределилась по всему объему воды озера?  $10^6$
3. Молярная доля изотопа литий-6 в природном литии составляет 7,42 %. Полагая, что оставшаяся доля представлена изотопом литий-7, определить относительную атомную массу природного лития. 6,93

#### V. Олимпиада.

1. Дрон летел по маршруту база – пункт А – пункт Б – база. При движении от базы до пункта А дрон летел с постоянной скоростью, превышающей среднюю. При движении от пункта А до пункта Б дрон двигался с постоянной скоростью, равной средней. При возвращении на базу из пункта Б, у дрона сели аккумуляторы, и его скорость стала в 3 раза меньше средней. При этом от базы до пункта А дрон пролетел за время в 3 раза меньшее, чем время его движения от пункта Б на базу. Во сколько раз скорость дрона при движении от базы до пункта А превышает скорость дрона при движении от пункта Б до базы? 3
2. Доска длиной  $l = 54$  см с лежащим на ее краю бруском движется по горизонтали. Какой должна быть минимальная скорость доски  $v$ , чтобы при ее столкновении с препятствием, закрепленным неподвижно, брусок слетел с доски? Коэффициент трения  $\mu = 0,30$ . 1,8 м/с



Масса куба  $m = 100$  кг; длина ребра  $a = 50$  см; коэффициент трения скольжения  $\mu = 0,30$ .  $A_1 = 300$  Дж.  $A_2 = 317$  Дж.

**Вопросы:**

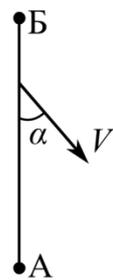
1. Почему массу нельзя определять как «количество вещества» в теле?
2. Сравнить число молекул  $N_1$  в одном моле двухатомного газа – молекулярного кислорода  $O_2$  и число молекул  $N_2$  в одном моле трехатомного газа - озона  $O_3$ .
3. При сгорании углерода 12 г углерода соединились с 32 г кислорода. Изменилось ли при этом количество вещества?
4. Сравните число молекул  $N_1$  в 1 г водорода и число молекул  $N_2$  в 1 г кислорода.
5. Имеется 10 г одноатомного газа гелия – He. Сколько моль содержит это количество?
6. Что общего и в чем различие между молями разных веществ?
7. Имеется два сосуда. В одном находятся 1 г молекулярного водорода  $H_2$ , в другом – 8 г молекулярного кислорода  $O_2$ . В каком сосуде находится большее количество вещества?

**Разное.**

1. Машина едет четверть общего пути со скоростью  $v = 25$  км/ч, четверть от общего времени со скоростью  $v = 30$  км/ч и остальной участок дороги со скоростью  $v = 10$  км/ч. Найти среднюю скорость в км/ч с точностью до десятых. Выразить третий путь и третье время. Ответ 17,6
2. На горизонтальной поверхности покоится клин, наклонная плоскость которого составляет с горизонтом угол  $\alpha = 50^\circ$ . В клин попадает и упруго отражается шарик. Его скорость до удара направлена горизонтально, а после удара вертикально. Определите отношение массы клина к массе шарика. Трением пренебречь. 3,4 (у меня 2)
3. В дне цилиндрической кастрюли площади  $7$  дм<sup>2</sup> просверлили отверстие площадью  $2$  дм<sup>2</sup> и вставили в нее пластмассовую трубку. Масса кастрюли с трубкой равна  $2$  кг, высота кастрюли  $30$  см. Кастрюля стоит на ровном листе резины вверх дном. Сверху в трубку осторожно наливают воду. До какого уровня  $H$  можно налить воду, чтобы она не вытекала снизу?  $0,7$  м. Без атм.

**Олимпиада**

1. Беспилотные летательные аппараты применяют для доставки полезных грузов. Продолжительность полета аппарата по маршруту  $A \rightarrow B$  в безветренную погоду составляет  $t_0 = 400$  с. Расстояние  $AB$  равно  $S = 9,6$  км.
  - Найдите скорость  $U$  аппарата в спокойном воздухе.  $24$  м/с
  - Допустим, что в течение всего времени полета ветер дует с постоянной скоростью  $V = 16$  м/с под углом  $\alpha$  к прямой  $AB$  (см. рис.) таким, что  $\sin \alpha = 0,6$ .
  - Найдите продолжительность  $t_1$  полета по маршруту  $A \rightarrow B$  в этом случае. Скорость аппарата относительно воздуха постоянна и равна  $U$ .  $500$  с
  - При каком значении угла  $\alpha$  продолжительность полета по маршруту  $A \rightarrow B \rightarrow A$  максимальная? Движение аппарата прямолинейное.
  - Найдите максимальную продолжительность  $t_{\max}$  полета по маршруту  $A \rightarrow B \rightarrow A$ . Движение аппарата прямолинейное.



## Занятие 2. Основные понятия молекулярной физики.

### I. Вопросы (блиц):

1. Почему для проведения химической реакции вещество измеряют молями?
2. Где содержится больше молекул: в комнате объемом  $50 \text{ м}^3$  при нормальном атмосферном давлении и температуре  $20^\circ\text{C}$  или в стакане воды объемом  $200 \text{ см}^3$ ?  $N_1 = 1,25 \cdot 10^{27}$ ;  $N_2 = 6,7 \cdot 10^{24}$ .
3. Молекулы можно разделить на атомы. Почему же тогда молекула – мельчайшая частица вещества?
4. Можно ли взвесить на весах  $1000\ 000$  молекул воды? Можно ли взвесить на весах  $0,000001$  кмоль воды? Ответ: а) нет; б) да.
5. Можно ли провести какую-либо химическую реакцию без остатка? да
6. Пусть имеется  $1 \text{ г}$  водорода и  $1 \text{ г}$  кислорода. Происходит реакция образования воды, которой образовалось максимально возможное количество. Какое вещество осталось, а какое прореагировало полностью? Водород. Кислород.
7. У каких физических явлений название начинается на букву Г?
8. Сколько молей воды образуется из шести молей атомарного кислорода и 6 молей молекулярного водорода? 6
9. Каково значение молярной массы для солнечного вещества? Состав Солнца (по массе): водород –  $73\%$ , гелий –  $25\%$ , тяжелые элементы –  $2\%$ . Почему она меньше единицы?  $0,6 \text{ г/моль}$
10. Выразите через основные единицы следующие единицы величин: Н, Па, Вт.
11. Смешиваются водород и кислород одинаковой массы. Каково отношение числа молекул? 16
12. Одна треть молекул азота массой  $10 \text{ г}$  распалась на атомы. Определить полное число  $N$  частиц, находящихся в газе.  $2,9 \cdot 10^{23}$

### II. Задачи (блиц):

1. Кукуруза на площади  $1 \text{ га}$  в сутки потребляет около  $1 \text{ т}$  углекислого газа. Какое количество углерода усваивается при этом растениями?  $273 \text{ кг}$
2. Считая, что объем молекулы воды равен  $1,1 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$ , найти, какой процент от всего пространства, занятого водой, приходится на долю самих молекул.  $36,7\%$
3. Молярная масса смеси кислорода и гелия равна  $18 \text{ г/моль}$ . Масса гелия  $8 \text{ г}$ . Определить массу кислорода в смеси.  $64 \text{ г}$
4. Масса тела среднего человека равна  $60 \text{ кг}$ . Масса крови в среднем составляет  $8\%$  от массы тела человека; плотность крови  $\rho = 1,050 \text{ г/см}^3$ , содержание гемоглобина (Hb) в ней –  $14 \text{ г}$  на  $100 \text{ мл}$ ;  $1 \text{ г}$  гемоглобина связывает примерно  $1,34 \text{ мг}$  кислорода. Сколько молекул кислорода может перенести кровь за один кругооборот?  $0,856 \text{ г}$ .  $1,6 \cdot 10^{22}$ .

**III. Термодинамическая система** – тело или несколько тел, которые ограничены поверхностью (оболочкой) и могут обмениваться друг с другом или с внешней средой энергией или веществом. 3 типа систем: 1) **Изолированная** система – не обменивается с окружающей средой ни веществом, ни энергией. 2) **Замкнутая** (закрытая) система – обменивается с окружающей средой только энергией. 3) **Открытая**?

Если система не изолирована, то ее состояние может изменяться. Изменение состояния термодинамической системы называют **термодинамическим процессом**. Если процессы не протекают, то система находится в **равновесном**

**состоянии. Тепловое равновесие.** Величины, характеризующие равновесное состояние термодинамической системы, называются **параметрами состояния**.

- 1) **Объем (V)** - свойство термодинамической системы занимать часть пространства, измеряемое в кубических метрах.
- 2) **Концентрация (n)** – измеряется отношением числа молекул данного вещества в объеме, к этому объему.  $n = N/V$
- 3) **Плотность (ρ)** – свойство вещества занимать определенный объем, измеряемое отношением массы вещества в данном объеме к этому объему.  $\rho = m/V$
- 4) **Давление (p)** – свойство тел оказывать влияние на данное тело при соприкосновении с ним, измеряемое отношением силы, действующей перпендикулярно поверхности тела, к площади этой поверхности.  $p = F/S$
- 5) **"Главный" параметр - температура. Равновесная термодинамическая система** обладает свойством иметь одинаковую температуру в каждой ее области. Каждому состоянию системы при данных P и V (воздух в комнате) соответствует своя температура. **Температура** указывает величину отклонения данного состояния системы от состояния, принятого за нулевое состояние, и определяет направление переноса тепловой энергии при контакте двух тел.

**На будущее постулируем:** **1.** Все вещество состоит из частиц, атомов или молекул. **2.** Частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении. **3.** Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

**IV. Задачи (блиц):**

1. **Оцените** концентрацию свободных электронов в натрии, полагая, что на один атом приходится один свободный электрон. Плотность натрия  $970 \text{ кг/м}^3$ , его молярная масса  $23 \text{ г/моль}$ .  $2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$
2. Определите молярные объемы урана и золота.  $12,5 \text{ см}^3/\text{моль}$ ;  $10,2 \text{ см}^3/\text{моль}$
3. Плотность неизвестного газа  $\rho = 0,09 \text{ кг/м}^3$ . При этом в объеме  $V = 0,1 \text{ м}^3$  содержится  $N = 2,7 \cdot 10^{24}$  молекул. Определить, что это за газ.  $2 \text{ г/моль}$  (водород)

**V. Олимпиада.**

1. **Мыльный пузырь**, заполненный гелием, находится в равновесии в воздухе. Найти отношение массы гелия в пузыре  $m$  к массе оболочки  $M$ . Толщиной оболочки и ее упругостью пренебречь. Оболочка тяжелее гелия примерно в 6 раз
2. **Стреляя из автомата АК-47**, солдат испытывает отдачу: на него действует средняя сила  $F_{\text{сп}}$ , эквивалентная весу массы  $M = 6,4 \text{ кг}$ . Учитывая, что масса пули  $m = 7 \text{ г}$  и вылетает она с начальной скоростью  $v_0 = 850 \text{ м/с}$ , определить скорострельность  $n$  автомата.  $10,7 \text{ с}^{-1}$
3. **Две** пластинки массой  $M$  и длиной  $\ell$  прикреплены шарнирно по одной из своих сторон к потолку. Шар радиуса  $R = \ell/6$  вставлен между пластинками так, что расстояние от точек касания шара и пластинок до шарнира равно  $\ell/2$ . Коэффициент трения между шаром и пластинками  $\mu$ . Какой должна быть масса шара, чтобы он находился в равновесии? При каком максимальном коэффициенте трения между шаром и пластинками пластинки не смогут удержать шар при любой его массе?



Относительно шарнира  $N \frac{\ell}{2} = Mg \sin \alpha \frac{\ell}{2}$ . Условие равновесия шара:  $\vec{F}_T + 2\vec{N} + 2\vec{F}_{TP} = 0$ .

$m < (3\mu - 1)M/5$ ;  $\mu = 1/3$ .

### Вопросы:

1. Что понимают под термодинамической системой?
2. Как связано понятие температуры с понятием теплового равновесия?
3. Одно тело находится при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ , другое при температуре  $+20^{\circ}\text{F}$ . Какое из них холоднее? Второе тело холоднее.
4. При какой температуре совпадают ее значения по шкале Цельсия и Фаренгейта?  $-40^{\circ}\text{F} = -40^{\circ}\text{C}$
5. Почему броуновские частицы должны быть относительно малыми?
6. Сливки на молоке быстрее отстаиваются в холодном помещении. Почему?
7. Перечислите индикаторы температуры, которые вы используете в повседневной жизни, за исключением термометров и ваших органов осязания.
8. Какой физический смысл имеет величина, обратная концентрации?
9. При ремонте дороги асфальт разогревают. Почему запах разогретого вещества ощущается издалека?
10. Шкура коня, который имеет вдвое больший размер, испытывает вдвое большее давление со стороны внутренних органов. Так ли это?
11. Как бы вы поступали, чтобы измерить температуру: а) Солнца; б) верхних слоев атмосферы; в) крошечного насекомого; г) Луны; д) дна океана?

### Разное

1. Температурная шкала Фаренгейта строится следующим образом: температура плавления льда при нормальных условиях принимается равной  $32^{\circ}\text{F}$ , а температура кипения воды полагается равной  $212^{\circ}\text{F}$ . Предполагая шкалу линейной, установите связь между температурами, измеренными по шкале Цельсия  $t$  и по шкале Фаренгейта  $t(F)$ .  $t(F) = 1,8t + 32^{\circ}\text{F}$
2. В озеро попала капелька масла массой  $m = 0,1$  мг и покрыла поверхность воды сплошной пленкой толщиной в один молекулярный слой. Плотность масла  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>, диаметр молекулы масла  $d = 2$  нм. Оцените площадь  $S$  масляной пленки на поверхности воды.  $556$  см<sup>2</sup>
4. Считая высоту слоя атмосферы много меньшей радиуса Земли ( $R_3 = 6370$  км), оцените массу атмосферы.  $5,3 \cdot 10^{18}$  кг
5. Концентрация молекул азота в сосуде  $3 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>. Определите плотность этого газа.  $1,4$  кг/м<sup>3</sup>
3. Считая кристаллическую решетку железа кубической, вычислить среднее расстояние  $r$  между центрами соседних атомов железа. Плотность железа  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, молярная масса  $\mu = 0,056$  кг/моль.  $r = [\mu / (\rho N_A)]^{1/3} = 2,3 \cdot 10^{-10}$  м.
4. Определить массу капли воды, при составлении всех молекул которой вплотную друг к другу получилась бы нить, опоясывающая весь земной шар. Диаметр молекулы воды  $0,17$  нм.

### Занятие 3. Основное уравнение МКТ

#### I. Вопросы (блиц):

1. Какова природа вязкого трения в жидкостях и газах?
2. Почему броуновское движение особенно заметно у наиболее мелких взвешенных частиц, а у более крупных оно происходит менее интенсивно?

3. Сила тяжести на Луне меньше чем на Земле. Почему же на Земле пыль долго удерживается над ее поверхностью, а на Луне быстро оседает?
4. Скользкость льда объяснили диффузией молекул в поверхностном слое. Как это понимать?
5. Морская вода содержит 8% соли (по массе). Сколько пресной воды надо добавить к 30 кг морской, чтобы концентрация соли стала 5%?
6. Выразите плотность вещества через массу его молекулы.  $\rho = m_0 n$
7. Вишня и ее косточка имеют форму шариков, причем слой мякоти вишни такой же толщины, как и косточка. Во сколько раз объем сочной части вишни больше, чем объем косточки? 26
8. Мальчик надувает воздушный шарик. При радиусе шарика 10 см скорость увеличения радиуса равна 1 мм/с. Какой объем воздуха ежесекундно выдыхает мальчик?  $125,6 \text{ см}^3$
9. Почему сильно разреженная газовая среда химически инертна?
10. Почему облака не падают на землю?

## II. Задачи (блиц):

1. Какое время  $\tau$  понадобится, чтобы на поверхность стекла нанести слой серебра толщиной  $d = 5 \text{ мкм}$ , используя для этого атомарный пучок с концентрацией атомов серебра  $n = 10^{18} \text{ 1/м}^3$ , движущихся со скоростью  $v = 390 \text{ м/с}$ ? Молярная масса серебра  $\mu = 108 \text{ г/моль}$ , плотность  $\rho = 10,5 \text{ г/см}^3$ .  $\tau = \rho N_{\text{Ад}} / \mu n v = 5 \text{ мин}$ .
2. Определите среднее расстояние между центрами соседних молекул в куске льда ( $V \approx d^3 \cdot N$ ).  $0,32 \text{ нм}$
3. Какой объем имело бы твердое тело, «спрессованное» из молекул воздуха, находящегося в кабинете физики? Средний диаметр молекул воздуха  $0,25 \text{ нм}$ .

## III. Идеальный газ. Средняя кинетическая энергия молекулы:

$$\bar{E}_k = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_N}{N} = \frac{m_0}{2} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} \right) = \frac{m_0}{2} \bar{v}^2.$$

**Давление газа.** Средняя сила давления газа. От каких параметров газа зависит его давление на стенки сосуда? **Метод размерностей:**  $p \sim m_0^\alpha n^\beta v^\gamma$ . Размерности подчиняются простым правилам. Нельзя складывать и вычитать разные размерности, но их можно умножать, делить и возводить в степени.

$[Pa] = [кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-2}] = [кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-2}] \rightarrow \alpha = 1; -3\beta + \gamma = -1; \gamma = -2; \rightarrow \alpha = 1; \gamma = 2; \beta = 1$ . Следовательно:  $p \sim m_0 n v^2$ .

Формула давления газа для случая, когда молекулы газа движутся хаотически:  $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 \rightarrow p = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \rightarrow \bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \quad p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$ . С

увеличением температуры газа увеличивается средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул! **1.** Средней квадратичной скорости молекул газа:  $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ . **2.**  $p = nkT$  (газовый закон).

## IV. Задачи (блиц):

1. Найти среднеквадратичные скорости поступательного движения молекулы водорода ( $\mu = 2 \text{ г/моль}$ ) и пылинки массы  $m = 0,1 \text{ мг}$ , взвешенной в воздухе, при температуре  $T = 300 \text{ К}$ .  $1,93 \text{ км/с}$ .  $0,35 \text{ мкм/с}$

2. Для того, чтобы оторвать змею массой  $M$  и длиной  $\ell$  от добычи, ее надо тянуть за хвост с силой  $F$ . Если ее отпустить, то она сворачивается в кольцо за время  $\tau_1$ . За какое время может свернуться в кольцо змея в два раза большего размера?

Используем метод размерностей:  $\tau = C\sqrt{\frac{\ell m}{F}}$ .  $F = \mu mg$ .  $\tau_2 = \tau_1\sqrt{2}$

3. В сосуде находится смесь атомарного азота и молекулярного водорода. При температуре  $T$  давление в сосуде равно  $p$ . При температуре  $2T$ , когда оба газа полностью диссоциированы, давление равно  $3p$ . Определите отношение масс азота и водорода в смеси. 7
4. К молекулярному пучку, со скоростью молекул  $v = 1000$  м/с и концентрацией  $n = 5,0 \cdot 10^{17}$  м<sup>-3</sup>, нормально движется «зеркальная» стенка со скоростью  $u = 50$  м/с. Найти давление, оказываемое на стенку пучком молекул. Масса одной молекулы  $m_0 = 3,3 \cdot 10^{-26}$  кг.  $p = 2nm_0(v + u)^2$ .
5. Струя воды, движущаяся со скоростью 20 м/с, ударяется о стену перпендикулярно поверхности. Вычислите давление на стену, если вода не отражается от стены.  $4 \cdot 10^5$  Па

#### V. Олимпиада.

1. Космический корабль площадью поперечного сечения  $S = 4$  м<sup>2</sup>, приближаясь к Земле, снизил скорость до величины  $v = 8$  км/с. Манометр за бортом фиксирует следы атмосферы - давление воздуха  $p = 10^{-4}$  Па. Зонд определил среднюю квадратичную скорость молекул воздуха за бортом  $v_{\text{кв}} = 300$  м/с. Оценить, сколько молекул воздуха сталкиваются с кораблем за время  $t = 1$  с. Определить концентрацию молекул воздуха за бортом, потом число столкновений.  $2,2 \cdot 10^{21}$ .
2. Подводная лодка движется со скоростью  $V_{\text{лодки}} = 20$  м/с на глубине  $h = 500$  м с лобовым сечением  $S = 100$  м<sup>2</sup>. Лодка попадает в водоросли, которые движутся навстречу со скоростью  $V_{\text{водоросли}} = 5$  м/с относительно неподвижной воды. Плотность водорослей составляет  $\rho = 50$  г/м<sup>3</sup>. Считать, что столкновение водорослей с лодкой происходит неупругое. Также водоросли создают силу трения  $F_{\text{тр}} = khS$ , где  $k = 2 \times 10^{-3}$  Н/м<sup>3</sup>. На сколько должна возрасти сила тяги  $\Delta F$  двигателя, чтобы скорость лодки не изменилась? 3225 Н.
3. Атмосфера некоторой планеты состоит из плотного облака неподвижной, относительно планеты, звездной пыли. Для исследования данной планеты был отправлен надежный космический аппарат-«шарик», массой  $m$  и радиусом  $R$ . Опускаясь на поверхность планеты «шарик» двигался равномерно с выключенными двигателями со скоростью  $v$ . Забирая небольшие порции звездной пыли из атмосферы планеты, «шарик» установил, что плотность пыли зависит от расстояния до центра планеты  $r$  по закону  $\rho = \alpha/r^2$ , где  $\alpha$  – известная константа. Найдите по этим данным массу  $M$  планеты. Считать удары пылинок о космический аппарат абсолютно упругими.  $m = \pi\alpha R^2 v^2 / (Gm)$

#### Вопросы:

1. Зависит ли давление газа на стенку от ее температуры?
2. Если одна из стенок сосуда липкая (к ней прилипают молекулы), то изменится ли давление газа на эту стенку?
3. Почему сильный ветер буквально «валит с ног»?

4. Почему на шоссе встречных автомобилей гораздо больше, чем обгоняющих?
5. В закрытом сосуде находится газ, молекулы которого при ударах о стенки передают им часть своей кинетической энергии. В результате чего, если сосуд теплоизолированный, он, казалось бы, должен нагреваться. Так ли это? Медленные молекулы получают, быстрые отдают, температура не изменяется.
6. В результате некоторого процесса концентрация молекул идеального газа уменьшилась в 2 раза, а давление возросло в 4 раза. Во сколько раз изменилась средняя кинетическая энергия поступательного теплового движения молекул идеального газа, если число молекул было неизменным? 8
7. Идеальный газ находится в закрытом сосуде при нормальном атмосферном давлении. При неизменной концентрации молекул средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения молекул увеличивается на 2%. Определите конечное давление газа. 103351 Па
8. В герметичных сосудах при одинаковых температурах находятся газы с молярной массой  $M_1 = 2$  г/моль и  $M_2 = 4$  г/моль. Сравните средние квадратичные скорости молекул газа в сосудах.  $\bar{v}_{кв2} = \bar{v}_{кв1} / \sqrt{2}$
9. При какой температуре молекулы кислорода имеют такую же среднюю квадратическую скорость, как молекулы водорода при температуре 100 К? 1600 К
10. Почему невозможно охладить что-либо ниже  $-273,15^{\circ}\text{C}$  (абсолютного нуля)?
11. Восходящие потоки теплого воздуха некоторые птицы используют для набора высоты и последующего парения. Каким образом им это удается?
12. Какая температура в космосе?
13. Смешиваются водород и кислород одинаковой массы. Каково отношение средних квадратичных скоростей молекул? 4
14. Скорости молекул азота при комнатной температуре порядка 500 м/с. Почему же их удары не вызывают болезненных ощущений?
15. Среднеквадратичная скорость молекул кислорода при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  равна 460 м/с. Какова среднеквадратичная скорость молекул водорода при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ ? 2151 м/с
16. В первом случае мяч неподвижен, во втором – скользит по земле со скоростью  $\bar{v}$ . В каком случае на мяч в единицу времени попадает дождевых капель больше и во сколько раз, если дождевые капли падают отвесно со скоростью  $\bar{v}$ ?
17. На весах уравновешен закрытый сосуд, на дне которого находится кусок твердой углекислоты. Нарушится ли равновесие весов, когда углекислота испарится?
18. В баллоне смесь трех газов. Парциальное давление одного 0,3 атм, второго - 45 кПа, третьего - 190 мм рт.ст. Какое давление в баллоне в атмосферах?
19. Определите по порядку величины максимальную скорость, с которой артиллерийский снаряд может вылететь из ствола орудия.
20. Сколько существует агрегатных состояний вещества?

### Разное

1. При повышении температуры идеального газа на  $150^{\circ}\text{C}$  среднеквадратичная скорость его молекул увеличилась от 400 м/с до 500 м/с. На сколько градусов

нужно нагреть этот газ, чтобы увеличить среднеквадратичную скорость его молекул от 500 м/с до 600 м/с?  $\Delta T = 183^\circ\text{C}$

2. Температура Титана, спутника Сатурна, составляет примерно 100 К. Какова наименьшая масса молекулы газа, который может присутствовать в атмосфере Титана? Могут ли присутствовать молекулы азота  $\text{N}_2$ ? Масса Титана составляет  $M = 1,35 \cdot 10^{23}$  кг, его радиус  $R = 2575$  км. Считается, что все молекулы определенного газа покинут атмосферу планеты, если их среднеквадратичная скорость больше  $1/6$  второй космической скорости для этой планеты.  $m_{\min} \approx 2,1 \cdot 10^{-26}$  кг, не могут
3. В ампуле объемом  $3 \text{ см}^3$ , из которой откачан воздух, в течение одного года содержится радий в количестве 5 мг. Известно, что из 1 грамма радия за 1 секунду вылетает в среднем  $3,7 \cdot 10^{10}$  - частиц (ядер гелия). Найдите давление образовавшегося в ампуле гелия при температуре 300 К.  $p = 8 \text{ Па}$
4. Найти среднеквадратичную скорость пылинки массой  $1,77 \cdot 10^{-12}$  кг, взвешенной в воздухе при нормальных условиях:  $p = 101325 \text{ Па}$ ,  $T = 273,15 \text{ К}$ .  $0,08 \text{ мм/с}$
5. В закрытом сосуде находится газ, у которого следующие параметры:  $M = 4$  г/моль,  $\rho = 4 \text{ кг/м}^3$ ,  $p = 0,8 \text{ МПа}$ . Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул этого газа.  $\bar{E}_{\text{кин}} = \frac{3}{2} \frac{pM}{N_A \rho}$
6. Современная техника позволяет создавать вакуум до 1 пПа. Какова концентрация оставшихся молекул газа при температуре 300 К?  $2,4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$
7. В баллоне находилось 300 г гелия. Через некоторое время в результате утечки гелия и уменьшения абсолютной температуры на 10%, давление в баллоне уменьшилось на 20%. Какое число молекул гелия просочилось из баллона?  $N = 5 \cdot 10^{24}$  молекул
8. Космический корабль, имеющий лобовое сечение  $50 \text{ м}^2$  и скорость 10 км/с, попадает в облако микрометеоритов, концентрация которого  $1 \text{ м}^{-3}$ . Масса каждого микрометеора 0,02 г. Какой должна быть сила тяги двигателя, чтобы скорость корабля не изменилась? Удар микрометеоритов об обшивку корабля считаем абсолютно неупругим.  $0,1 \text{ МН}$
9. Определить средний квадрат скорости поступательного движения взвешенных в воздухе капелек воды радиусом 10 нм при температуре  $17^\circ\text{C}$ .  $2,9 \text{ м}^2/\text{с}^2$

### **Олимпиада.**

1. Какова толщина покрытия стенки золотом при напылении в течение 1 мин, если атомы золота, обладая энергией  $10^{-17}$  Дж, производят на стенку давление 100 Па. Плотность золота  $19300 \text{ кг/м}^3$ .
2. Сосуд в форме куба объемом  $V = 8$  л содержит идеальный газ в количестве  $\nu = 0,5$  моль. Средняя квадратическая скорость молекул  $v_{\text{кв}} = 400$  м/с. Найти число соударений молекул с одной из шести стенок сосуда за промежуток времени  $\Delta t = 3$  мкс.  $5 \cdot 10^{20}$ .

## **Занятие 4. Газовые законы.**

### **I. Вопросы (блиц):**

1. Почему реактивные самолеты могут летать с большими скоростями только в верхних слоях атмосферы?

2. Чему равно отношение средней скорости молекул газообразного водорода  $H_2$  к средней скорости молекул кислорода  $O_2$  при одинаковой температуре? 4
3. **Три** моля водорода находятся в сосуде при температуре  $T$ . Какой будет температура трех молей кислорода в сосуде того же объема и при том же давлении? Считать эти газы идеальными.  $T$
4. При газовой сварке давление в баллоне со сжатым кислородом упало до  $p_2 = 0,5$  МПа. Какая часть кислорода израсходована, если первоначальное давление  $p_1 = 1,5$  МПа. Температура газа не изменялась.  $2/3$
5. **Ведро** выставлено на дождь. Изменится ли скорость наполнения ведра водой, если подует ветер? Решить задачу и в ИСО падающих капель.
6. **Кубик** из железа имеет температуру  $10^0$ С. Какую температуру имеет другой кубик из железа, если он горячее в два раза?
7. **Плавающее** тело вытесняет объём воды весом, равным весу тела. Почему же тяжёлый катер мчится, почти не погружаясь в воду?
8. Давление идеального одноатомного газа  $p = 100$  кПа. Средняя энергия одной молекулы такого газа  $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-21}$  Дж. Сколько молекул газа  $N$  содержится в объеме  $V = 1$  м<sup>3</sup>?  $N = 3pV/2\varepsilon = 5 \cdot 10^{25}$ .
9. Смешиваются водород и кислород одинаковой массы. Каково отношение оказываемых на стенку давлений? 16
10. В закрытом сосуде находится идеальный газ. При некоторой температуре среднеквадратичная скорость теплового хаотического движения молекул равна 526 м/с, а давление газа равно 101450 Па. Чему равна плотность этого газа? 0,91
11. В сосудах 1 и 2 находится один и тот же идеальный газ. Концентрации молекул газов в сосудах одинаковые, а среднеквадратичная скорость движения молекул газа в сосуде 1 в три раза меньше, чем в сосуде 2. Чему равно отношение давлений газов в сосудах 2 и 1? 9
12. **В** сосуде с газом относительно некоторой системы отсчета кинетическая энергия молекул газа больше, чем в случае, когда сосуд неподвижен. Почему же температуры газа одинаковы?
13. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул от их массы?

## II. Задачи (блиц):

1. **Атомная бомба** взрывается в подземной полости диаметром 200 м. Каким будет давление в полости, если при взрыве бомбы выделяется  $4 \cdot 10^{15}$  Дж? 0,64 ГПа.
2. **Определить** среднее расстояние между молекулами газа при нормальных условиях.  $3,34 \cdot 10^{-9}$  м.
3. Сосуд разделен на две части перегородкой с краном. В одной части сосуда находится смесь, состоящая из одного моля водорода и одного моля азота, в другой части сосуда вакуум. Она наполняется малым количеством газовой смеси после открытия крана на короткое время. Определить отношение концентраций водорода и азота в обеих частях сосуда. 1. 3,74.

## III. Газовые законы:

1. **Закон Авогадро.** В равных объемах газов при одинаковых давлениях и температурах, содержится одинаковое число молекул. В частности, при

нормальных условиях моли газов занимают одинаковый объем, равный 22,4 л/моль.

**2. Закон Дальтона:**  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_N$ .

**3.**  $p \cdot V = \frac{m}{M_B} RT \rightarrow p \cdot V = \nu \cdot RT$  - уравнение Менделеева – Клапейрона  $\rightarrow \rho = \frac{pM_B}{RT}$ .

Применение уравнения состояния идеального газа к изопроцессам.

**IV. Задачи (блиц):**

1. Спортсмен-ныряльщик массой  $m = 80$  кг прыгает в воду, набрав в легкие  $V_0 = 5$  л воздуха. При этом объем его тела составляет  $V = 82$  л. С какой максимальной глубины  $h$  он может всплыть, не совершая никаких движений. 6,9 м

2. Колокол для подводных работ объёмом  $V = 10$  м<sup>3</sup> опускается вверх дном с борта корабля на дно водоема глубиной  $h = 20$  м. Зашедшая в колокол вода вытесняется из него с помощью баллонов со сжатым воздухом. Объём одного баллона  $V_0 = 40$  л, давление воздуха в нём  $p_0 = 200$  атм. Найти минимальное количество баллонов, которое нужно подсоединить к колоколу с помощью шланга, чтобы вытеснить из него воду? 3 баллона

3. Герметичный шар-зонд, изготовленный из не растягивающегося материала, должен поднять аппаратуру массой  $M = 10$  кг на высоту около 5,5 км, где плотность воздуха вдвое меньше, чем у поверхности Земли. Шар наполняют гелием при температуре  $T = 300$  К и давлении  $p = 1$  атм. Объем шара  $V = 100$  м<sup>3</sup>. Определить массу квадратного метра материала оболочки шара. 0,37 кг/м<sup>2</sup>

4. Идеальный газ расширяется по закону  $p(V) = aV + b$ , где известны  $a < 0$  и  $b > 0$ . При каком объеме газа в этом процессе достигается максимальная температура?  $V = \frac{b}{2a}$ .

**V. Олимпиада.**

1. Плотность газа, состоящего из смеси гелия и аргона, равна  $\rho = 2$  кг/м<sup>3</sup> при давлении  $p = 150$  кПа и температуре 27<sup>0</sup>С. Сколько атомов гелия находится в 1 см<sup>3</sup> газовой смеси?

2. Цилиндрический тонкостенный сосуд высотой  $H$  плавает в воде, погрузившись на глубину  $h$ .  $n = \frac{N_A}{(\mu_2 - \mu_1)} \left( \frac{\mu_2 P}{RT} - \rho \right) = 6,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Сосуд переворачивают вверх дном и опускают в воду в вертикальном положении. На какую глубину  $x$  погрузится нижний край сосуда, если он плавает? Атмосферное давление равно  $p_0$ , плотность воды  $\rho$ . Равновесие стакана в двух случаях и через Б-М уровень вошедшей в стакан воды.  $x = h + \frac{\rho g H h}{p_0 + \rho g h}$

3. Определите наименьшее давление  $\nu$  молей идеального газа в процессе, протекающем по закону  $T = T_0 + \alpha V^2$ , где  $\alpha$  и  $T_0$  – положительные постоянные. Каковы температура и объём одного моля газа при этом давлении?

$$p_{\min} = 2\nu R \sqrt{\alpha T_0}, T = 2T_0, V = \sqrt{\frac{T_0}{\alpha}}$$

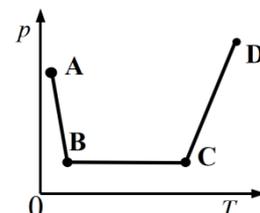
4. В вертикальном цилиндре высотой 2,00 м находится горизонтальный тонкий массивный поршень, который делит цилиндр на две части и может свободно

скользить по нему вверх и вниз. В цилиндр, по обе стороны от поршня помещены одинаковые количества воздуха.

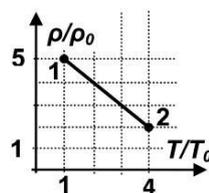
- 1) Определите отношение давлений в нижней и верхней частях цилиндра, если поршень располагается на высоте 50 см от дна цилиндра, а температура в обеих частях цилиндра одинакова. На этой высоте (50 см) поршень располагается при температуре содержимого цилиндра  $T_1 = 315 \text{ К}$ . Чтобы поршень поднялся на 2 см от этого уровня, температуру нужно увеличить до  $T_2 = 336,7 \text{ К}$ . 1,96
- 2) Какой должна стать температура содержимого цилиндра, чтобы поршень поднялся до высоты 60 см над дном цилиндра?
- 3) На каком расстоянии от дна будет располагаться поршень при температуре  $T_1 = 315 \text{ К}$ , если цилиндр перевести в горизонтальное положение?

*Вопросы:*

1. Идеальный газ расширяется по закону  $pV^2 = \text{const}$ . Как изменяется его температура?  $VT = \text{const}$
2. В сосуде постоянного объема при находится идеальный газ, массу которого изменяют. На диаграмме показан процесс изменения состояния газа. В какой из точек диаграммы масса газа наибольшая? А
3. При нагревании идеального газа на  $\Delta t = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  при постоянном давлении объем его увеличился в  $n = 1,5$  раза. Найдите начальную температуру  $T_0$  газа. 300 К
4. Цилиндр разделен на две части подвижным поршнем, которые заполнены одинаковыми массами гелия и водорода при одинаковой температуре. Какую часть цилиндра занимает водород? 2/3
5. Имеется неизвестное вещество. Как простым способом определить его молекулярную массу? Измерить массу, перевести в газ при известных:  $p, V, T$ .
6. Изобразите график изотермического процесса для идеального газа. Известно, что при давлении 0,2 МПа он занимает объем 3 л.
7. С некоторой порцией идеального газа проводят процесс, в котором его температура меняется от  $T_1$  до  $T_2$ , а его давление изменяется пропорционально его объему, т.е. по закону  $P = \alpha V$ , где  $\alpha$  – некоторая константа. Во сколько раз изменится объем газа в результате описанного процесса?  $\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$
8. Газ медленно вытекает из баллона, так что его давление в баллоне остается постоянным. Как изменяется температура газа в зависимости от массы газа  $m$  в баллоне? Если давление не изменяется, а масса уменьшается, то температура растет обратно массе.
9. Как изменяется температура идеального газа  $T$ , расширяющегося по закону  $p^2V = \text{const}$  при неизменной массе? возрастает
10. Как зависит подъемная сила аэростата  $F$  от температуры окружающего воздуха  $T$ ? При эластичной оболочке подъемная сила не зависит от температуры.
11. При изотермическом сжатии объем одного моля идеального газа уменьшился на 0,5%. На сколько процентов изменилось его давление? Повысилось на 0,5%



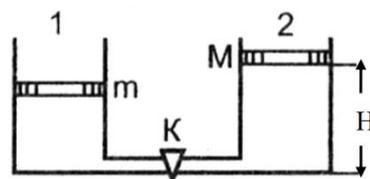
12. Постоянное количество гелия участвует в процессе, диаграмма которого в координатах плотность газа – температура изображается участком прямой. Во сколько раз давление гелия в точке 2 больше давления газа в точке 1? 1,6



13. Сколько молекул воздуха при нормальных условиях находится в пустой бутылке?

14. Обрисуйте график изохорного процесса для идеального газа. Известно, что при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  он создает давление 80 кПа.

15. В цилиндрическом сосуде 1 под поршнем массой  $m = 5$  кг находится одноатомный идеальный газ. Сосуд 1 соединен трубкой, снабженной краном, с таким же сосудом 2, в котором под поршнем массой  $M = 10$  кг находится такой же газ. Сосуды и трубка теплоизолированные. В начальном состоянии кран К закрыт, температура газа в обоих сосудах одинакова, поршень в сосуде 2 расположен на высоте  $H = 10$  см от дна. На какое расстояние  $h$  передвинется поршень в сосуде 1 после открывания крана? Объемом трубки с краном можно пренебречь, атмосферное давление не



учитывать.  $\Delta h = \frac{M}{m} H$

16. Чему равно соотношение давлений в сосудах с кислородом и водородом, если концентрации газов и среднеквадратичные скорости одинаковы? 8

17. Почему атмосферное давление на экваторе всегда меньше, чем в приполярных областях?

18. Литр водорода при сгорании дает меньше всего энергии из возможного топлива, но килограмм водорода дает больше всего энергии. Почему это так?

19. Почему мячик, наполненный воздухом, отскакивает при ударе о пол?

20. Объем газа уменьшился в 2 раза, а его температура увеличилась в 1,5 раза. Как изменилось давление газа?

21. Как изменится подъемная сила воздушного шара, если наполняющий его гелий заменить водородом? Массой оболочки шара пренебречь. Увеличится в  $27/25$  раз.

22. Какова разность давлений воздуха между полом и потолком комнаты высотой 2,55 м при нормальных условиях? 32 Па

23. При уменьшении объема газа в 2 раза давление увеличилось на 120 кПа и абсолютная температура возросла на 10%. Каким было начальное давление? 100 кПа

24. Баллон содержит сжатый идеальный газ при температуре  $t = 27^{\circ}\text{C}$  и давлении  $p_1 = 0,2$  МПа. Каким будет давление в баллоне, когда из него будет выпущено  $\alpha = 0,7$  массы газа, а температура понизится до  $t_2 = 0^{\circ}\text{C}$ ?  $\approx 56,4$  кПа

25. Давление и температура внутри гелиевого шарика почти такие же, как и воздуха снаружи. Почему тогда шарик взлетает?

**Разное**

- Один моль идеального газа расширяется так, что его давление зависит от объема газа по закону  $p = a - bV^2$  ( $a > 0, b > 0$ ). Определите максимальную температуру газа.  $T = \frac{2a}{3R} \sqrt{\frac{a}{3b}}$
- Резиновый шарик массой  $m = 2$  г надувается гелием при температуре  $t = 17^\circ\text{C}$ . По достижении в шарике давления, равного 1,1 атм, он лопается. Какая масса гелия была в шарике, если перед тем, как лопнуть, он имел сферическую форму? Известно, что резиновая пленка рвется при толщине  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  см. Плотность резины  $\rho = 1,1$  г/см<sup>3</sup>. 0,47 г
- По трубе с площадью поперечного сечения  $S = 5$  дм<sup>2</sup> течет углекислый газ. Давление газа  $p = 390$  кПа, температура газа  $T = 280$  К, причем за время  $\tau = 10$  мин через поперечное сечение трубы проходит  $m = 20$  кг газа. Найти скорость течения газа по трубе. 9 см/с
- Поршень площадью 10 см<sup>2</sup> и массой 5 кг может без трения перемещаться в вертикальном цилиндрическом сосуде, обеспечивая при этом его герметичность. Сосуд с поршнем, заполненный газом, покоится на полу неподвижного лифта при атмосферном давлении 100 кПа, при этом расстояние от нижнего края поршня до дна сосуда 20 см. Каким станет это расстояние, когда лифт поедет вверх с ускорением 2 м/с<sup>2</sup>. Изменение температуры газа не учитывайте. 18,75 см
- Посередине откачанной и запаянной с обоих концов горизонтальной трубки длиной  $L = 1$  м находится столбик ртути длиной  $h = 20$  см. Если трубку поставить вертикально, столбик ртути сместится на  $s = 10$  см. До какого давления была откачана трубка, если температура во время опыта не изменялась?  $p_0 = 375$  мм рт.ст.
- При давлении 66,4 кПа и температуре 142,3<sup>0</sup>С плотность смеси газов, состоящей из кислорода и азота равна 2,9 кг/м<sup>3</sup>. Найдите массу кислорода в 4,6 м<sup>3</sup> смеси. Это не весь объем газа. Выразить объемы данных масс газов при данном давлении и общий объем при данном давлении. Дальше решить систему! 4,4 кг
- В сосуде объемом  $V$  находится идеальный газ с молярной массой  $\mu$  под давлением  $P_1$  и при температуре  $T_1$ . Из сосуда вышла порция газа массой  $m$ . Определите давление  $P_2$  газа, оставшегося в сосуде, если его температура понизилась до  $T_2$ .  $P_2 = \frac{\left(\frac{P_1 V \mu}{RT_1} - m\right) \cdot RT_2}{\mu V}$
- На какую величину различаются значения плотности воздуха летом при температуре + 27<sup>0</sup>С и зимой при температуре – 27<sup>0</sup>С? Давление нормальное.  $\Delta\rho = 256$  г/м<sup>3</sup>
- Нижний конец вертикальной узкой трубки длины 2L (в мм) запаян, а верхний открыт в атмосферу. В нижней половине трубки находится газ при температуре  $T$ , а верхняя ее половина заполнена ртутью. До какой минимальной температуры надо нагреть газ в трубке, чтобы он вытеснил всю ртуть? Внешнее давление в миллиметрах ртутного столба численно равно L.  $T = (9/8)T_0$

10. Определите наибольшее возможное давление  $\nu$  молей идеального газа в процессе, происходящем по закону  $T = T_0 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right)$ , где  $T_0$ ,  $V_0$  — известные положительные постоянные ( $V > V_0$ ).  $p = \frac{\nu RT_0}{4V_0}$
11. В баллоне находится идеальный газ при температуре  $32^\circ\text{C}$  и давлении  $7,1$  атм. В баллоне есть клапан, который открывается при давлении  $8,3$  атм, при этом часть газа выходит. До какой температуры нужно нагреть баллон, чтобы через клапан вышло  $3\%$  массы газа?  $95^\circ\text{C}$
12. Воздушный насос захватывает за одно качание  $V = 10$  см<sup>3</sup> воздуха. Какое давление  $p$  установится в колоколе объемом  $V_1 = 6$  л после  $400$  качаний, если начальное давление равно атмосферному?  $p = \frac{5}{3} p_0$
13. Природный газ Ухтинского месторождения состоит из метана ( $\text{CH}_4$ ) с объемной долей  $\gamma_1 = 0,88$ , азота ( $\text{N}_2$ ) —  $\gamma_2 = 0,10$  и бензола ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) —  $\gamma_3 = 0,02$ . Определить массу этого газа в баллоне объемом  $0,20$  м<sup>3</sup> при температуре  $300$  К и давлении (по манометру)  $3,0$  МПа.  $9,98$  кг. Находим молярную массу смеси, далее — число молей, потом массу газа.
14. Стеклообразный баллон емкостью  $V$  наполнен некоторым газом до давления  $p_1$ . Его масса при взвешивании оказалась при этом равной  $m_1$ . Часть газа выпустили наружу, так что давление стало равным  $p_2$ , а масса баллона —  $m_2$ . Определите плотность этого газа при давлении  $p$  и той же температуре, при которой проводился опыт.  $\rho = \frac{p \cdot (m_1 - m_2)}{V(p_1 - p_2)}$
15. Атмосфера Венеры состоит в основном из двуокиси углерода, имеет у поверхности давление, равное девятистам земным атмосферам и температуру  $T_1 = 700$  К. Для атмосферы Земли температура у поверхности близка к значению  $T = 300$  К. Найдите отношение плотностей атмосфер у поверхностей Венеры и Земли.  $58,5$

### Олимпиада.

1. Один моль идеального газа расширяется так, что его давление зависит от объема газа по закону  $p = a - bV^2$  ( $a > 0$ ,  $b > 0$ ). Определите максимальную температуру газа.  $T = \frac{2a}{3R} \sqrt{\frac{a}{3b}}$
2. В тонкой длинной трубке длиной  $114$  см, запаянной с одного конца, а с другого конца плотно закрытой пробкой, находится азот при давлении, составляющем  $\frac{2}{3}$  от атмосферного. Трубку закрытым концом вертикально погрузили в сосуд с ртутью на глубину  $38$  см. Определить разность уровней ртути в трубке и сосуде, после того как вынули пробку. Давление атмосферы нормальное.  $0$

### Занятие 5. Применение газовых законов.

#### I. Вопросы (блиц):

1. Сколько термодинамических параметров задают состояние конкретного идеального газа определенной массы?

2. **Какой** воздух тяжелее - сухой или влажный?
3. Определите плотность азота при температуре  $27^{\circ}\text{C}$  и давлении  $2 \cdot 10^5$  Па.  $2,24 \text{ кг/м}^3$ .
4. Два идеальных газа находятся в одинаковых сосудах при одной и той же температуре. Молекула первого газа втрое тяжелее молекулы второго, но число частиц первого газа вдвое меньше числа частиц второго. Какой газ оказывает большее давление на стенки сосуда и во сколько раз?  $p_1/p_2 = 1,5$
5. Один кубический километр воздуха в нормальном состоянии сжали так, что он уместился в шарик диаметром 5 см. Могло ли быть такое? Нет
6. При некотором процессе, проведенном с идеальным газом, между давлением и объемом газа выполняется соотношение:  $p^2V = \text{const}$ . Масса газа при этом не изменялась. Как изменилась температура этого газа, если его давление увеличилось в 2 раза? Уменьшилась в 2 раза.
7. **Какой** из газов, водород или азот, занимает больший объем, если их массы, давления и температуры одинаковы? Водород
8. Почему, когда мы пытаемся ввести палочку в банку какими-нибудь зернами поглубже, требующееся для этого усилие быстро возрастает с глубиной погружения?
9. Как, зная плотность вещества и его молярную массу, определить среднее расстояние между его молекулами?
10. **Почему** в холодную сырую погоду сила, действующая на парус яхты больше, при равных скоростях ветра?

## II. Задачи (блиц):

1. В баллоне находится газ, плотность которого  $\rho$  и давление  $p$ . Из баллона откачали часть газа, при этом масса баллона уменьшилась на  $m$ , давление в баллоне упало до  $p_1$ , а температура осталась прежней. Найти объем баллона. Из формулы для плотности газа определим  $T$ , а из разности давлений найдем  $V$ .  $V = \frac{mp}{\rho(p - p_1)}$
2. Накачивая футбольный мяч, который первоначально был пустым, мальчик сделал  $N = 50$  качаний насосом. Какое давление  $p$  установилось в мяче после того, как температура воздуха в нем сравнялась с температурой окружающей среды? Объем мяча  $V = 5$  л, объем воздухозаборной камеры насоса  $v = 200 \text{ см}^3$ , а атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па.  $200 \text{ кПа}$

**III.** Почему процесс диффузии происходит сравнительно медленно, не смотря на то, что скорость молекул измеряется сотнями метров в секунду? Задача о "пьяном матросе". Один из возможных путей матроса:  $\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \dots + \vec{S}_N$ . Тогда:  $S^2 = (S_{1x} + S_{2x} + \dots + S_{Nx})^2 + (S_{1y} + S_{2y} + \dots + S_{Ny})^2 = (S_{1x}^2 + S_{2x}^2 + \dots + S_{Nx}^2) + (S_{1y}^2 + S_{2y}^2 + \dots + S_{Ny}^2) = Nl^2$ . Сумма парных произведений  $2S_{1x}S_{2y} + 2S_{1y}S_{2x} + \dots$  при больших  $N$  дает 0. Почему?  $S^2 = Sx_1^2 + Sy_1^2 + Sx_2^2 + Sy_2^2 + \dots + Sx_N^2 + Sy_N^2 = Nl^2$  - **формула случайного блуждания**.  $S = l\sqrt{N}$ . При  $N = 100$ ,  $S = 10l$ . Случайный выигрыш в казино также пропорционален квадратному корню из числа туров  $\sqrt{N}$ , а не  $\frac{N}{2}$  (примеры).

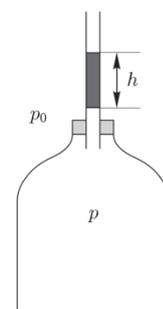
Время между двумя последовательными прохождениями перекрестка (соуда-

рениями) матросом  $\tau = \frac{l}{v}$ , а число соударений за время  $t$  равно  $N = \frac{t}{\tau}$ . Поэтому

$$\bar{v}^2 = lv \cdot t. \quad l - \text{длина свободного пробега молекулы: } \lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} \quad (d - \text{диаметр молекулы}).$$

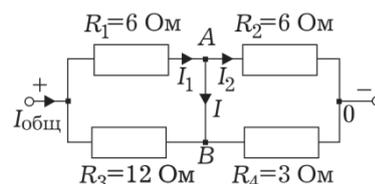
#### IV. Задачи (блиц):

- Идеальный газ изотермически расширяют, затем изохорно нагревают и изобарно возвращают в исходное состояние. Нарисовать графики этого равновесного процесса в координатах  $p, V; V, T; p, T$ .
- Подопытный кролик дышит газовой смесью, состоящей на  $1/3$  из молекул кислорода и на  $2/3$  – из молекул гелия. Найти плотность этой смеси при температуре  $50^\circ\text{C}$  и давлении  $1,2$  атм.  $0,6 \text{ кг/м}^3$
- Простой газовый термометр выполнен в виде стеклянной бутылки объемом  $V = 0,5$  л, плотно закрытой пробкой. В пробку герметично вставлена открытая с обоих концов стеклянная трубка с внутренним радиусом  $r = 2$  мм. Помещая в трубку столбик подкрашенной воды, можно по изменению его положения судить об изменении температуры. Оцените чувствительность  $\Delta h/\Delta T$  такого термометра, где  $\Delta h$  — изменение уровня столбика в трубке при изменении температуры на  $\Delta T$ .  $\frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{V}{T\pi r^2}$



#### V. Олимпиада.

- В космический корабль, совершающий межпланетный перелет, попал метеорит, пробивший в корпусе маленькое отверстие, через которое наружу стал выходить воздух. Объем корабля  $V = 1000 \text{ м}^3$ , начальное давление воздуха в нем  $p_0 = 10^5$  Па, температура  $t = 27^\circ\text{C}$ . Через какое время  $\tau$  после попадания метеорита давление воздуха в корабле уменьшится на  $\Delta p = 10^3$  Па, если площадь отверстия  $S = 1 \text{ см}^2$ ? Скорость истечения газа через уравнение Бернулли.  $241 \text{ с}$
- Вычислите, какую силу тока покажет идеальный амперметр, включённый между точками А и В электрической цепи, изображённой на рисунке 10. Напряжение источника  $60 \text{ В}$ .  $3,3$
- Тонкостенный цилиндрический стакан массой  $100 \text{ г}$  и высотой  $10 \text{ см}$  ставят вверх дном на гладкое дно сосуда, который после этого медленно заполняют водой до высоты  $20 \text{ см}$ . На сколько градусов надо нагреть воду в сосуде, чтобы стакан начал всплывать? Диаметр стакана  $4,0 \text{ см}$ . Начальная температура всей системы  $300 \text{ К}$ , атмосферное давление  $720 \text{ мм рт. ст.}$   $5,5 \text{ К}$
- В большой сосуд с водой был опрокинут цилиндрический сосуд. Уровни воды внутри и вне цилиндрического сосуда находятся на одинаковой высоте. Расстояния от уровня воды до дна опрокинутого сосуда равно  $40 \text{ см}$ . На какую высоту поднимется вода в цилиндрическом сосуде при понижении температуры от  $310 \text{ К}$  до  $273 \text{ К}$ . Атмосферное давление нормальное.  $4,6 \text{ см}$
- Масса пороха  $M$ , сгорающего в одну секунду в камере ракетного двигателя, зависит от давления  $P$  по закону  $M = AP^n$  ( $A$  и  $n$  – некоторые постоянные). Скорость расхода массы газа за счет истечения из сопла пропорциональна давлению в камере. Во сколько раз отличаются давления в камерах ракетных



двигателей, если сечения их сопел равны  $S_1$  и  $S_2$ ? Рассмотреть частный случай, когда  $n = 2/3$ ,  $S_1/S_2 = 2$ . В частном случае  $n = 2/3$ ,  $S_1/S_2 = 2$  получим  $P_2/P_1 = 2^3 = 8$ .

**Вопросы:**

1. Газ перешел из состояния 1 в состояние 2. Масса газа остается постоянной (Рис. 1). Как изменился объем газа?

2. Начертите графики изменения плотности идеального газа в зависимости от температуры при изобарном и изохорном процессах.

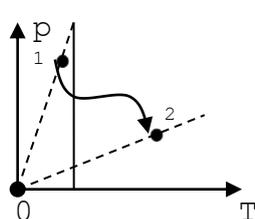


Рис. 1

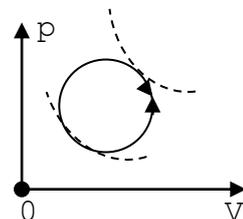


Рис. 2

3. Теплопроводность гелия в 8,7 раза больше, чем у аргона (при нормальных условиях).

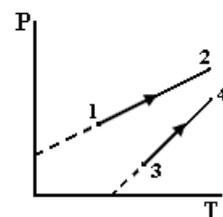
Найти отношение эффективных диаметров атомов аргона и гелия. Нормальные условия:  $p = 10^5$  Па,  $t = 0^\circ\text{C}$ . Молярная масса аргона –  $M_2 = 40 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, гелия –  $M_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.  $k \propto \lambda^{1,66}$

4. В 1787 г. французский физик Жак Шарль обнаружил, что при снижении температуры газа на  $1^\circ\text{C}$  его объем уменьшается на  $1/273$ . Ученый высказал предположение, что если снижать температуру газа в каком-то объеме от  $0^\circ\text{C}$ , то примерно при  $-273^\circ\text{C}$  газ должен исчезнуть. Почему газ не исчезал?

5. Почему крошечные частицы могут плавать в воздухе по несколько суток?

6. С газом произведен замкнутый процесс (цикл). Масса газа остается постоянной. В какой точке температура газа наибольшая (Рис. 2)?

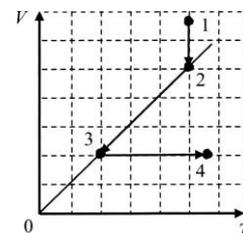
7. При нагревании газа получен график зависимости давления от абсолютной температуры в виде прямой, продолжение которой пересекает ось  $P$  в некоторой точке выше (ниже) начала координат, как показано на рисунке. Определить, сжимался или расширялся газ во время нагревания. 1-2 расширился.



8. Одно из правил безопасности при погружении с аквалангом – перед тем как подниматься на поверхность, надо вдохнуть, а при всплытии правильно выдыхать воздух. Зачем?

9. Начертите график зависимости плотности газа от давления при изотермическом процессе, если масса газа остается постоянной.

10. На  $V/T$ -диаграмме показано, как изменялись объем и температура некоторого постоянного количества разреженного газа при его переходе из начального состояния 1 в состояние 4. Как изменялось давление газа  $p$  на каждом из трёх участков?



**Разное**

1. Идеальный газ, занимающий объем  $V_1$  и находящийся под давлением  $P_1$ , сначала изотермически сжимают до объема  $V_2$ , потом изобарически сжимают до объема  $V_3$ , и, наконец, изотермически доводят его объем до  $V_4$ . Под каким давлением будет находиться этот газ в конце процесса?  $P_4 = \frac{P_1 V_1 V_3}{V_4 V_2}$

2. Над одним молем гелия проводится процесс, при котором температура газа изменяется по следующему закону  $T = T_0(1 - P_0/P)$ , где  $P$  – давление газа,  $T_0$  и

$$V = \frac{\nu R T_0}{4 p_0}$$

$P_0$  – некоторые постоянные величины. Определите максимальный объём гелия в этом процессе. При каком давлении и температуре достигается этот объём?

3. В сосуде находится гелий при температуре 300 К. Плотность газа такова, что длина свободного пробега в нем составляет 0,5 мкм. Какое среднее расстояние проходит молекула газа за 0,5 с. 18,5 см

4. Воздух находится под поршнем массой  $m = 20$  кг и сечением  $S = 20$  см<sup>2</sup>. После того, как сосуд стали двигать вверх с ускорением  $a = 5$  м/с<sup>2</sup>, высота столба воздуха в сосуде уменьшилась на  $\eta = 20\%$ . Считая температуру воздуха внутри сосуда неизменной, найти атмосферное давление  $p_0$ . Трением между поршнем и стенками сосуда пренебречь. 200 кПа

5. Сосуд разделен перегородкой на две части. В одной части находится идеальный газ массы  $m_1$  при давлении  $P_1$ , во второй части – такой же газ массы  $m_2$  при давлении  $P_2$ . Какое давление установится в сосуде, если перегородку убрать? Начальная температура во всем сосуде одинакова и равна  $T_1$ , конечная температура в сосуде равна  $T_2$ . 
$$P = \frac{(m_1 + m_2)T_2}{T_1 \cdot \left( \frac{m_1}{P_1} + \frac{m_2}{P_2} \right)}$$

6. На высоте 3 км над поверхностью Земли в 1 см<sup>3</sup> воздуха содержится примерно 10<sup>2</sup> пылинок, а у самой поверхности - примерно 10<sup>5</sup>. Определите среднюю массу пылинки и оцените ее размер, предполагая, что плотность пылинки 1,5 г/см<sup>3</sup>. Температуру воздуха примите равной 27<sup>0</sup>С.  $m = 10^{-21}$  г,  $r = 10^{-7}$  см

Риск возникновения рака лёгких зависит от концентрации радона. Радон тяжелее воздуха, поэтому концентрация радона на первом этаже в среднем выше, чем, например, на пятом.

7. Сжатый воздух накачивается в баллон емкостью  $V = 5$  м<sup>3</sup>. За какое время он будет накачан до давления  $p = 8 \cdot 10^5$  Па, если компрессор засасывает  $V_1 = 4$  м<sup>3</sup> воздуха в минуту? Температуру считать постоянной, а начальное давление — нормальным.  $\approx 8,6$  мин.

8. Почему нельзя изготовить воздушный шар, наполняемый нагретым воздухом, подъемная сила которого равнялась бы подъемно же объема, наполненного водородом?

$$P_1 = \rho_0 g V \left( 1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_0} \right); P_2 = \rho_0 g V \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

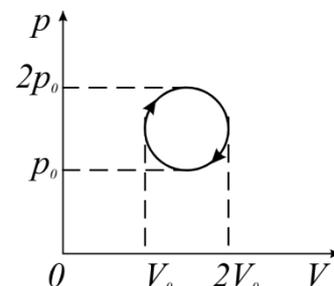
9. Имеется 1 л азота (N<sub>2</sub>) при температуре 300 К и давлении  $p = 1$  атм. Оцените: 1) полное число молекул в сосуде; 2) число молекул в 1 см<sup>3</sup>; 3) среднюю энергию поступательного движения одной молекулы; 4) среднюю квадратичную скорость одной молекулы; 5) длину свободного пробега молекулы  $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot d \cdot n}$ , (диаметр молекулы азота  $d = 3,2 \cdot 10^{-8}$

см); 6) среднее время между столкновениями молекул друг с другом; 7) среднее число ударов молекул в 1 см<sup>2</sup> стенки за секунду.  $N = 0,72 \cdot 10^{23}$ ;  $n = 0,72 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>;  $\bar{E}_K = 6,2 \cdot 10^{-21}$  Дж;  $\bar{v}_{кс} = 517$  м/с;  $9,6 \cdot 10^{-6}$  см;  $1,9 \cdot 10^{-10}$  с;  $6,2 \cdot 10^{18}$ .

### Олимпиада.

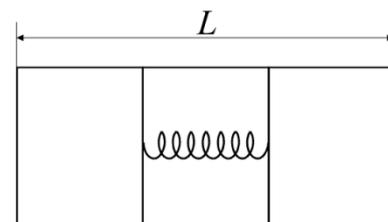
1. В бутылку с достаточно толстыми стенками вместимостью  $V = 700$  мл наливают некоторое количество воды. Прикрыв горлышко пальцем, бутылку переворачивают вверх дном, погружают в ведро с водой и убирают руку. Бутылка плавает, сохраняя вертикальное положение. Над поверхностью воды

выступает часть бутылки объёмом  $\Delta V = 15$  мл. Ведро с бутылкой выносят из комнаты, температура воздуха в которой равна  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ , на мороз. Можно считать, что в процессе охлаждения воздух, находящийся внутри бутылки, сжимается, и его объём изменяется по закону  $V = V_0 (1 + \alpha(t - t_0))$ , где  $V_0$  — объём воздуха при температуре  $t_0$ ,  $\alpha$  — коэффициент, равный  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1}^\circ\text{C}$ . Найдите температуру воздуха внутри бутылки в тот момент, когда бутылка полностью погрузится в воду. Масса бутылки равна 300 г, плотность материала, из которого она изготовлена,  $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ , плотность воды  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ .  $4,2^\circ\text{C}$



2. С одним молем идеального газа совершают цикл, который на  $pV$  диаграмме изображается окружностью (рис. 27). Найдите максимальную температуру газа.  $T = (3 + 1/\sqrt{2})^2 p_0 V_0 / 4R$ . Надо найти координаты точки, в которой температура максимальна.

3. В сосуде с газом находятся два поршня массы  $M$  каждый, скрепленные пружиной жесткости  $k$ . В состоянии покоя пружина не деформирована, а объемы всех трех частей сосуда одинаковы. Определите частоту колебаний поршней. Процесс считать изотермическим. Трение между поршнями и стенками сосуда отсутствует. Полная длина сосуда  $L$ , площадь поперечного сечения  $S$ , первоначальное



давление  $p_0$ .

$$\omega = \sqrt{(2k + 9p_0 S / l) / M}.$$

4. Число молекул, энергия которых выше некоторого значения  $\varepsilon_1$ , составляет  $10^{-4}$  от общего числа молекул. Определить величину  $\varepsilon_1$  в долях  $kT$ , считая, что  $\varepsilon \gg mkT$ .  $0/0157 kT$

## Занятие 6. Основные понятия термодинамики.

### I. Вопросы (блиц):

1. Изобразить графически зависимость плотности данной массы идеального газа от температуры при постоянном давлении.
2. Когда идеальный газ, находящийся в закрытом сосуде, нагрели на  $40^\circ\text{C}$ , его давление увеличилось на 10%. Какова начальная температура  $T_0$  газа? 400 К
3. Почему перед дождем атмосферное давление немного уменьшается? Если искусственно увлажнять воздух в одной области, то возникнет ветер, энергию которого можно использовать. Как?
4. Идеальный газ расширяется по закону  $pV^2 = \text{const}$ . Как изменяется его температура?  $V T = \text{const}$
5. Объем газа при нагревании изменяется по закону  $V = \alpha T$ , где  $\alpha$  — постоянная величина. Начертите графики этого процесса в координатах  $(p, V)$  и  $(V, T)$ .
6. Вы замерзаете от того, что молекулы вашего тела постепенно теряют энергию и замедляются. Так ли это?
7. Пламя свечи стремится удалиться от горячего жала электрического паяльника или другого нагревателя (эффект Людвига – Соре). Почему?

### II. Задачи (блиц):

1. Два одинаковых стеклянных шара соединены трубкой. При  $0^{\circ}\text{C}$  капля ртути, перекрывающая трубку, находится посередине трубки. Объем воздуха в каждом шаре и части трубки до капли  $200\text{ см}^3$ . На какое расстояние сместится капля, если один шар нагреть до  $2^{\circ}\text{C}$ , а другой охладить до  $-2^{\circ}\text{C}$ ? Поперечное сечение трубки  $200\text{ мм}^2$ . Давление газов будет одинаковым. Находим отношение объемов, а их сумма известна. По изменению объема первого газа находи смещение.  $0,73\text{ см}$
2. Средняя квадратичная скорость молекул воздуха в комнате  $500\text{ м/с}$ , длина их свободного пробега  $0,02\text{ мкм}$ . В данный момент выбранная для наблюдения молекула находится посередине квадратной комнаты площадью  $25\text{ м}^2$ . Оцените среднее время, за которое она дойдет до стены.  $174\text{ ч}$
3. В цилиндре, закрытом подвижным поршнем, находится  $2$  моля газа при нормальных условиях. Объем газа увеличили в  $k = 10$  раз, а затем газ изобарически нагрели до температуры  $t = 127^{\circ}\text{C}$ . Определите число  $n$  молекул газа в единице объема в конечном состоянии.  $n = \frac{N_A p_0}{kRT}$

**III. Объектом термодинамики является равновесная термодинамическая система.** Одно из основных понятий термодинамики - **внутренняя энергия.**

Внутренняя энергия тела:  $U = \sum_{i=1}^N E_{ki} + \sum_{i=1}^N E_{mi}$ . Внутренняя энергия идеального

одноатомного газа:  $U = \frac{3}{2} \nu \cdot R \cdot T = \frac{3}{2} PV$ . У двухатомных газов:  $U = \frac{5}{2} \nu \cdot R \cdot T$ . У

твердых тел и многоатомных газов:  $U = 3\nu \cdot R \cdot T$

**Как можно изменить внутреннюю энергию тела?** Два способа: **1. Совершая работу. 2. Передавая системе некоторое количество теплоты.**

$A' = p\Delta V$  - работа газа при изобарном процессе. Геометрическое истолкование работы.  $A' = \frac{m}{M} R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$  (**работа газа в изотермическом процессе**).

**Теплообмен. Расчет количества теплоты (передаваемой тепловой энергии):**

$$Q = mc\Delta T = mc(T_2 - T_1) = C \cdot \Delta T.$$

**Теплота фазовых переходов. 1. Удельная теплота парообразования и конденсации ( $r$ ):**  $Q = mr$  - формула для расчета количестве теплоты при парообразовании и конденсации.

**2. Удельная теплота плавления и кристаллизации ( $\lambda$ ):**  $Q = \lambda m$  - формула для расчета количества теплоты при плавлении.

**3. Удельная теплота сгорания ( $q$ ):**  $Q = mq$  - формула для расчета количества теплоты при сгорании топлива.

**Теплопроводность** - это свойство материала, определяющее его способность передавать энергию в виде тепла. **Закон Фурье:**  $Q = k \frac{\Delta T}{\ell} S \cdot \tau$ .

**IV. Задачи (блиц):**

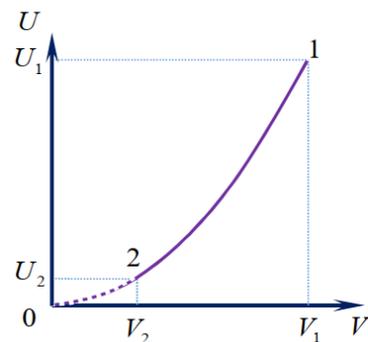
1. В длинной горизонтальной трубе между двумя одинаковыми поршнями массой  $m$  каждый находится один моль одноатомного газа. При температуре газа  $T_0$  скорости поршней направлены в одну сторону, и равны  $v$  и  $3v$ . Какова

максимальная температура газа? Труба теплоизолированная, трения нет, массу газа и теплоемкость поршней не учитывать.  $T = T_0 + \frac{2m v_0^2}{3\nu R}$

2. Маленький переносной холодильник представляет собой закрытую сумку, стенки которой сделаны из материала с низкой теплопроводностью, с помещённым в неё пакетом со льдом. Температура в холодильнике поднялась до  $2^\circ\text{C}$  через 10 часов после того, как лёд начал таять. Через какое время температура в холодильнике поднялась бы до этого значения, если бы изначально почти весь лёд был растаявшим?  $t = 14,6$  мин.

### V. Олимпиада.

1. Какую работу  $A$  надо совершить для сжатия некоторого количества идеального одноатомного газа в  $k = 3$  раза, если внутренняя энергия газа  $U$  меняется при этом так, как показано на рисунке? Участок 1-2 отрезок параболы с вершиной в начале координат. Исходное значение внутренней энергии газа равно  $U_1 = 135$  Дж.  $U = \alpha V^2$ .  $U = \frac{3}{2} pV = \alpha V^2 \rightarrow p = \frac{2\alpha V}{3}$ .



Дальше площадь под графиком.  $p_1 = \frac{2U_1}{3V_1}$ ,  $p_2 = \frac{1}{3} p_1 \cdot 40$  кДж

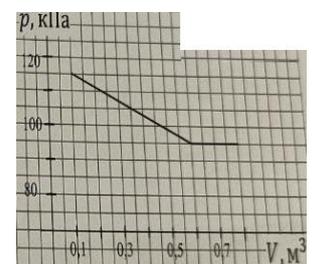
2. В 5 термосах находилось одинаковое количество мокрого снега (смеси ледяных кристаллов и воды, находящихся в равновесии). В первый термос вылили 100 г кипятка, во второй – 200 г, в третий – 300 г, а в четвертый – 400 г, в пятый – неизвестное количество кипятка. После установления равновесия температура содержимого первого термоса оказалась равна  $t_1 = 8^\circ\text{C}$ , второго –  $t_2 = 31^\circ\text{C}$ , а пятого –  $t_5 = 0^\circ\text{C}$ . Какая температура установилась в третьем и четвертом термосах? Какова максимально возможная масса кипятка, вылитого в пятый термос? Опыт происходил при нормальном атмосферном давлении, теплообменом содержимого термоса с внешними телами можно пренебречь. Ответ:  $t_3 = 44,8^\circ\text{C}$ ,  $t_4 = 54^\circ\text{C}$ , максимально возможная масса кипятка, вылитого в пятый термос, равна 76 г.
3. Экспериментатор запустил секундомер в момент времени, когда в чайнике закипела вода. Вся вода выкипела через 1781 секунду. Экспериментатор заполнил чайник льдом той же массы при нулевой температуре, зажег газ и одновременно запустил секундомер. Экспериментатор записал в журнал, что во втором случае чайник выкипел через 2075 секунд. Цифра  $\theta$  изображена неразборчиво, это может быть 0, 3 или 6. Какая цифра стоит в журнале?  $t_2 = 2076$  с

### Вопросы (блиц):

- Показать, что внутренняя энергия  $U$  воздуха в комнате не зависит от температуры, если наружное давление  $p$  постоянно. Вычислить  $U$ , если  $p$  равно нормальному атмосферному давлению и объем комнаты  $V = 40 \text{ м}^3$ . В комнате  $p = \text{пост.}$ , поэтому  $m_1 T_1 = m_2 T_2$  и  $U = \text{пост.}$  10 МДж.
- Можно ли довести воду до кипения, подогревая ее стоградусным паром при нормальном атмосферном давлении? Нет
- Одинаковое ли количество воздуха необходимо для накачивания

автомобильной шины до нужного давления, если производить эту работу летом и зимой? Ответ обоснуйте. Летом меньше.

4. Какой газ, идеальный или реальный, при данной температуре имеют большую внутреннюю энергию?
5. Рассчитайте среднюю кинетическую энергию молекулы идеального одноатомного газа, учитывая значения его параметров: внутренняя энергия 4 кДж, масса 19 г, молярная масса 4 г/моль.  $0,14 \cdot 10^{-20}$  Дж
6. Известно, что на высотах порядка 1000 км средние квадратичные скорости молекул газов, входящих в состав атмосферного воздуха, соответствуют температуре примерно  $2000^{\circ}\text{C}$ . Почему же не плавятся оболочки искусственных спутников Земли, летающих на такой высоте?
7. Оцените максимальный радиус полости, образующейся при подводном взрыве на глубине  $h = 1$  км заряда взрывчатого вещества массой  $m = 1$  кг. Энергия взрыва 1 г взрывчатого вещества  $q = 4$  кДж.  $mq = (p + \rho gh)V + Q$ .  $Q$  - мало, пар не успевает заполнить полость.  $0,5 \text{ м}^3$
8. Смешиваются водород и кислород одинаковой массы. Каково отношение средних кинетических энергий, приходящихся на одну молекулу? 1
9. По графику определите работу газа.
10. С какой высоты должны упасть на Землю молекулы азота, чтобы их средняя квадратичная скорость оказалась равной 500 м/с?
11. Начальное состояние газа характеризуется параметрам  $P_0$  и  $V_0$ . При изотермическом или изобарном расширении до некоторого объема газ произведет большую работу?
12. Если на тебя одеты металлические предметы, то ожог в парилке обеспечен. Почему?
13. Что общего между сжатой пружиной и сжатым газом?
14. Со дна водоема поднимается пузырек воздуха. Совершает ли газ работу?
15. Кедровые орешки помещают в герметичный объем и выдерживают под большим давлением. Затем резко сбрасывают давление, и скорлупа разлетается. Почему и как это происходит?
16. Оцените, какую массу воды можно нагреть до кипения, если энергию, равную всей кинетической энергии молекул воздуха в комнате, передать воде, находящейся при комнатной температуре.



### Разное.

1. Людей, купающихся зимой в проруби, называют «моржами». Оцените время, за которое температура воды продвинется до рецепторов кожи, удаленных от ее поверхности на расстояние около  $4 \cdot 10^{-4}$  м. Поскольку живые ткани более чем на 90% состоят из воды, их тепловые свойства можно считать близкими к свойствам воды. 1 с
2. Теплоизолированный цилиндр разделен подвижным теплопроводящим поршнем на две части. В одной части цилиндра находится гелий, а в другой – аргон. В начальный момент температура гелия равна 300 К, а аргона - 900 К. Объемы, занимаемые газами одинаковы, а поршень находится в равновесии. Поршень медленно перемещается без трения. Теплоемкость поршня и

цилиндра пренебрежимо мала. Чему равно отношение внутренней энергии гелия после установления теплового равновесия к его внутренней энергии в начальный момент времени. 1,5

3. Рассчитайте количество теплоты, теряемое за сутки, через оконный проём со стеклопакетом, если известно, что сторона квадратного окна 1 м, толщина стеклопакета 0,5 см, температура в комнате  $21^{\circ}\text{C}$ , на улице  $0^{\circ}\text{C}$ .  $k$  – удельная теплопроводность вещества, равная для стекла  $0,84 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . 305 МДж
4. Идеальный газ расширяется по закону  $p = cV$ . Какую работу совершает один моль газа при повышении температуры от  $T_1$  до  $T_2$ ? Ответ:  $A = (R/2)(T_2 - T_1)$ .
5. Для движения торпеды используется двигатель, работающий на сжатом воздухе. Определите полезную максимальную работу, производимую двигателем, если объём сжатого воздуха  $0,2 \text{ м}^3$ , давление сжатого воздуха  $2 \cdot 10^7$  Па. Торпеда отрегулирована на движение в воде на глубине 3 м. Процесс изотермический. Считая движение торпеды равномерным, определите силу тяги двигателя, если радиус действия торпеды 2 км.

## Занятие 7. Первый закон термодинамики.

### I. Вопросы (блиц):

1. Почему в горных районах выпадает значительно больше снега и дождя, чем на равнинах?
2. Что происходит, когда изменяется температура, а что – когда сообщается тепло?
3. В водохранилище под водой оказалась груда камней. Почему лёд над этими камнями оказывается более тонким, чем в других местах водохранилища? Тепло передается через них снизу вверх быстрее, чем через воду.
4. Одинаковые массы водорода и кислорода изобарно нагревают на одинаковое число градусов. Во сколько раз работа, совершаемая водородом, больше чем кислородом? 16
5. Оцените максимальный объём полости, образующейся при подводном взрыве на глубине  $h = 1$  км заряда взрывчатого вещества массой  $m = 1$  кг с удельной теплотой сгорания  $4 \text{ МДж}/\text{кг}$ .  $m q = (p + \rho g h)V + Q$ .  $Q$  – мало, пар не успевает заполнить полость.  $0,4 \text{ м}^3$
6. Верно ли, что при теплообмене тепло всегда передается от тела с большей внутренней энергией к телу с меньшей внутренней энергией? Нет
7. Почему алмазы всегда холодные?
8. Увеличивает ли сильный ветер температуру переносимого им воздуха?
9. Что охлаждается быстрее – ванна, наполненная горячей водой, или стакан с горячим чаем? Почему?

### II. Задачи (блиц):

1. Два моля трехатомного идеального газа изобарически расширяется из состояния с температурой  $150^{\circ}\text{C}$  и объёмом 2 л до объёма 5 л. Определить внутреннюю энергию газа в конечном состоянии. 31,6 кДж.
2. С помощью кипятильника воду объёмом 2 литра нагрели с  $80^{\circ}\text{C}$  до  $90^{\circ}\text{C}$  за 1 минуту. Затем его выключили, и еще через минуту вода остыла на  $1^{\circ}\text{C}$ . Найдите мощность кипятильника. 1,54 кВт

3. При изотермическом расширении от  $0,1 \text{ м}^3$  трех молей газа его давление меняется от 4,48 атм до 1 атм. Найти совершаемую при этом работу и температуру, при которой протекает процесс. 1797 К. 67,2 кДж.
4. Какую работу совершает 1 моль гелия в некотором процессе при нагревании на  $6^\circ\text{C}$ , если его температура  $T$  в этом процессе изменяется прямо пропорционально квадрату объёма  $T = \alpha V^2$ , где  $\alpha$  — размерная константа? 25 Дж. Площадь под графиком давления от объёма.

**III. Механическая работа и теплород. Механический эквивалент теплоты (Джоуль):**  $4,1858 \text{ Дж/кал} \approx 4,19 \text{ Дж/кал}$ . **Первый закон термодинамики** - это закон сохранения энергии, распространенный на тепловые явления (1842 г).

Закон гласит, что энергию нельзя ни создать, ни уничтожить, а только преобразовать из одного вида в другой или передать от одного тела к другому. Независимо от преобразований между различными видами энергии суммарные количества «начальной» и «конечной» энергии в любой физической системе в сумме всегда должны давать одно и то же. Теплота представляет собой особую форму энергии и должна учитываться в законе сохранения и превращения энергии! **Первое начало термодинамики** представляет собой закон сохранения энергии для систем, в которых существенное значение имеют тепловые процессы.  $A + Q = \Delta U$ .  $Q = \Delta U + A'$ . Закон сохранения энергии в моей жизни.

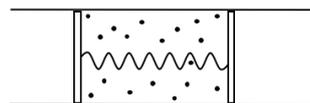
$Q = mc(T_2 - T_1) = C(T_2 - T_1) = \nu \cdot C_\mu(T_2 - T_1)$ . Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме  $C_v$  и при постоянном давлении  $C_p$ .  $C_v = \frac{i}{2}R$ .  $C_p = \frac{i}{2}R + R$ . Связь с удельной теплоемкостью:  $\nu \cdot C = m \cdot c$ .

**Следствия: 1.** Внутренняя энергия замкнутой системы остается с течением времени неизменной. Если  $Q = 0$  и  $A = 0$ , то  $\Delta U = 0$ . **2.** Невозможно создать вечный двигатель. Если  $Q = 0$ , то  $A' = -\Delta U$ .

**IV. Задачи (блиц):**

1. При сообщении идеальному газу количества теплоты  $Q$  газ совершает работу  $A'$ . Какой была внутренняя энергия газа  $U_1$ , если его температура возросла в 4 раза?  $\Delta U = 3U_1$ .  $U_1 = \frac{Q - A'}{3}$

2. Внутри гладкой горизонтальной трубы находится  $\nu = 5$  моль одноатомного идеального газа, ограниченного с двух сторон двумя подвижными поршнями, соединенными пружиной. Газ нагрели и его температура увеличилась от значения  $T_1 = 300 \text{ К}$  до значения  $T_2 = 400 \text{ К}$ . Какое количество теплоты нужно подвести для этого к газу, если известно, что длина пружины увеличилась в этом процессе в  $n = 1,2$  раза? Атмосферным давлением пренебречь.  $Q = \frac{3}{2}\nu R\Delta T + \frac{k\Delta\ell^2}{2}$



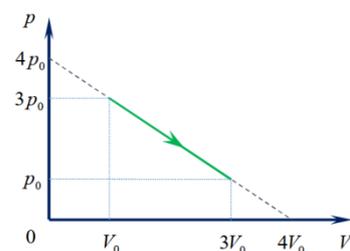
3. Теплоизолированный цилиндр разделён подвижным теплопроводящим поршнем на две части. В одной части цилиндра находится гелий, а в другой — аргон. В начальный момент температура гелия равна 300 К, а аргона — 900 К, объёмы, занимаемые газами, одинаковы, а поршень находится в равновесии. Во сколько раз изменится объём, занимаемый гелием, после установления теплового равновесия, если поршень перемещается без трения? Теплоемкостью цилиндра и поршня пренебречь. 1,5

## V. Олимпиада.

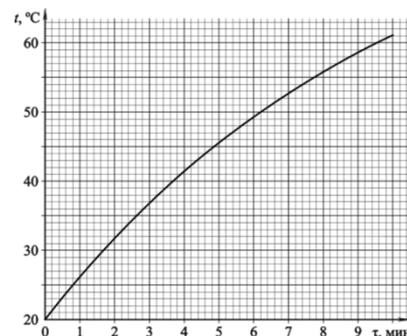
1. В вертикальном теплоизолированном цилиндрическом сосуде находится 0,5 моль гелия, нагретого до некоторой температуры. Поршень сначала удерживают, затем отпускают, и он начинает подниматься. Масса поршня 1 кг. Какую скорость приобретет поршень к моменту своего подъема на высоту 40 см, а гелий охладится на 5 К. Трением и теплообменом пренебречь. 7,4 м/с

2. Одной из причин понижения температуры в атмосфере с высотой является расширение воздуха в восходящих потоках без теплообмена с окружающей средой. Найти понижение температуры на каждые  $h = 100$  м высоты, считая воздух двухатомным идеальным газом. Для подъема воздух должен совершить работу, что приводит к уменьшению его внутренней энергии.  $\Delta T = \frac{2gh\mu}{5R} = 1,4$  К

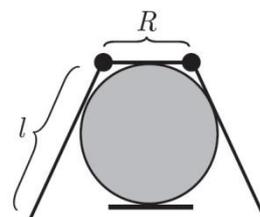
3. При расширении одного моля аргона его давление уменьшается так, как показано на  $pV$ -диаграмме (см. рисунок). Определите максимальное значение внутренней энергии  $U$  газа в процессе 1-2. Масштаб:  $V_0 = 0,1$  м<sup>3</sup> и  $p_0 = 5 \cdot 10^4$  Па. Зависимость давления газа от объема линейная (функция). Уравнение состояния газа  $T = pV/R$ . Производная  $dT/dV = 0$ .  $V = 2V_0$ .  $U = (3/2)pV$ . 30 кДж.



4. В сосуд с водой комнатной температуры поместили кипятильник постоянной мощности и включили его. На рисунке показана измеренная зависимость температуры воды  $t$  от времени  $\tau$ . 1) На сколько градусов остынет вода в сосуде за 10 с, если выключить кипятильник при температуре 50°C? Около 0,5°C/с 2) До какой максимальной температуры нагреется вода за большое время, если кипятильник не выключать? Будем считать, что закон теплоотдачи воды окружающему воздуху остается неизменным и при таких температурах. Мощность нагревателя по касательной в  $\tau = 0$ .



5. Три однородных стержня одинаковой линейной плотности соединены шарнирами и свободно лежат на поверхности гладкого цилиндра радиуса  $R$  (см. рис.). Длина среднего стержня равна радиусу цилиндра. Какой длины  $l$  должны быть крайние стержни, чтобы средний стержень оторвался от поверхности цилиндра? Через силы моменты сил относительно  $R/2$ .

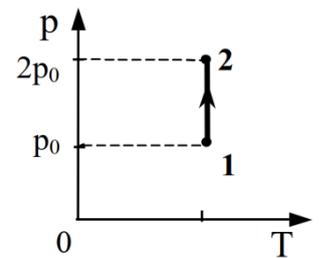


Вопросы (блиц):

1. В процессе сжатия над газом совершена работа 60 МДж, при этом он передал окружающей среде 40 МДж тепла. Определите изменение внутренней энергии тела.
2. Помешивая ложечкой горячий чай, мы вызываем его охлаждение. Почему?
3. В 1807 г. физик Ж. Гей-Люссак, изучая свойства газов, установил, что сжатый газ, расширяясь в пустоту, не охлаждается, а при расширении в атмосферу – охлаждается. Почему?

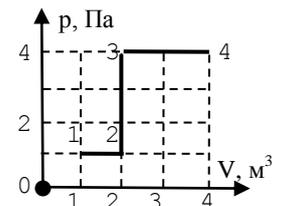
4. 1 моль инертного газа сжали, совершив работу 600 Дж. В результате сжатия температура газа повысилась на  $40^{\circ}\text{C}$ . Какое количество теплоты отдал газ? 100 Дж

5. На диаграмме показан процесс изменения состояния идеального одноатомного газа. Газ отдает 50 кДж теплоты. Чему равна работа внешних сил? 50 кДж



6. Считая, что сопротивление воздуха отсутствует, оцените, с какой высоты должна упасть капля воды, чтобы "от нее не осталось мокрого места". Можно ли на самом деле пренебречь сопротивлением воздуха при решении этой задачи? 272 км

7. Насколько изменяется внутренняя энергия двухатомного идеального газа при его переходе из состояния 1 в состояние 4? 37,5 Дж



8. С высоты  $H$  над поверхностью воды мальчик выпускает камень, который опускается на дно пруда глубиной  $h$ . Какое количество теплоты выделится при падении камня, если его масса  $m$ , а объём  $V$ ?  $mg(H + h) = \rho g V h + Q$

9. Известно, что струя воздуха, идущая от вентилятора, приносит свежесть, поэтому вблизи вентилятора мороженое не должно быстро таять. В действительности всё происходит наоборот. В чём же здесь дело?

10. Два одинаковых стальных шарика упали с одной и той же высоты. Первый упал в вязкий грунт, а второй, ударившись о камень, отскочил и был пойман рукой на некоторой высоте. Какой из шариков больше нагрелся?

11. Объясните, почему и как трение между движущимися частями машины приводит к выделению тепла.

12. Чему равны теплоемкости при изотермическом и адиабатном процессах?

13. В результате совершения работы и получения количества теплоты 5 кДж внутренняя энергия идеального газа увеличилась на 8 кДж. Какая работа была им совершена?

### Разное.

1. Теплоизолированный цилиндр объемом  $V$  разделен на две части перегородкой. В одной части находится водород в количестве  $\nu$  молей при температуре  $T_1$ , в другой азот — в количестве  $1,5\nu$  при температуре  $5T_1/4$  и другом давлении. Перегородка прорывается. 1) Какая температура  $T_2$ , установится в смеси?  $T_2 = 1,15 \cdot T_1$  2) Найдите давление  $p$  в смеси.  $p_2 = 2,875 \frac{\nu R T_1}{V}$

2. Один моль аргона, находящегося в цилиндре при температуре  $T_1 = 600$  К и давлении  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па, расширяется и одновременно охлаждается так, что его температура при расширении обратно пропорциональна объему. Конечное давление газа  $p_2 = 10^5$  Па. Какую работу совершил газ при расширении, если он отдал холодильнику количество теплоты  $Q = 1247$  Дж?  $A' = 2494,5$  Дж

3. Найти совершенную идеальным одноатомным газом работу по изменению его термодинамического состояния из 1 в 2, учитывая, что газ находится в герметичном сосуде без теплообмена и значения физических параметров:  $p_1 = 18$  кПа,  $p_2 = 2$  кПа,  $V_1 = 2$  л,  $V_2 = 3$  л. 45 Дж

4. Школьник решил приготовить чай. Он налил в чайник некоторое количество воды, поставил его на электрическую плитку и стал наблюдать за процессом нагрева воды. Школьник обнаружил, что за время  $t_1 = 1$  мин температура воды повысилась на  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ . Решив продолжить наблюдения, он снял чайник с плитки, после чего температура воды в чайнике за время  $t_2 = 0,5$  мин понизилась на ту же величину  $\Delta T$ . Какова масса  $m$  воды в чайнике, если тепловая мощность, идущая на нагрев воды при работающей плитке,  $W = 500$  Вт? 2.4 кг.

### Олимпиада.

1. В цилиндре под поршнем находится водород массой 0,02 кг при температуре 300 К. Водород сначала расширился адиабатно, увеличив свой объем в 5 раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в 5 раз. Найти температуру в конце адиабатного расширения и полную работу, совершенную газом. 158 К. 8368 Дж
2. Один кмоль воздуха при давлении  $p_1 = 10^6$  Па и температуре  $T_1 = 390$  К изохорически изменяет давление так, что его внутренняя энергия изменяется на  $\Delta U_{12} = -71,7$  кДж, затем изобарически расширяется и совершает работу  $A_{23}' = 745$  кДж. Определить параметры воздуха (считать  $C_v = 721$  Дж/(кг·К) в конечном состоянии. Ответ:  $4,24 \text{ м}^3$ ; 380К; 0.745 МПа

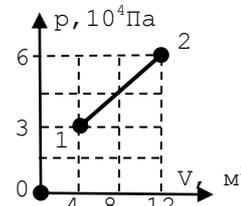
### Занятие 8. Применения первого закона термодинамики.

#### I. Вопросы (блиц):

1. Почему при слабом морозе снежок слепить легко, а при сильном это сделать невозможно?
2. При быстром сжатии газа температура его повысилась. Можно ли сказать, что:
  - 1) газу сообщено некоторое количество теплоты;
  - 2) внутренняя энергия газа увеличилась. Ответ: а) нет; б) да.
3. Можно ли передать газу некоторое количество теплоты, не вызывая при этом повышения его температуры? Ответ: можно в изотермическом процессе.
4. Газ совершает работу 2 кДж при передаче ему количества теплоты 7 кДж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
5. Пусть уравнение процесса с одноатомным идеальным газом  $p = \alpha V$  ( $\alpha = \text{const}$ ). Как в этом процессе связаны работа газа и сообщаемое ему количество теплоты?  $Q = 4A$
6. Может ли увеличение объема газа сопровождаться увеличением его давления?
7. Одноатомный идеальный газ в процессе с уравнением  $p = \alpha V$  ( $\alpha = \text{const}$ ) совершил работу 1 кДж. Количество газа не изменялось. На сколько изменилась его внутренняя энергия?  $\Delta U = 3A = 3$  кДж
8. При изобарном сжатии водорода была совершена работа 10 кДж. Определить затраченное количество теплоты и изменение внутренней энергии газа. -35 кДж. - 25 кДж.
9. Идеальный газ занимает половину теплоизолированного сосуда, в другой половине которого вакуум. Что произойдет с температурой газа, если мгновенно убрать разделительную перегородку? Не изменится

## II. Задачи (блиц):

1. Внутренняя энергия одного моля газообразного метана в 2,5 раза больше внутренней энергии такого же количества идеального одноатомного газа при той же температуре. Какое количество теплоты необходимо затратить для того, чтобы изобарически нагреть 0,1 моля газообразного метана на 100 К? 395 Дж
2. Водород занимает объем  $10,0 \text{ м}^3$  при давлении 0,1 МПа. Его нагрели при постоянном объеме до давления 0,3 МПа, затем, изотермически увеличив объем, довели давление газа до первоначального. Определите изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную им, и количество теплоты, сообщенное газу. 5 МДж, 3,3 МДж, 8,3 МДж
3. Определите молярную массу трехатомного газа, имеющего удельную теплоемкость при постоянном давлении  $c_p = 725 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . 46 г/моль
4. Насколько изменяется внутренняя энергия одноатомного идеального газа при его переходе из состояния 1 в состояние 2? 0,9 МДж



**III.** Если термодинамические процессы не протекают, то система находится в равновесном состоянии. Параметры системы взаимосвязаны, когда изменяется один параметр, то и изменяются другие параметры. **Первый закон термодинамики. Основные формулы:**  $A + Q = \Delta U$ ;  $A' = p\Delta V$ ;  $Q = \Delta U + A'$ ;  $A = -p\Delta V$ ;  $U = U(T)$  – для идеального газа. **Адиабатный процесс** протекает в термодинамической системе без теплообмена с окружающей средой.

**Что нужно, чтобы изучить какую-либо термодинамическую систему?**

1. Определить работу, совершаемую в данном процессе.
2. Определить изменение внутренней энергии системы.
3. Определить количество теплоты, которое вошло в систему или которое отдала система.
4. Установить связи между отдельными величинами, которые характеризуют состояние рабочего тела (газа)

**Второй закон термодинамики. Энтропия:**  $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ ;  $S = \int_{T_1}^{T_2} mc \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{T_2}{T_1}$ .  $S = k \cdot \ln W$

## IV. Задачи (блиц):

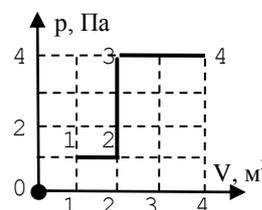
1. 8,64 г азота, находящегося при нормальных условиях ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 10^5 \text{ Па}$ ) сжимается до объема  $V_2 = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Найти температуру азота после сжатия, если процесс происходит адиабатически. Какова при этом работа сжатия?

Ответ:  $T_2 = 519,7 \text{ К}$ ,  $A = -1,58 \text{ кДж}$

2. Моль гелия расширяется в изотермическом процессе, совершая работу  $A$ . Затем газ охлаждается в изобарическом процессе, и, наконец в адиабатическом процессе возвращается в исходное состояние. Какую работу совершил газ в замкнутом цикле, если разность максимальной и минимальной температур газа в нем составила  $\Delta T$ ?  $A' = Q_1 - Q_2$ , откуда  $A' = A - \frac{5}{2} \nu R \Delta T$

3. Вертикальный цилиндр разделен поршнем массы  $m$ . Над поршнем вакуум, а ниже поршня газообразный гелий. К газу подводится тепловая мощность  $N$ , при этом поршень поднимается с постоянной скоростью.

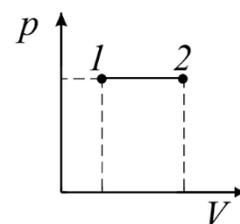
Найдите эту скорость. Трением пренебречь.  $v = \frac{N}{2,5mg}$



4. Чему равно отношение  $Q_{14}/A'_{14}$  при переходе одноатомного газа из состояния 1 в состояние 4. 3,5

**V. Олимпиада.**

1. При проведении процесса, изображенного на  $pV$  диаграмме, газ водород совершил работу 5 МДж при постоянном давлении и температуре. Определите величину изменения массы газа в этом процессе, если температура - нулевая по Цельсию. Газ можно считать идеальным. 2,2 г.  $\Delta m = \frac{A'M}{2RT}$



2. Гелий в количестве  $\nu$  молей находится в теплоизолированном вертикальном сосуде под поршнем, на котором стоит гиря, масса которой в  $\alpha$  раз больше массы поршня (рис.). Над поршнем вакуум. Если к гелию медленно подводить теплоту  $Q$ , объем гелия увеличивается на такую же величину, как если бы вместо подведения тепла гирю быстро сняли. Найдите изменение  $\Delta T_2$  температуры гелия во втором процессе. Гелий можно считать идеальным газом.  $\Delta T_2 = \frac{4Q}{15\nu R(\alpha + 1)}$

3. Водород ( $H_2$ ) расширяется сначала адиабатно, а затем – изобарно. Конечная температура водорода равна начальной. При адиабатном расширении водород совершил работу, равную  $A'_{12} = 6,5$  кДж. Какую работу совершил водород при совершении обоих процессов? Рассчитать  $A'_{23}$ , потом сложить. 9,1 кДж

4. На высоте 3 км над поверхностью Земли в  $1 \text{ см}^3$  воздуха содержится примерно  $10^2$  пылинок, а у самой поверхности - примерно  $10^5$ . Определите среднюю массу пылинки и оцените ее размер, предполагая, что плотность пылинки  $1,5 \text{ г/см}^3$ . Температуру воздуха примите равной  $27^\circ\text{C}$ . Вывести барометрическую формулу, зависимость концентрации частиц от высоты.  $10^{-21}$  г,  $10^{-7}$  см

*Вопросы (блиц):*

- Почему возникает резкий скачок воздушного сопротивления, возникающий при достижении самолетом некоторой пограничной скорости, близкой к скорости звука?
- Некоторое количество одноатомного идеального газа совершает в изобарическом процессе в  $n$  раз большую работу, чем в изотермическом. Определить отношение количеств теплоты, сообщаемых газу в этих процессах.  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{5}{3}n$
- С  $\nu$  молями одноатомного идеального газа проводят изобарический процесс, сообщив газу количество теплоты  $Q$ . Какова начальную температуру газа, если его объем вырос в этом процессе в  $n$  раз?  $T_1 = \frac{2Q}{5\nu Rn}$
- Всегда ли подведение тепла к системе приводит к увеличению её внутренней энергии?
- Два одинаковых объема газа, находившихся при одинаковых условиях, сжимают до одинаковых конечных объемов - один быстро, другой медленно. В каком случае совершенная работа больше?

6. Иногда газ при охлаждении отдает меньшее количество теплоты, чем было затрачено на его нагревание. Разве это не противоречит закону сохранения энергии?
7. Монету бросают трижды. Сколько разных последовательностей орлов и решек может при этом получиться?  $2^3=8$
8. Почему самолёт с традиционным винтом в горизонтальном полёте не может достичь скорости звука в воздухе?
9. Некоторую массу азота сжали в  $\eta = 5,0$  раз (по объёму) один раз адиабатно, другой – изотермически. Начальное состояние газа в обоих случаях одинаково. Найти отношение соответствующих работ по сжатию газа. 1,4
10. Одноатомному идеальному газу сообщается количество теплоты при постоянном давлении. Во сколько раз изменение внутренней энергии больше работы, совершаемой газом в этом процессе? 1,5
11. Найдите разницу молярных теплоемкостей идеального газа в изобарном и изохорном процессах.  $c_p - c_v = R$
12. Чем отличается процесс изотермического расширения газа от процесса его изобарного нагревания и что между ними общего?
13. В вертикальном, адиабатически изолированном, закрытом сверху тяжелым подвижным поршнем цилиндре находится 1 моль идеального газа при температуре  $T_1$ . Поршень перемещают вниз, совершая работу  $A$ , и отпускают. Какая температура  $T_2$  установится в газе, если наружным атмосферным давлением можно пренебречь по сравнению с давлением, создаваемым тяжелым поршнем? Ответ:  $T_2 = T_1 + A/C_v$ .
14. Моль гелия сжимают в бесконечно малом адиабатическом процессе. На сколько процентов изменится объём газа, если относительное изменение температуры составляет  $\Delta T/T = 0,32\%$ ? 0,48 %
15. При работе пневматического молота, работающего сжатым воздухом, наблюдается обмерзание молота снаружи. Как объяснить охлаждение молота?
16. Какую работу произвел газ, если он получил количество теплоты 300 Дж, а его внутренняя энергия увеличилась на 200 Дж?
17. Нам известно, что, когда время течёт из прошлого в будущее, Вселенная расширяется (с ускорением), а энтропия увеличивается. Можем ли мы вообразить Вселенную, где все наоборот?
18. Газ в адиабатном процессе совершает отрицательную работу. Что при этом происходит с его внутренней энергией?
19. В вертикальном теплоизолированном сосуде, поршень которого удерживается в неподвижном состоянии двумя одинаковыми гирями, находится 1 моль одноатомного газа. Начальная температура газа  $T_0$ . Давление воздуха вне цилиндра равно нулю. Как изменится температура газа, если одну из гирь снять, а затем через некоторое время поставить обратно? Поршень скользит в цилиндре без трения.
20. В каком случае при сжатии газа в цилиндре до одного и того же конечного объёма совершается большая работа: при медленном перемещении поршня или при быстром? Цилиндр не теплоизолированный.
21. Почему любая вещь, предоставленная самой себе, когда-нибудь разрушится?

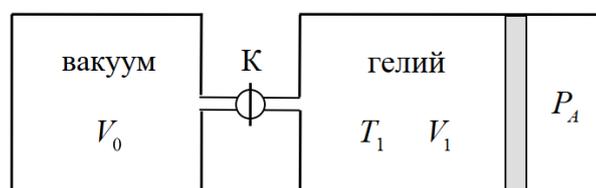
22. Объясните, почему кусок резины нагревается, если его растянуть?
23. У одинаковых количеств одно - и двухатомного газа одинаково изменили температуру. Одинаковое ли количество теплоты потребовалось?

### VI. Разное

1. Одноатомный идеальный газ сначала адиабатически сжали, а потом изобарно нагрели на  $60^{\circ}\text{C}$ . Суммарная работа газа в этих двух процессах равна нулю. Определите приращение температуры газа в адиабатном процессе.  $40^{\circ}\text{C}$
2. Один килограмм воздуха, находящийся при давлении  $p = 10^6$  Па и температуре  $T = 500$  К, изотермически расширяется так, что давление уменьшается в четыре раза. После этого газ адиабатически сжимается до первоначального давления, а затем изобарически возвращается в первоначальное состояние. Нарисовать график процесса в координатах  $P-V$ . Определите работу, совершенную газом за цикл. 72,41 кДж
3. Определите молярную массу трехатомного газа, имеющего удельную теплоемкость при постоянном давлении  $c_p = 725$  Дж/(кг·К). 46 г/моль
4. Чему равен показатель адиабаты смеси газов, состоящей из азота и неона? Известно, что массы газов в смеси равны. На сколько градусов нагрелись 4 кг такой смеси, помещенные в сосуд постоянного объема, если им сообщили 0,5 кДж теплоты? На какую величину при этом изменилась энтропия смеси, если начальная температура  $27^{\circ}\text{C}$ ? 1,56. 0,13 К. 2,39 Дж/К.
5. Идеальный газ в количестве  $\nu$  молей, находящийся при температуре  $T$ , изохорно охлаждается так, что давление падает в  $n$  раз. Затем газ расширяется при постоянном давлении до первоначальной температуры. Определите совершенную газом работу.  $A = \frac{n-1}{n} \nu RT$
6. Водород занимает объем  $10,0$  м<sup>3</sup> при давлении 0,1 МПа. Его нагрели при постоянном объеме до давления 0,3 МПа, затем, изотермически увеличив объем, довели давление газа до первоначального. Определите изменение внутренней энергии газа, работу, совершенную им, и количество теплоты, сообщенное газу.  $\Delta U = -3,3$  МДж.  $A' = 1,3$  МДж,  $Q = -2$  МДж
7. Найдите молярную теплоемкость  $C$  одноатомного идеального газа, расширяющегося по закону  $pV^n = \text{const}$ .  $C = C_V + R/(1 - n)$ .
8. 1 моль водорода нагревается при постоянном давлении и температуре  $T_1$ . Какое количество тепла  $Q$  необходимо сообщить ему, чтобы объем газа удвоился? Какая работа  $A$  будет при этом совершена газом?  $Q = C_p T_1$ ;  $A' = RT_1$
9. Биогаз — продукт переработки биомассы — состоит на 65 % из метана ( $\text{CH}_4$ ), на 30 % — из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), на 1,5 % — из сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ), остальное — азот ( $\text{N}_2$ ). Вычислить молярную массу данной смеси газов и ее молярную теплоемкость при постоянном объеме.

### Олимпиада.

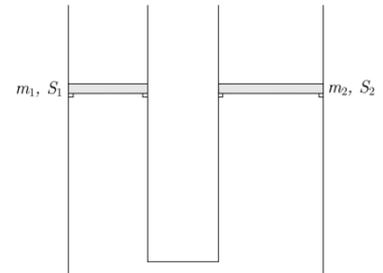
1. Два цилиндра соединены короткой трубкой с краном К. Объем левого цилиндра  $V_0 = 4$  л. Правый цилиндр закрыт поршнем, который может двигаться без трения. Справа от поршня цилиндр открыт в атмосферу. В



начальном состоянии кран закрыт и левый цилиндр откачан до глубокого вакуума. В правом цилиндре находится гелий при температуре  $T_1 = 300$  К и атмосферном давлении  $P_A$ . Объём гелия  $V_1 = 5,5$  л. Кран открывают, гелий начинает перетекать в левый цилиндр, поршень перемещается, и вся система переходит в новое равновесное состояние. Найдите температуру гелия  $T_2$  в этом состоянии, считая, что стенки цилиндров и поршень не проводят тепло. Объём трубки с краном не учитывайте, атмосферное давление считайте постоянным. Ответ выразите в кельвинах и округлите до целого значения. 387 К

2. В хорошо откачанной вакуумной системе открывают кран, соединяющий ее с атмосферой. Сразу после уравнивания давлений кран закрывают. Каким окажется давление в системе после установления теплового равновесия окружающим воздухом? Атмосферное давление  $p_0$ .

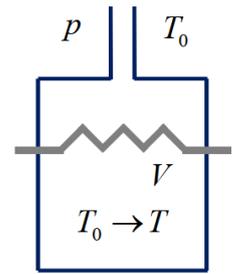
$$p = \frac{p_0}{1 + R/C_V}$$



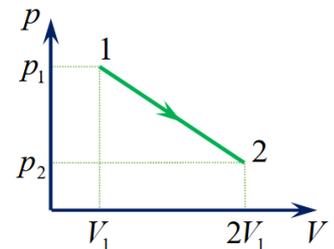
3. Как изменяется температура идеального газа, расширяющегося по закону  $pV^2 = \text{const}$  при неизменной массе? Чему при этом равна его молярная теплоемкость  $C$ ? Ответ: температура уменьшается. Из  $TV = \text{const}$ , получаем:  $T \Delta V + V \Delta T = 0$ , откуда  $\Delta V/\Delta T = -V/T$ . Теперь для теплоемкости имеем:  $C \Delta T = C_V \Delta T + p \Delta V = C_V - R$ .
4. Два вертикальных цилиндрических сосуда соединены в нижней части трубкой пренебрежимо малого объёма. Внутри цилиндров установлены поршни, которые могут перемещаться без трения. Пространство под поршнями заполнено гелием. В средней части цилиндров на высоте  $h = 30$  см имеются упоры, ограничивающие движение поршней вниз. Площади поперечного сечения цилиндров  $S_1 = 120$  см<sup>2</sup>,  $S_2 = 180$  см<sup>2</sup>, массы поршней  $m_1 = 18$  кг,  $m_2 = 24$  кг. Цилиндры теплоизолированы. Теплообменом между газом и цилиндрами с поршнями в условиях задачи можно пренебречь. Внешнее давление равно атмосферному  $P_0 = 10^5$  Па, внутри цилиндров давление гелия изначально равно атмосферному. Начальная температура газа под поршнями равна  $27$  °С. Внутри одного из цилиндров установлен нагреватель мощностью  $N = 15$  Вт, включая который, можно изменять температуру газа в цилиндрах. Через некоторое время после включения нагревателя объём газа под поршнями начинает увеличиваться. Универсальная газовая постоянная  $R = 8.31$  Дж/(моль·К), ускорение свободного падения  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>. Цилиндры высокие, и за время эксперимента поршни остаются внутри них (не «выскакивают»). Параметры газа (давление и температуру) можно считать одинаковыми в обоих цилиндрах при любых процессах.
- В каком порядке поршни начинают двигаться?
  - При каком давлении гелия под поршнями объём гелия начнёт увеличиваться? Ответ выразите в килопаскалях, округлите до целых. Ответ: 113
  - На сколько градусов необходимо увеличить температуру гелия под поршнями, чтобы его объём начал увеличиваться? Ответ: 40

- Через какое время после включения нагревателя объём гелия начнёт увеличиваться? Ответ выразите в секундах, округлите до целых.  
Ответ: 12С

- какой скоростью будет изменяться объём гелия под поршнями с момента, когда один или оба поршня придут в движение? Ответ: 53 см<sup>3</sup>/с



5. Сосуд объемом  $V$  с теплообменником внутри сообщается с атмосферой через тонкую длинную трубку. Исходно температура в нем  $T_0$  равна температуре атмосферного воздуха. По теплообменнику прокачивают охлаждающую жидкость до тех пор, пока температура воздуха во всем сосуде не уменьшится до  $T$  ( $T < T_0$ ). Сколько тепла от воздуха будет передано теплообменнику? Атмосферное давление  $p_0$ . Поток тепла через стенки сосуда и трубку можно пренебречь. Внутренняя энергия воздуха  $U = 5\nu RT/2$ , где  $\nu$  — число молей,  $T$  — температура,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Искомое тепло  $Q = (7/2)PV(T_0/T - 1)$ .
6. Один моль идеального одноатомного газа переводят из начального состояния 1 с давлением  $p_1$  и объемом  $V_1$  в конечное состояние 2 с давлением  $p_2 < p_1$  и объемом  $2V_1$ . На диаграмме  $p$ - $V$  процесс перехода изображается прямолинейным отрезком, соединяющим точки 1 и 2. Найдите минимальное значение конечного давления  $p_2$ , при котором в рассматриваемом процессе газ не будет отдавать тепло.



## Занятие 9. Тепловые двигатели.

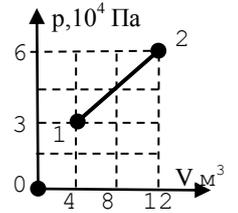
### I. Вопросы (блиц):

1. Почему ветер, дующий с гор, как правило, сухой и горячий, ведь в горах холодно и влажно?
2. Моль гелия сжимают в бесконечно малом адиабатическом процессе. На сколько процентов изменится объём газа, если относительное изменение температуры составляет  $\Delta T/T = 0,32\%$ ? 0,48 %. 1 закон т-ки и уравнение М.К.
3. В каком случае теплоемкость системы (например, газа): равна нулю; 2) равна  $\infty$ ; 3) может быть отрицательной?
4. Температуру одного моля одноатомного идеального газа увеличили изохорически на  $\Delta T$ , а затем изобарически еще на такую же величину. Во сколько раз сообщенное газу во всем процессе количество теплоты больше совершенной им работы? в 4 раза
5. Почему нагревается обшивка летательного аппарата при его движении в атмосфере Земли (разогрев атмосферного столба до 33000<sup>0</sup>С при падении астероида)?
6. Прогретый у земной поверхности влажный воздух поднимается вверх. Совершает ли он при этом работу? Как изменяется его внутренняя энергия? Каковы последствия этого процесса?
7. Быстрое расширение пороховых газов можно считать адиабатным процессом. Почему же ствол автомата нагревается? Успевает, в том числе из-за трения
8. Можно ли указать процесс, в котором газ нагревается, отдавая тепло?
9. Почему человек чувствует озноб после того, как сильно чихнет?

10. За счет чего нагреваются шины автомобиля при длительной езде?
11. Сжимая газ адиабатно, мы совершаем работу. Увеличивается ли при этом потенциальная энергия молекул газа?

**II. Задачи (блиц):**

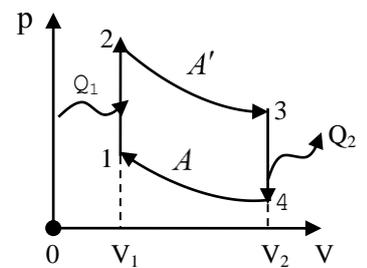
1. Какое количество теплоты получает двухатомный идеальный газ при его переходе из состояния 1 в состояние 2? 1,86 МДж
2. В гладком вертикальном цилиндре под подвижным поршнем массой  $M$  находится идеальный одноатомный газ. Ему медленно подводят количество теплоты  $Q$ , в результате чего поршень поднимается. На какую высоту  $\Delta h$  он поднимется? Площадь цилиндра составляет  $S$ . Атмосферное давление равно  $p_0$ .  $\Delta h = \frac{2Q}{5(p_0S + Mg)}$



3. В длинном горизонтальном цилиндре между двумя одинаковыми поршнями находится 0,1 моль гелия. В начальный момент один поршень покоится, а другой приближается к нему со скоростью 12 м/с. На сколько градусов максимальная температура газа больше начальной? Массы поршней 415 г. Трением и теплообменом пренебречь, за поршнями вакуум. 12 К

**III. Тепловой двигатель – устройство, преобразующее внутреннюю энергию топлива в механическую энергию.**

**Работа пара.** В нагревателе порция пара получает количество теплоты  $Q_1$ , и ее температура становится  $T_1$ . Работа пара ( $A'$ ) при расширении. Как процесс сделать циклическим? Какую работу необходимо совершить нам ( $A$ ) для возвращения порции пара в нагреватель? Каков КПД этого цикла? Холодильник. Порция пара отдает холодильнику количество теплоты  $Q_2$  и ее температура становится  $T_2$ . Какую теперь работу необходимо произвести для возвращения порции пара в нагреватель? Меньшую! Почему?



**Формула для КПД теплового двигателя:**  $A_{II} = A' - A = Q_1 - Q_2 = N \cdot t = F \cdot S$ .

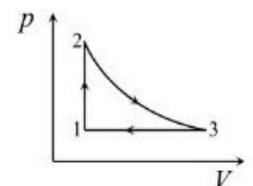
$$\eta = \frac{A_{II}}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

**Прямой цикл Карно.**  $Q_1 - Q_2 = A$ . КПД цикла Карно:  $\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\%$ ,  $\eta < \eta_{max}$ .

**Обратный цикл Карно.**  $Q_2 = A + Q_1$ . **Коэффициент преобразования** энергии ( $\eta_0$ ) – отношение количества теплоты, переданной горячему теплоносителю к работе, затраченной на сжатие:  $\eta_0 = Q_1/A$  (обратен КПД машины).

**IV. Задачи (блиц):**

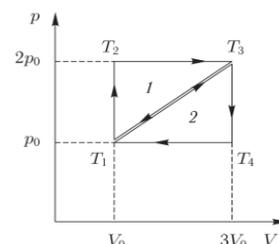
1. Некоторое количество гелия участвует в следующем циклическом процессе – изохорическое нагревание 1-2, изотермическое расширение 2-3, изобарическое охлаждение. Известно, что в изобарическом охлаждении 3-1 над газом совершена работа  $A$ , а в изотермическом расширении 2-3 газу сообщили количество теплоты  $Q = 1,5 A$ . Найди КПД цикла. 20%
2. В холодильник, потребляющий мощность 200 Вт, поместили 2 кг воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Через 30 мин вся вода превратилась в лед. Какое количество теплоты выделилось при этом в комнате? 1208 кДж



3. Температура внутри холодильника равна  $t_2 = 5^\circ\text{C}$ , а теплоемкость составляет  $C = 84 \text{ кДж/К}$ . При работе холодильника тепло выделяется в комнату с температурой  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ . Какой минимальной мощностью  $P$  должен обладать мотор, приводящий холодильник в действие, чтобы за время  $\tau = 1 \text{ мин}$  понизить температуру в холодильнике на  $\Delta t = 2^\circ\text{C}$ ? 201 Вт

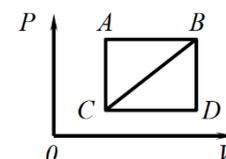
### V. Олимпиада.

- Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества  $\nu = 1 \text{ моль}$  и находящийся под давлением  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  при температуре  $T_1 = 300 \text{ К}$ , нагревают при постоянном объеме до давления  $p_2 = 0,2 \text{ МПа}$ . После этого газ изотермически расширился до начального давления и затем изобарно был сжат до начального объема  $V_1$ . **Построить только график** цикла. Определите температуру газа  $T$  для характерных точек цикла и его КПД  $\eta$ .  $T_2 = 600 \text{ К}$ , 9,94%
- Предлагается тепловая машина, работающая на использовании суточного перепада температур. Проектная мощность машины 10 л.с. (1 л.с. = 736 Вт). Оцените массу воды, которую понадобится использовать в качестве теплового резервуара. Исходя из результата, объясните, почему такие машины не нашли широкого применения. Полагая  $T \approx 300 \text{ К}$ ,  $\Delta T \approx 10 \text{ К}$ , машина работает по циклу Карно только 6 часов ночью, запасая тепло днем, получим 4500 т
- На рисунке показаны два цикла, соответствующие различным тепловым двигателям. Сравните коэффициенты полезного действия этих двигателей, считая, что рабочим телом является 1 моль одноатомного идеального газа. На осях графиков показаны значения соответствующих параметров — давления и объема.  $\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{21}{23}$



### Вопросы (блиц):

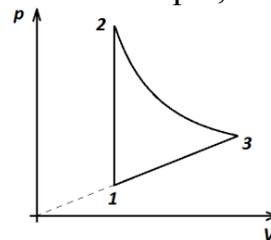
- Почему холодильник или кондиционер необходимо подключать к электрической сети?
- КПД идеальной тепловой машины равен 60%. Во сколько раз температура холодильника меньше температуры нагревателя? в 2,5
- Можно ли использовать холодильную машину для охлаждения воздуха в квартире?
- Почему холодильник не работает, если он не включен в розетку?
- КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, составляет 50 %. Абсолютную температуру нагревателя увеличивают в 2 раза, температура холодильника не изменяется. Каким будет КПД получившейся идеальной тепловой машины? 0,75
- Газ, состоящий из атомов рубидия, был охлажден до одной шестимиллионной градуса выше абсолютного нуля, а не нуля по Цельсию. Почему это важно?
- Откуда получает энергию замерзающая вода, разрывая трубы парового отопления?
- На диаграмме  $(P, V)$  показаны процессы, проходящие с идеальным газом. Сравните КПД цикла  $CBDC$  с КПД цикла  $CABC$ .  $\eta_{CBDC} < \eta_{CABC}$



9. Чем отличаются процессы в цилиндре двигателя внутреннего сгорания в случаях, когда смесь сгорает постепенно или с взрывом (детонация). В каком случае выше КПД двигателя?
10. При работе теплового насоса происходит передача количества теплоты от менее нагретого тела к более нагретому телу в течение циклического процесса. Не противоречит ли это второму закону термодинамики? нет
11. Не нарушает ли работа холодильной машины законы термодинамики?
12. Газ переходит из одного и того же начального состояния 1 в одно и то же конечное состояние 2 в результате следующих процессов: а) изобарного процесса; б) последовательных изохорного и изотермического процессов. Рассмотрите эти переходы графически. Одинаковы или различны в обоих случаях: 1) изменение внутренней энергии; 2) затраченное количество теплоты?
13. Увеличим степень расширения газа в цикле Карно. Как изменится работа? КПД?
14. Тепловой насос можно эксплуатировать в режиме холодильника. Его характеристикой является холодильный коэффициент  $\eta_x = Q_x/A$ . Для установленных во многих школах кулеров (мини-холодильников для охлаждения питьевой воды) этот коэффициент примерно равен 2,5.
- 1) Какую тепловую мощность отнимает такой кулер от порции охлаждаемой воды, если он потребляет от электрической сети мощность  $P = 50$  Вт?  $P_x = \eta_x P = 2,5 \cdot 50 = 125$  Вт
  - 2) Какую тепловую мощность такой кулер передает комнате при охлаждении воды?  $P + P_x = 175$  Вт
  - 3) Кулер можно рассматривать и как тепловой насос, поскольку он передает комнате количество теплоты от охлаждаемой воды. Чему равна эффективность этого теплового насоса? Эффективность кулера как теплового насоса равна  $(P + P_x)/P = 175/50 = 3,5 = 350\%$ . Таким образом, кулер, охлаждая воду, подогревает комнату.
15. В ящике 52 апельсина, 4 из которых испорчены. Какова вероятность вытащить 2 испорченных апельсина?  $1/13 \cdot 1/17 = 1/221$ .

### Разное

1. Азот массой  $m = 5,6$  г при давлении  $P_1 = 10^5$  Па имел объем  $V_1 = 5$  л, а в конечном состоянии при давлении  $P_3 = 3 \cdot 10^5$  Па объем  $V_3 = 2$  л. Переход от первого состояния ко второму произведен в два этапа: сначала по изохоре, а затем по адиабате. Постройте график процесса в координатах  $P - V$  и определите приращение внутренней энергии  $\Delta U_{1-2-3}$  газа за весь процесс. 249 Дж
2. В основе работы тепловой машины лежит цикл, состоящий из изохоры, изотермы и процесса с прямо пропорциональной зависимостью давления от объёма (см. рисунок). В качестве рабочего тела используется идеальный одноатомный газ. Известно, что максимальная и минимальная температуры отличаются в два раза. Определите КПД данной тепловой машины. Ответ: 8,8 %.
3. Для кондиционера, работающего по циклу Карно, коэффициент использования энергии равен 16. До какой температуры охладится воздух в

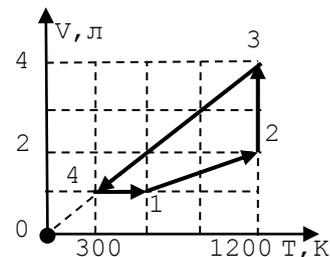


комнате, если температура наружного воздуха равна  $37^{\circ}\text{C}$ ?  $T_2 = T_1 \eta_Q / (1 + \eta_Q) = 291 \text{ K}$  или  $18^{\circ}\text{C}$ .

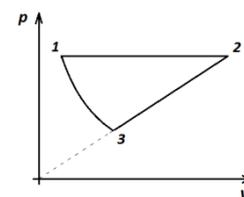
- Газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна  $220^{\circ}\text{C}$ , температура холодильника равна  $17^{\circ}\text{C}$ . При изотермическом расширении газ совершает работу  $120 \text{ Дж}$ . Определите количество теплоты, которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.  $71 \text{ Дж}$
- С помощью электроплитки мощностью  $P = 1 \text{ кВт}$  в комнате поддерживается температура  $t_1 = 17^{\circ}\text{C}$  при температуре наружного воздуха  $t_2 = -23^{\circ}\text{C}$ . Какая мощность  $P_1$  потребовалась бы для поддержания в комнате той же температуры с помощью идеальной тепловой машины?  $138 \text{ Вт}$

### Олимпиада.

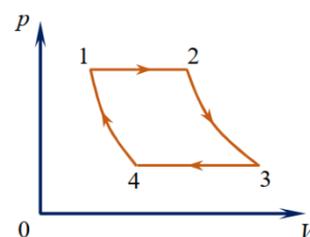
- На рисунке показана  $V - T$ -диаграмма цикла, совершаемого  $\text{O}_2$ . Давление газа в точке 1 составляет  $200 \text{ кПа}$ . Определить давление газа в точках 2, 3, 4. Построить остальные термодинамические диаграммы. Найти: изменение внутренней энергии газа, работу, совершаемую газом, теплоту, подведенную к газу, и изменение энтропии газа в каждом из процессов 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 и во всем цикле. Рассчитать КПД цикла и сравнить его с КПД цикла Карно при тех же максимальной и минимальной температурах.



- В основе работы тепловой машины лежит цикл, состоящий из изобары, изотермы и процесса с прямо пропорциональной зависимостью давления от объёма (см. рисунок). В качестве рабочего тела используется идеальный одноатомный газ. Известно, что максимальная и минимальная температуры отличаются в два раза. Определите КПД данной тепловой машины. Ответ:  $6,1 \%$ .

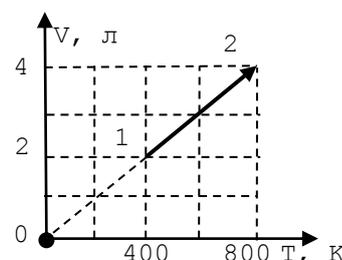


- Над идеальным газом проводится циклический процесс, состоящий из двух изобар 1-2 и 3-4, и двух адиабат 2-3 и 4. Известно, что изменение температуры газа при изобарном расширении на участке 1-2 в  $k = 2$  раза больше, чем модуль изменения температуры при изобарном сжатии на участке 3-4. Найдите коэффициент полезного действия цикла  $\eta$ .



- При нагревании  $8 \text{ г}$  аргона его абсолютная температура увеличилась в 2 раза. Определить изменение энтропии при изохорическом и изобарическом нагревании. Ответ:  $1,7; 2,9 \text{ Дж/К}$

- При помощи поршневого насоса доводят давление воздуха в  $10$ -литровом баллоне до десяти атмосфер. Какая работа при этом совершается, если за один цикл насос прокачивает  $1 \text{ л}$  воздуха? Температура остается неизменной. Первоначальное давление газа в баллоне одна атмосфера. Отводимое тепло равно изменению энтропии.  $23 \text{ кДж}$



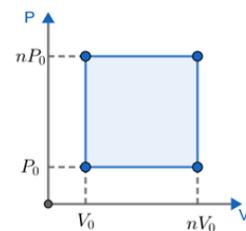
## Занятие 10. Влажность.

### I. Вопросы (блиц):

1. В результате изобарного процесса объем одноатомного идеального газа увеличился в 3 раза. Определить коэффициент полезного действия этого процесса. Ответ: 40%.
2. Для чего необходим холодильник тепловой машине?
3. Как доказать, что абсолютный нуль температуры недостижим?
4. Каковы причины того, что абсолютный нуль температуры недостижим?
5. На что расходуется энергия, потребляемая домашним холодильником?
6. Можно ли охладить комнату в жаркий день, оставив открытой дверцу холодильника?
7. Для обогрева помещений часто используют так называемые тепловые насосы. Допустим, коэффициент использования энергии такого теплового насоса равен  $\eta_0 = 10$ , а потребляемая им мощность равна  $N = 150$  Вт. Сколько тепловой энергии в минуту способен подать он в помещение?  $P_1 = \eta_0 N = 1,5$  кВт.
8. Какой из законов термодинамики необходимо применить для объяснения явления образование облаков при подъеме теплого влажного воздуха вверх?
9. Правда ли, что подводные лодки в холодной воде должны двигаться быстрее (возрастание КПД, меньше пузырьков с паром)?
10. Каково отношение абсолютных температур холодильника и нагревателя у идеального теплового двигателя мощностью 15 кВт, если он отдает холодильнику 35 кДж каждую секунду? Ответ. 0,7.
11. Температура атмосферного воздуха, играющего для автомобильного двигателя роль холодильника, зимой заметно ниже, чем летом. Ведет ли это к увеличению КПД двигателя зимой?

### II. Задачи (блиц):

1. Кислород массой 3 кг при температуре 320 К охладил изохорно. При этом давление кислорода уменьшилось в 3 раза. Затем газ изобарно расширили так, что его температура стала равна первоначальной температуре. Какую работу совершил газ? Как изменится его внутренняя энергия? 16,62 кДж; 0.
2. Один моль гелия совершает цикл: участок 1-2 — адиабата, 2-3 — изотерма, 3-1 — изобара. Работа, совершенная газом за цикл, равна 250 Дж. На участке 2-3 газ отдает количество теплоты  $Q = 15$  кДж. Какова разность температур между состояниями 1 и 2? 734 К
3. Оцените значения, которые может принять КПД цикла, указанного на рисунке, в зависимости от значения параметра  $n$ . Рабочим телом цикла является идеальный одноатомный газ.  $\eta = \frac{2(n-1)}{3+5n}$



### III. Основные понятия:

1. **Фаза** - равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний данного вещества.
2. **Фазовый переход** - переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий (температуры, давления и т.д.).
- Парообразование** - переход вещества из конденсированной фазы в газообразную фазу (испарение, сублимация, кипение).
3. **Фазовое равновесие** - одновременное существование равновесных фаз в многофазной

системе. **Критическая температура.** При температурах выше критической вещество может быть только в газообразном состоянии.

**Упругость (p)** - парциальное давление водяного пара в атмосфере.

$t, ^\circ\text{C}$	-20	-10	0	+10	+20	+30	+50	+70	+90	+100	120
$p_{\text{н}}, \text{мм рт.ст.}$	0,77	1,95	4,58	9,2	17,54	31,8	92,5	233,7	525,8	760	1520

Чем выше температура, тем больше предельное содержание водяного пара.

**Относительная влажность воздуха (r):**  $r = \frac{p}{p_s} \cdot 100\%$ .

**Как можно увеличить относительную влажность воздуха?**

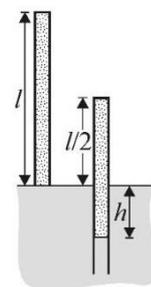
- 1) **Испарение.** Существует предельная масса воды, которую при данной температуре можно испарить в помещении.
- 2) **Уменьшение объём сосуда,** содержащего влажный воздух, при неизменной температуре.
- 3) **Понижение температуры воздуха. Точка росы ( $t_p$ ).**

**IV. Задачи (блиц):**

1. В закрытом сосуде объёмом  $V = 10$  л находится влажный воздух массой  $m = 18$  г при температуре  $t = 80^\circ\text{C}$  и давлении  $2 \cdot 10^5$  Па. Определите массу паров воды в сосуде. 2,8 г
2. Найти среднее расстояние между молекулами насыщенного водяного пара при температуре  $t = 100^\circ\text{C}$ .  $\ell = (kT/p)^{1/2} = 3,7$  нм.
3. В замкнутом сосуде объёмом  $V = 1$  м<sup>3</sup> находятся вода массой  $m = 12$  г и насыщенный пар. Плотность и давление пара при данной температуре равны соответственно  $\rho = 8 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> и  $p = 1,1$  кПа. Какое давление установится при увеличении объёма в  $k = 5$  раз? Процесс изотермический. 550 Па.

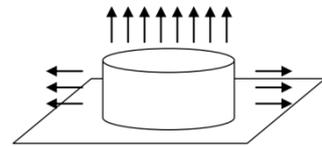
**V. Олимпиада.**

1. В теплоизолированном цилиндре под невесомым поршнем находится  $m_1 = 1$  г насыщенного водяного пара. Наружное давление нормальное. В цилиндр ввели  $m_2 = 1$  г воды при температуре  $T_2 = 295$  К. Пренебрегая теплоемкостью цилиндра и трением, найти работу сил атмосферного давления при опускании поршня. Пар считать идеальным газом. Молярная масса воды  $\mu = 0,018$  кг/моль, удельная теплота парообразования воды  $q = 2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг, удельная теплоемкость воды  $c = 4200$  Дж/(кг·К). 24,5 кДж
2. Старшеклассник Петя выполнял эксперимент с водяным паром. Он взял пар при температуре  $t = 100^\circ\text{C}$ , поместил его в вертикальный цилиндрический сосуд под невесомый поршень. Поршень Петя установил на высоте  $h_0 = 30$  см от дна сосуда и отпустил. После установления равновесия поршень оказался на высоте  $h = 10$  см, при этом давление пара выросло в 2 раза. Определите массу пара, которую Петя взял для работы. Площадь дна сосуда  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Ответ: 0,048 кг.
3. Стеклоанная трубка длиной  $\ell = 1$  м, герметично закрытая с одного конца, расположена вертикально открытым концом вниз и заполнена смесью воздуха и насыщенного водяного пара. Трубку медленно погружают в воду на половину ее длины. При этом поверхность воды в трубке оказывается на глубине  $h = 0,45$  м. Считая температуру газовой смеси в трубке постоянной, найдите давление  $p_{\text{нас}}$  насыщенных паров воды при этой температуре. Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па, плотность воды  $\rho_0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Поверхностное натяжение воды можно не учитывать. 14,5 кПа



4. Какое количество капель воды находится в кубическом метре тумана, если видимость равна 100 м и туман держится около часа? Высота слоя тумана 200 м. Вязкость воздуха  $1,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Общая площадь капель на расстоянии 100 м полностью перекрывает свет, поэтому  $N = \frac{S}{\pi R^2} \rightarrow n = \frac{1}{100\pi R^2}$ . Радиус капли по формуле Стокса. Ответ:  $7,1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$

5. Цилиндр из сухого льда (твердой углекислоты) радиусом  $R$  и высотой  $h = R/2$  стоит на своем основании на плоской поверхности. Лед испаряется так, что с единицы площади в единицу времени с открытой поверхности испаряется масса льда  $\sigma$ . За какое время весь лед испарится? Плотность льда  $\rho$ . Время испарения с основания меньше, цилиндр испарится за время  $t = \frac{R\rho}{2\sigma}$



*Вопросы (блиц):*

1. Если подуть на чистое холодное стекло, то возникает туманное пятнышко, которое затем достаточно быстро уменьшается в размерах и пропадает. Почему?
2. Почему роса формируется именно на поверхности земли и на траве, а не в виде миниатюрных дождевых капель в воздухе?
3. В объеме 20 л находятся насыщенные пары воды при  $100^\circ\text{C}$ . Какую работу нужно совершить, чтобы путем изотермического сжатия уменьшить объем до 10 л? 1 кДж
4. В каком состоянии находится вода на поверхности Венеры, где температура около  $500^\circ\text{C}$ ?
5. Почему эффективно хранить в баллонах водород можно только в сжиженном виде при низких температурах?
6. В замкнутом сосуде под поршнем находятся одинаковые массы воды и водяного пара в равновесии. Поршень плавно опускают, уменьшая объем сосуда вдвое. Температура поддерживается постоянной и равной  $t = 50^\circ\text{C}$ . Во сколько раз после опускания поршня масса воды превышает массу водяного пара? в три раза
7. Мыльный пузырь на морозе внезапно сдувается и захлопывается. Почему?
8. Почему сохраняется очень низкой температура жидкого воздуха ( $81\text{ K}$ ) в сосуде Дьюара?
9. Почему эпидемия гриппа регулярно происходит в зимнее время года (воздушно-капельный путь передачи инфекции)?
10. Почему быстрее остывает горячий чай в чашке, если мы на него дуем?
11. Насыщенный водяной пар подвергается адиабатическому сжатию и адиабатическому расширению. В каком из этих процессов пар превращается в ненасыщенный? В пересыщенный? При сжатии — в ненасыщенный.
12. Почему зимой в теплой комнате низкая влажность воздуха?
13. Ненасыщенный пар охлаждают до появления росы: один раз – изобарически, второй раз – изохорически. В каком случае роса появится при большей температуре? Почему?
14. Влажный воздух в герметичном сосуде при  $100^\circ\text{C}$  имеет относительную

влажность 60% и давление 1 атм. Каким станет его давление после изотермического уменьшения объема сосуда в два раза?

15. Почему кучевое облако имеет форму «кучи»?
16. При изотермическом сжатии  $m = 9$  г водяного пара при температуре  $T = 373$  К его объем уменьшился в 3 раза, а давление возросло вдвое. Найдите начальный объем пара.  $V \approx 31$  л
17. Почему при увеличении абсолютной влажности воздуха (плотности водяного пара в воздухе) атмосферное давление уменьшается?

### Разное

1. В калориметр наливают  $m_1 = 2$  кг воды при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ , а затем  $m_2 = 0,8$  кг жидкого азота при температуре кипения  $T_2 = 77$  К и закрывают подвижным поршнем, поддерживающим постоянное давление. В каком агрегатном состоянии и при какой температуре будет находиться вещество в калориметре после установления теплового равновесия? Удельная теплота парообразования азота  $200$  кДж/кг, его удельная теплоемкость  $c_2 = 1$  кДж/(кг·К).  $0^\circ\text{C}$ ,  $m_d = 0,7$  кг.
2. В цилиндре под поршнем находился влажный воздух с относительной влажностью  $\varphi = 60\%$ . При изотермическом уменьшении объема воздуха в  $n = 3$  раза сконденсировалось  $m = 5$  г воды. Определите массу пара  $m_0$ , первоначально содержавшегося в цилиндре.  $m_0 = \frac{n\varphi m}{n\varphi - 1} = 11$  г
3. Найти, какая часть затраченной на парообразование энергии идет на совершение работы против сил атмосферного давления при  $t = 100^\circ\text{C}$ , если удельный объем пара  $V = 1,65$  м<sup>3</sup>/кг. 7,3%
4. На сколько изменится подъемная сила воздушного шара объемом  $V$ , если относительная влажность воздуха увеличится на  $\Delta\varphi = 20\%$  без изменения его давления и температуры? Плотность насыщенных паров при данной температуре равна  $\rho$ . Молярные массы воздуха и паров воды равны соответственно  $M_B = 29$  г/моль и  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$  г/моль.  $\Delta F \approx 0,122\rho gV$
5. В запаянной с одного конца трубке находится влажный воздух, отделенный от атмосферы столбиком ртути длиной 100 мм. Когда трубка лежит горизонтально, относительная влажность воздуха в ней равна 60%. Какой станет относительная влажность воздуха, если трубку поставить вертикально открытым концом вверх? Атмосферное давление равно 760 мм рт.ст. Температуру считать постоянной. 68%
6. Плотность насыщенного водяного пара при температуре  $t_0 = 27^\circ\text{C}$  равна  $\rho_n = 25,8$  г/м<sup>3</sup>, относительная влажность воздуха при этой температуре  $\varphi = 80\%$ . Какова плотность  $\rho$  влажного воздуха при давлении  $p_0 = 10^5$  Па и температуре  $t_0$ ?

### Олимпиада.

1. В закрытом с обоих концов цилиндре объемом  $V = 2$  л свободно ходит невесомый тонкий поршень. В пространстве с одной стороны поршня вводится  $m_1 = 2$  г воды; с другой стороны поршня  $m_2 = 1$  г азота. Найти отношение объемов частей цилиндра при  $t = 100^\circ\text{C}$ . Не вся вода испарится, 9/11.

2. Взрывная камера заполняется смесью метана и кислорода при комнатной температуре до давления  $p_0 = 760$  Тор. Парциальные давления метана и кислорода одинаковы. После герметизации камеры в ней происходит взрыв. Найти установившееся давление в камере после охлаждения продуктов сгорания до первоначальной температуры, при которой давление насыщенных паров воды  $p_H = 17$  Тор. 397 Тор
3. В закрытом сосуде при температуре  $100^\circ\text{C}$  находится влажный воздух с относительной влажностью 70% под давлением 100 кПа. Объём сосуда изотермически уменьшили в 3 раза. До какой абсолютной температуры надо вместо этого нагреть воздух без изменения объёма сосуда, чтобы получить такое же конечное давление? Объёмом сконденсировавшейся воды пренебречь. 709 К
4. В стеклянной банке объёмом 1 л, закрытой завинчивающейся крышкой, находятся 0,5 л воды и насыщенный водяной пар при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Какой момент силы  $M$  нужно приложить к крышке, чтобы отвернуть ее после того, как банка остынет до температуры  $20^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного водяного пара при температуре  $20^\circ\text{C}$  составляет  $p_H = 2,3$  кПа. Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па. Радиус крышки  $R = 4$  см, коэффициент трения между плоскостью крышки и верхней частью банки  $\mu = 0,2$ . Массой крышки и трением в резьбовом соединении крышки с банкой пренебречь. О т в е т.  $M \approx 3,8$  Н·м.
5. Герметичный сосуд при  $t = 27^\circ\text{C}$  разделён на две части плотной непроницаемой заслонкой и пористой мембраной площадью  $S = 10$  см<sup>2</sup> и толщиной  $h = 200$  мкм со сквозными цилиндрическими порами радиусом  $r = 40$  нм, расположенными перпендикулярно поверхности мембраны. Верхняя часть сосуда имеет объём  $V_1 = 2$  л и заполнена чистым газообразным бутаном под давлением  $p_1 = 0,1$  атм. Нижняя часть сосуда имеет объём  $V_2 = 1$  л и содержит  $V = 12$  мл жидкого бутана, находящегося в равновесии со своим паром, и газообразный метан с парциальным давлением  $p_2 = 3$  атм. Кроме того, в результате адсорбции и капиллярной конденсации поры мембраны целиком заполнены конденсатом бутана. Справочные данные: Плотность жидкого бутана  $\rho = 601,3$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент поверхностного натяжения бутана  $\sigma = 11,3 \cdot 10^{-3}$  Н/м, молярная масса бутана  $M_1 = 5,8 \cdot 10^{-2}$  кг/моль, молярная масса метана  $M_2 = 1,6 \cdot 10^{-2}$  кг/моль, при температуре  $t = 27^\circ\text{C}$  давление насыщенного пара бутана  $p_0 = 2,53$  атм, метан при температуре  $t = 27^\circ\text{C}$  не конденсируется. Почему жидкий бутан не вытекает из поры? Определите массу жидкого бутана, сконденсировавшегося в порах мембраны, если поры занимают  $\omega = 20\%$  от её объёма. Определите количество бутана в сосуде.

## Занятие 11. Поверхностное натяжение.

### I. Вопросы (блиц):

1. Почему жидкий азот можно лить на руку, не боясь ожога? Для капель азота рука, как горячая сковородка.
2. Жидкость налита в два сообщающихся сосуда. Один из сосудов плотно закрывается. Изменится ли положение уровней жидкости в сосудах? Почему?
3. В сосуде находится ненасыщенный пар. В процессе его изотермического

сжатия объем, занимаемый паром, уменьшается в  $\beta = 4$  раза, а давление в сосуде возрастает в  $\alpha = 3$  раза. Найдите долю пара, которая сконденсировалась в этом процессе.  $\frac{1}{4}$

4. В цилиндрическом сосуде под поршнем находится насыщенный пар при температуре  $T$ . При вдвигании поршня совершается работа  $A$ . Какая масса пара сконденсируется?  $\Delta m = \mu A / RT$
5. Если верхняя часть грозового облака преодолет границу между тропосферой и стратосферой, то будет ливень! Почему это похоже на правду?
6. Спирт кипит при  $78^\circ\text{C}$ , а вода – при  $100^\circ\text{C}$ . Почему же спиртовым термометром измеряют температуру кипящей воды?
7. Воздух при нагревании расширяется. Почему же тогда пузырёк воздуха в приборе, называемом уровнем, в жаркое время становится меньше, а в холодное – больше?
8. В цилиндре под поршнем находится водяной пар при температуре  $100^\circ\text{C}$  и давлении 50 кПа. Каким станет давление пара в цилиндре, если объем его изотермически уменьшить в 4 раза?
9. Когда открываешь бутылку колы, то показывается туман. Почему?
10. Иней на деревьях иногда исчезает без ветра и оттепели. Объясните, как это происходит?
11. В запаянной трубке находится вода. Как определить, только ли насыщенный пар воды или еще и воздух находятся над водой в трубке?

## II. Задачи (блиц):

1. В цилиндрическом сосуде под поршнем при температуре  $T = 373$  К находится насыщенный водяной пар. При изотермическом сжатии пара выделилось количество теплоты  $Q = 4540$  Дж. Найти совершенную при сжатии работу  $A$ . 344 Дж.
2. В здание зимой необходимо подать через систему кондиционирования  $100000$  м<sup>3</sup> воздуха так, чтобы он имел температуру  $20^\circ\text{C}$  и относительную влажность 70%. Воздух забирают с улицы, где он имеет температуру  $-5^\circ\text{C}$  и относительную влажность 90%. Давление насыщенных водяных паров при  $-5^\circ\text{C}$  равно 400 Па, а при  $+20^\circ\text{C}$  оно равно 2,33 кПа. Сколько воды надо дополнительно испарить в данный объем подаваемого воздуха? ( $m = 916$  кг.)

**III. Поверхностный слой жидкости. Поверхностная энергия ( $U_n$ )** – избыточная потенциальная энергия всех молекул поверхностного слоя.  $U_n = \sigma \cdot S$ . Жидкость всегда стремится уменьшить свою поверхностную энергию. Это свойство жидкости называется **поверхностным натяжением**.

**Давление внутри искривленной поверхности:**  $\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$  (Лаплас)  $\rightarrow \Delta p$

$= 4\sigma/r$  - избыточное давление внутри мыльного пузыря.

**«Паспорт» силы поверхностного натяжения:**

- Природа (электромагнитная);
- Модуль ( $F_n = \sigma \cdot \ell$ );
- Точка приложения (точка приложения равнодействующей всех сил поверхностного натяжения, действующих на данный участок границы раздела);
- Направление (по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно границе раздела).

**Смачивание и не смачивание.** Капля жидкости на поверхности твердого тела.  
**Краевой угол.** В случае смачивания поверхностей водой, если краевой угол меньше  $90^\circ$ , то поверхность называют гидрофильной, если больше - гидрофобной.  
**Жидкость в капилляре. Выпуклый и вогнутый мениск.** Формула для определения высоты подъема (опускания) жидкости в капилляре.

$$p_0 - \frac{2\sigma}{r} + \rho gh = p_0 \rightarrow h = \frac{2\sigma}{\rho gr}.$$

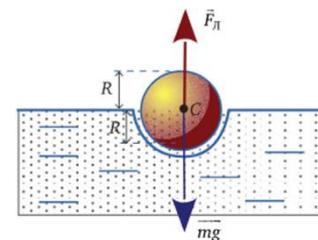
#### IV. Задачи (блиц):

1. Капиллярную трубку радиусом  $r = 10$  мкм и длиной  $l = 20$  см, запаянную с одного конца, опускают открытым концом в сосуд с водой. Поверхность жидкости горизонтальная. Определите высоту  $H$ , на которую поднимется вода в трубке. Смачивание полное. Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па, температура постоянная. 13,7 см

2. Ультразвуковой распылитель производит 5 кг водяного тумана за один час. Оценить полезную мощность прибора для распыления жидкости. Размер частиц тумана принять равным 20 мкм.  $N \approx 0,03$  Вт.  $N = \frac{6\sigma m}{\rho dt}$

3. Чтобы стряхнуть ртуть в медицинском термометре, нужно двигать термометр с ускорением  $a \approx 10g$ . Оцените величину диаметра перетяжки в капиллярной трубке термометра, если длина столбика ртути выше перетяжки  $h \approx 5$  см.  $3 \cdot 10^{-5}$

м.  $d = \frac{2\sigma}{5\rho gh}$



#### V. Олимпиада.

1. На поверхности жидкости плотностью  $\rho_{ж} = 1,0$  г/см<sup>3</sup> плавает не смачиваемая игла ( $\rho = 7,5$  г/см<sup>3</sup>), так что ее центр тяжести находится на горизонтальном уровне жидкости. Диаметр иглы  $d = 2,0$  мм. Определить поверхностное натяжение жидкости. Архимедовой силой пренебречь. 0,073 Н/м.  $\sigma = \rho g R^2$

2. В баллоне ёмкостью 1 литр находится азот. Азот из баллона медленно выпускают, всё время поддерживая температуру баллона постоянной. Когда в баллоне оставалось 1 моль азота, давление внутри баллона было равно  $10^5$  Па. Чему будет равно давление в баллоне, когда в нём останется 0,5 моль азота? Реальный газ.  $10^5$  Па.

3. Шарик массой  $m = 10$  г, летящий горизонтально со скоростью  $v_1 = 40$  м/с, сталкивается с бруском массой  $M = 1$  кг, висящем на длинном шнуре. Определите, на какую высоту  $h$  поднимется брусок после удара, если: 1) шарик пробивает брусок и вылетает со скоростью  $v_2 = 20$  м/с. 2) удар шарика о брусок абсолютно упругий. 2 мм, 3,2 см.

4. Капля воды, имеющая радиус  $r$ , падает с высоты  $h$  и разбивается на  $N$  равных капель. Какое количество тепла выделится при этом?  $Q = mgh - N4\pi r^2$ .

$$N = \left( \frac{\rho g h r}{3\sigma} \right)^3.$$

#### Вопросы (блиц):

1. В стакан с горячим чаем окунули кусок сахара, при этом растворяющая сахар вода не обжигает руки. Почему?
2. Почему на поверхности керосина и многих других горючих жидкостей никогда не бывает пыли? Керосин очень хорошо смачивает практически все тела, поэтому пылинки, попав на его поверхность, сразу тонут, а не удерживаются силами поверхностного натяжения.
3. Почему волоски кисточки для рисования красками не слипаются в воде?
4. Почему сухая тряпка впитывает воду хуже, чем влажная? Смочить капилляры
5. Почему тряпка из шерсти впитывает воду хуже, чем тряпка из льна?
6. Одинаковы ли причины, когда губка или кусочек промокательной бумаги вбирают в себя влагу независимо от действия силы тяжести?
7. Жидкие лекарства часто отмеряют каплями. Будет ли это достаточно точной мерой?
8. Крупинки золота смачиваются ртутью, «прилипая» к ней. Почему? Где это явление можно использовать на практике? Какими способами можно после этого отделить ртуть от золота?
9. Почему слабый ветер поднимает тучи песка в пустыне, а сильнейший ураган на море вздымает гораздо меньше водяных брызг?
10. Почему когда две капли ртути сталкиваются, они не отскакивают, а сливаются в одну?
11. Поток воздуха из соломинки для коктейля, направленный на поверхность воды, создает в ней углубление. Как это объяснить?
12. Почему не следует держать рядом на лотке классной доски мел и влажную тряпку?
13. Почему происходит растекание чернил на плохой бумаге? Путём какой обработки бумага может быть сделана пригодной для письма чернилами?
14. Почему при слежавшемся плотном верхнем слое почва сильнее пересыхает в засуху, чем при разрыхлённом? Почему вспаханная земля сохнет медленнее, чем неспаханная?
15. Почему деревянные поверхности перед покрытием их масляной краской предварительно грунтуют олифой?
16. Почему капли воды, которые разлетаются при падении массивных тел в воду, приобретают сферическую форму?
17. Почему космонавты не могут плакать так, как мы на земле?
18. Почему так трудно разделить два стеклянных листа, смоченных водой?
19. Почему трудно разделить два смоченных водой листа бумаги?
20. Куда будет перемещаться вода в горизонтальном капилляре при его нагреве с одной стороны?
21. Почему пицца прилипает ко дну сковородок и пригорает?
22. Между двумя столбами натянута веревка. Как изменится прогиб веревки, если она намочит от дождя?
23. Почему испарение по краям лужицы на столе интенсивнее, чем в середине?
24. Если положить в воду кусок мела, то из него начинают выходить пузырьки воздуха. Почему?
25. Почему волейбольная сетка сильно натягивается после дождя?

26. Почему вода мокрая?

27. Почему улитка не падает, ползая по потолку?

### Разное

1. Водяной пар массой 3 г изотермически сжимают при температуре  $81^{\circ}\text{C}$ . Объем пара уменьшился в 3,5 раза, а давление возросло в 1,8 раза. Давление насыщенного водяного пара при  $81^{\circ}\text{C}$  равно  $0,5 \cdot 10^5$  Па. Пар считать идеальным газом.

1) Найти начальное давление пара.  $0,28 \cdot 10^5$  Па

2) Найти конечный объем пара. 5 л

2. При какой максимальной относительной влажности  $\varphi_0$  воздуха в комнате бутылка молока, вынутая из холодильника, не будет запотевать? Температура в холодильнике  $t_1 = +5^{\circ}\text{C}$ , а в комнате  $t_2 = +25^{\circ}\text{C}$ . Давление насыщенных паров воды при  $+5^{\circ}\text{C}$  равно  $p_1 = 866$  Па, а при  $+25^{\circ}\text{C}$  оно равно  $p_2 = 3192$  Па.  $\approx 29\%$ .

3. Мыльный пузырь надувают воздухом, температура которого выше комнатной температуры. При диаметре пузыря 0,3 мм он начинает всплывать. На сколько процентов температура воздуха в пузыре выше комнатной температуры? Атмосферное давление нормальное. Массой пленки пренебречь. 0,01

4. В горизонтальном цилиндрическом сосуде под поршнем при температуре  $T$  находится насыщенный пар. В изотермическом процессе сжатия пара было отведено количество теплоты  $Q$  и совершена работа  $A$ . Теплота парообразования  $\mu = \frac{QRT}{Ar}$  г. Определите молярную массу пара.

5. Влажный воздух находится в цилиндре под поршнем при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  и давлении  $1,2p_0$ . Если увеличить давление на поршень в 2 раза, то объем, занимаемый воздухом, уменьшится в 2,5 раза, а на стенках выпадет роса. Найти начальную относительную влажность воздуха в цилиндре. Объемом образовавшейся жидкости пренебречь. 64%

6. Благодаря наличию упругих свойств капля несжимаемой жидкости в невесомости может совершать пульсирующие колебания. От каких величин и как может зависеть период таких колебаний? Метод размерностей:  $T \sim \sqrt{\frac{\rho r^3}{\sigma}}$

7. Для изготовления ртутного барометра взяли стеклянную трубку внутренним диаметром  $d = 3$  мм. Какую поправку  $\Delta h$  нужно вносить в показания барометра, если учесть поверхностное натяжение ртути? Поверхностное натяжение ртути  $\sigma = 510$  мН/м, плотность ртути  $\rho = 13,6$  г/см<sup>3</sup>.  $\Delta h \approx 5$  мм.

### Олимпиада.

1. В кастрюле с кипящей водой у дна образуется пузырек пара радиуса  $R$ . Атмосферное давление равно  $p_0$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$ , плотность воды  $\rho$ , высота воды в сосуде  $H$ . Какое количество энергии пошло на образование пузырька?

Теплоту парообразования и плотность пара в таблице.  $W = mL + 4\pi R^2\alpha + (p_0 + \rho gH) \frac{4}{3} \pi R^3$ .

## Занятие 12. Механические свойства твердых тел.

### I. Вопросы (блиц):

1. На чем основано выведение жирных пятен с тканей горячим утюгом?

2. В закрытом откачанном сосуде находятся две капли одной и той же жидкости - большая и маленькая. Что будет происходить с каплями с течением времени? Как влияет кривизна поверхности жидкости на давление ее насыщенного пара? Давление насыщенного пара над вогнутой поверхностью жидкости меньше, а над выпуклой — больше, чем над плоской.
3. После того, как ученик ростом 150 см и массой 60 кг вышел из воды после купания, на его коже осталось около 200 г воды. Оцените, какой процент веса Дюймовочки ростом 2,5 см составит вода после купания. Поверхностная плотность воды на коже одинакова. 20%
4. Почему некоторые ткани после стирки "салятся"?
5. Почему нижнее отверстие пипетки должно быть малым?
6. Почему волоски кисточки для рисования красками слиплись и образовали заостренный кончик, после того как мы ее смочили водой?
7. Почему почву после дождя обязательно надо рыхлить?
8. Почему при сушке дров на солнце на конце полена, обращенного в тень, выступают капельки воды?
9. Откуда, собственно, берется пот?
10. Почему стог сена остается внутри сухим при дожде?
11. Каким образом полотенца отсасывают воду с вашего тела?
12. Почему намоченный узел на веревке развязать гораздо труднее, чем на сухой?

## II. Задачи (блиц):

1. Капля воды массой 0,1 г введена между двумя плоскими и параллельными между собой стеклянными пластинками, полностью смачиваемыми водой. Как велика сила притяжения между пластинами, если они находятся друг от друга на расстоянии  $10^{-3}$  см (насекомые, выделяя на лапках капельки жидкости, могут ходить по потолку)? 1460 Н
2. В городе площадью 400 км<sup>2</sup> за 10 мин во время ливневого дождя выпало 20 мм осадков. Подсчитать энергию и мощность тепловыделения от слияния капель во время дождя, если капли воды, достигшие земли, имели диаметр 3 мм, а образовались из мелких капель диаметром 3 мкм. 1,2 ТДж; 2,0 ГВт
3. Сферическая капля ртути радиусом R свободно падает с высоты H на стеклянную пластинку. Определите максимальное число одинаковых сферических капель, образованных при ударе о пластинку. Плотность ртути  $\rho$ , коэффициент поверхностного натяжения ртути  $\sigma$ . Теплоемкостью пластинки и окружающей среды пренебречь. 
$$N = \left( \frac{\rho g H R}{3\sigma} \right)^3$$

## III. Основные понятия:

**Деформация** – изменение взаимного положения множества частиц тела, приводящее к изменению его размеров и формы.

**Закон Гука:**  $F_{упр} = k \cdot \Delta l$ . В пределах малых деформаций сила упругости прямо пропорциональна абсолютному удлинению образца.

**Механическое напряжение ( $\sigma$ ):**  $\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$ . Зависимость коэффициента жесткости

от материала образца, его длины и площади поперечного сечения:  $k = E \cdot \frac{S}{l_0}$ .  $E$  –

модуль Юнга. Последовательное и параллельное соединение пружин.

**Закон Гука в дифференциальной форме:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ .**

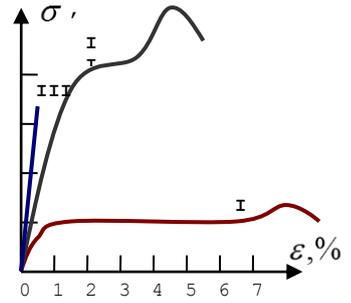
**Упругость** - свойство твердых тел восстанавливать свои размеры и форму после снятия нагрузки. Границы применимости закона Гука.

**Текущая деформация** ("память" металлов дает сбой).

**Пластичность** - свойство твердых тел сохранять часть деформации после снятия нагрузки, которая ее вызвала.

**Предел прочности.** Определение предела прочности меди по диаграмме.

**Прочность** - свойство твердых тел сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы. **Коэффициент запаса прочности:**  $n = \frac{\sigma_{np}}{\sigma}$ .



#### IV. Задачи (блиц):

1. Медная проволока длиной 80 см и сечением 8 мм<sup>2</sup> закреплена одним концом в подвесном устройстве, а к ее другому концу прикреплен груз массой 400 г. Вытянутую проволоку с грузом, отклонив до высоты подвеса, отпускают. Считая проволоку невесомой, определить ее удлинение в нижней точке траектории движения груза. Модуль Юнга для меди 118 ГПа. 10 мкм
2. Какую силу надо приложить к медной проволоке сечением  $S = 10 \text{ мм}^2$ , чтобы растянуть ее на столько же, на сколько она удлиняется при нагревании на  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ ? Коэффициент линейного расширения меди  $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , модуль Юнга меди  $E = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ . 336 Н
3. Оцените относительную деформацию  $\varepsilon$  импланта пяточной кости человека массой  $m = 70 \text{ кг}$ , когда он стоит на одной ноге, содержащей этот имплант. Модуль Юнга импланта  $E = 2 \text{ ГПа}$ , площадь его сечения  $S = 4,9 \text{ см}^2$ . Нагрузку считать приложенной только к импланту и распределённой равномерно.  $0,71 \cdot 10^{-3}$

#### V. Олимпиада.

1. Жёсткий титановый корпус подводной лодки имеет длину 150 м и диаметр 12 м. Толщина стенок корпуса порядка 10 см. Оцените изменение длины лодки при ее погружении на глубину 300 м. Модуль Юнга для титана 110 ГПа. 1,1 мм
2. Тонкостенный стеклянный сферический баллон массой  $M$  наполняется кислородом при температуре  $T$ . Какое количество кислорода можно закачать в баллон, если допустимое напряжение в стенках баллона равно  $\sigma$ ? Плотность стали равна  $\rho$ . На участке  $\Delta S$  сила давления  $F = 4T \sin(\alpha/2) = p\Delta S = p\Delta\ell \cdot \Delta x = p \left( \frac{T}{d\sigma} \right) \Delta\ell$ .

$$\sin \alpha \approx \alpha = \frac{\Delta\ell}{r} . V = \frac{4}{3} \pi r^3 . M = \rho 4\pi r^2 d . \text{ Решаем вместе последовательно. } m = \frac{2M\sigma\mu}{3\rho RT}$$

3. Чему будет равно удлинение пружины жесткостью  $k$  и массой  $M$ , если ее подвесить вертикально за один конец? Разобьем стержень на участки массой  $\Delta m$ , тогда удлинение первого 0, второго  $\frac{\Delta mg}{kN}$ ,  $N$ -го  $\frac{N\Delta mg}{kN}$ , дальше сумма прогрессии:  $\Delta\ell = \frac{Mg}{2k}$
4. Стальная балка, имеющая вид прямоугольного параллелепипеда, заделана между двумя вертикальными стенками при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Затем

температура поднимается до значения  $t$ . Какую силу давления со стороны балки должны выдерживать стены, чтобы они не разрушились? Зависит ли эта сила от длины балки?  $F = \frac{mE\alpha T}{\rho l}$

*Вопросы (блиц):*

1. Объясните пословицу: "Где тонко, там и рвется".
2. При смачивании кристалла каменной соли (NaCl) водой его прочность возрастает в сотни раз. Почему?
3. Полено легче разрубить вдоль волокон, чем поперёк их. Почему?
4. Для чего отбивают и точат косу? Металл становится прочнее, а лезвие тоньше.
5. Сталь значительно пластичней чугуна. Что даёт нам право сделать такой вывод?
6. Почему углерод встречается в природе чаще в виде графита, а не алмаза?
7. Зачем тупят гвоздь перед тем, как забить в доску? Тупой гвоздь просто рвет волокна, а не отслаивает их. Это предотвращает появление трещин.
8. Предположим, что все размеры стальной проволоки изменили в  $n$  раз. Во сколько раз изменится: а) объем? б) масса? в) площадь поверхности? г) коэффициент жесткости? д) разрывное напряжение?
9. Самурайский клинок катану зажимали в тисках, на некотором расстоянии располагали огнестрельное оружие, производили выстрел и клинок «разрезал» пулю пополам. Почему такое происходило?
10. Известно, что максимальная высота гор на Земле около 10 км. Какую максимальную высоту могли бы иметь горы на Марсе, если считать, что он сложен из тех же пород, что и Земли? 26 км
11. Резервуар для воды имеет прямоугольную форму и укреплен над поверхностью земли на четырех столбах диаметром 2 см каждый. Если изготовить резервуар в 10 раз длиннее, шире и выше, то каков должен быть диаметр столбов? 20 см
12. Великан и лилипут устроили соревнование: кто больше подтянется на перекладине. Кто выиграет и почему?
13. Модель крана поднимает 10 бетонных плит, а с 11 плитами трос рвется. Сколько плит поднимет реальный кран, если все линейные размеры модели (включая, разумеется, и размер плит) увеличить в 10 раз? 0,1
14. Два отрезка лески изготовлены из одинакового материала. При этом диаметр первой лески в два раза меньше, чем у второй, а длина – в два раза больше. Под весом прикрепленного к концу лески груза первая леска растянулась на 4 мм (что значительно меньше ее длины). Какой будет величина деформации второй лески, если на ней подвесить тот же груз? 0,5 мм
15. При быстром или при медленном охлаждении нагретой стали выделится большее количество теплоты? Почему?
16. Как можно повысить прочность металла?
17. Как влияет на прочность материала степень его чистоты?
18. Почему при заточке инструментов на наждачном круге необходимо охлаждать их водой?

19. Ледники текут, потому что лёд приобретает пластические свойства и текучесть. Как это объяснить?
20. Объясните пословицу: «Куй железо, пока горячо».
21. Приведите примеры веществ, способных менять форму и свойства под влиянием внешних факторов
22. Почему заклёпки всегда разрушаются в местах резкого изменения сечения при переходе от стержня к головке?
23. Великан и лилипут устроили соревнование: кто больше подтянется на перекладине. Кто выиграет и почему?
24. Известно, что средний рост человечества непрерывно возрастает. Не приведет ли это со временем к тому, что все средние размеры человека увеличатся вдвое? Возможно ли сохранение нынешних пропорций тела человека в будущем?
25. Галилею удалось понять, например, что прочность ног собак изменяется не в прямой пропорции с размерами собак. А как?

### Разное

1. Определить модуль Юнга алюминия, если груз массой  $m = 210$  кг, подвешенный к алюминиевому стержню поперечного сечения  $S = 150 \text{ мм}^2$ , даёт относительную деформацию  $\varepsilon = 0,020\%$ . Из двух металлов с модулями Юнга  $E_1$  и  $E_2$  изготовили два стержня с одинаковыми сечениями. Длина первого стержня вдвое больше длины второго стержня. Стержни сварили торцами, стык обработали, а затем покрасили так, что получившийся стержень выглядит как однородный. Инженер измеряет модуль Юнга стержня, нагружая его и измеряя удлинение. Какой модуль Юнга он измерит? Натяжение одинаково, удлинение равно сумме. 
$$E = \frac{2E_1E_2}{2E_2 + E_1}$$
2. Какую силу  $F$  нужно приложить к стальному стержню сечением  $S = 1 \text{ см}^2$ , чтобы растянуть его на столько же, на сколько он удлиняется при нагревании на  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ ?  $F = SE\alpha\Delta t \approx 247 \text{ Н}$
3. Медную и стальную проволоки одинакового сечения  $S = 3,0 \text{ мм}^2$  и длины  $\ell = 1,0$  м срастили концами. Каково будет общее удлинение составной проволоки, если к ней подвесить груз  $10$  кг? Рассмотреть случаи параллельного и последовательного соединения. При параллельном:  $0,11 \text{ мм}$
4. На какую высоту поднимется камень массой  $30$  г, выпущенный вертикально вверх из рогатки, резиновый жгут которой сечением  $0,2 \text{ см}^2$  и длиной  $30$  см был растянут на  $20$  см? Соппротивление воздуха не учитывать. Модуль Юнга для резины  $7,8 \text{ МПа}$ .  $17,3 \text{ м}$
5. Гранитная колонна построена из  $30$  цилиндрических блоков, установленных вертикально один на другой. Высота каждого блока в ненапряженном состоянии  $h_0 = 50$  см. Оценить относительную деформацию нижнего блока. Модуль Юнга на сжатие  $5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ .  $7,5 \cdot 10^{-4} \%$
6. Стальная балка наглухо закреплена между двумя стенами при  $0^\circ\text{C}$ . При повышении температуры, она производит на стены давление, равное  $40 \text{ МПа}$ . До какой температуры нагрелась балка?  $18 \text{ К}$
7. Легкая леска составлена из двух однородных участков одинаковой массы,

изготовленных из одинакового пластика. Длина одного участка в три раза больше, чем другого. Эту леску перекинули через идеальный блок и уравнили двумя грузами, массы которых очень сильно превосходят массу лески. В состоянии равновесия общее растяжение лески равно 1 мм. Каково растяжение каждого из участков? Считайте, что леска подчиняется закону Гука. У левой  $k_1 = (1/9)k_2$



### Олимпиада.

1. Стальной цилиндрический баллон для газа имеет диаметр 0,5 м. Какой должна быть толщина его стенок, если он предназначен для давлений до 150 атм?

### Занятие 13. Закон Кулона.

#### I. Вопросы (блиц):

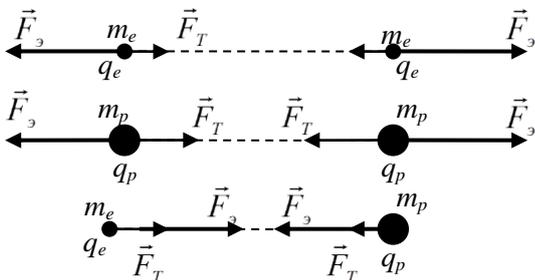
1. Предположим, что все размеры стальной проволоки возросли в 2 раза. Во сколько раз изменится: а) объем? б) масса? в) площадь поверхности? г) коэффициент жесткости? д) разрывное напряжение?
2. Стальной канат, могущий выдержать вес неподвижной кабины лифта, имеет диаметр 9 мм. Какой диаметр должен иметь канат, если кабина лифта может иметь ускорение до  $80 \text{ м/с}^2$ ? 12 мм
3. Почему рушатся при пожаре стальные конструкции, хотя сталь не горит и в огне пожара не плавится? Дислокации, уменьшается прочность стали.
4. Если капнуть на прочный кусок стекла каплю масла или воды, то стекло становится более хрупким и ломается легче (эффект Ребиндера). Почему?
5. Шнур диаметра 2 мм и длины 50 см удлинится на 0,5 см под действием приложенной силы, равной 500 Н. Чему равна жесткость такого подвеса? Чему равен модуль Юнга материала?
6. Почему толстый лед весной менее прочен, чем тонкий лед в начале зимы?
7. Почему по росе косить траву легче?
8. Сокращения мышц не только дают нам возможность двигаться, но и снабжают нас теплом. Почему?
9. Если сила трения скольжения не зависит от площади контакта, то зачем коньки делают тонкими?
10. Почему глобальное потепление приводит к уменьшению размеров многих растений и животных?
11. Почему для любого мелкого животного сила тяжести не представляет никакой опасности?

#### II. Задачи (блиц):

1. Стальная балка сечением  $S = 40 \text{ см}^2$  закреплена между двумя неподвижными упорами. С какой силой будет действовать балка на упоры, если она нагреется от температуры  $0^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ ? Температурный коэффициент линейного расширения стали  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ .  $F = 0,30 \text{ МН}$
2. Сечение бедренной кости человека напоминает пустотелый цилиндр с внешним радиусом 11 мм и внутренним 5 мм. Предел прочности костной ткани на сжатие 170 МПа. Какая сила, направленная вдоль кости, может её сломать? 51,28 кН

3. Стальная проволока диаметром 1 мм натянута в горизонтальном положении между двумя зажимами, находящимися на расстоянии 2 м друг от друга. К середине проволоки подвесили груз массой 0,25 кг. На сколько сантиметров опустится точка подвеса груза? 2,5 см

**III.** Электроны обладают массой и поэтому участвуют в гравитационном взаимодействии, но они обладают электрическим зарядом и поэтому участвуют в электромагнитном взаимодействии.



Электрический заряд всех электронов (одинаков и равен:  $q_e = -1$  эл. заряд =  $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Единица электрического заряда в СИ: **1 Кулон (Кл)** – электрический заряд, который проходит через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока в нем 1 А.

$$q_p = 1 \text{ эл. заряд} = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

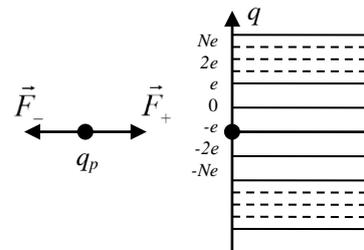
Воображаемое взаимодействие двух протонов.

Воображаемое взаимодействие электрона с протоном. Одноименно заряженные частицы отталкиваются, а разноименно заряженные частицы притягиваются друг к другу. Воображаемое взаимодействие двух нейтронов.

Нейтроны не обладают электрическим зарядом.

**Заряд тел.** Избыток или недостаток электронов в куске вещества. Если тело имеет избыток электронов, то оно заряжено отрицательно, а если недостаток, то положительно: ( $q = Ne$ ), где  $N$  – целое число.

**Электрический заряд (q):**  $q = I \cdot t$



**Закон сохранения электрического заряда. Основной закон электростатики – закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме.**

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

**IV. Задачи (блиц):**

1. Два точечных заряда находятся на расстоянии  $\ell$  друг от друга. Если расстояние между ними уменьшается на 0,5 м, то сила взаимодействия увеличивается вдвое. Найти расстояние  $\ell$ .

$$\ell = \frac{0,5\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1}$$

2. В одной из моделей иона  $H^{2+}$  электрон движется по круговой орбите, лежащей в плоскости, перпендикулярной к линии, соединяющей протоны. Скорость, с которой электрон движется по орбите, равна  $V$ . Найдите расстояние между протонами  $R$ .  $R = (ke^2/mV^2)(24/3 - 1) = 1,52 ke^2/mV^2$

3. Два точечных заряда находятся на фиксированном расстоянии друг от друга, а их суммарный заряд равен  $q$ . Чему должен быть равен каждый заряд, чтобы действующая между ними сила была максимальна?  $q/2$

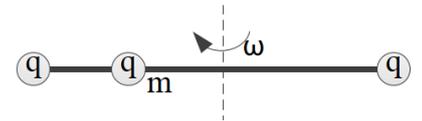
**V. Олимпиада.**

1. На гладком столе лежит кольцо радиусом  $R = 20$  см, изготовленное из тонкой проволоки. По кольцу равномерно распределен положительный заряд  $q = 50$  нКл. В центр кольца помещают шарик с одноименным зарядом  $Q = 1$  мКл. С какой силой  $T$  растягивается кольцо?  $2T \sin(\alpha/2) = kqQ\Delta\ell / (2\pi R^3)$ . Ответ: 1,79 Н

2. По гладкой горизонтальной направляющей длиной  $2\ell$  скользит бусинка массой  $m$  с положительным зарядом  $q_0$ . На концах направляющей закреплены одинаковые положительные заряды  $q$ . Найти период малых колебаний заряда  $q_0$ .

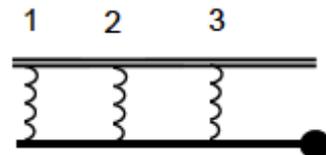
$$F = kqq_0\left(\frac{1}{(\ell+x)^2} - \frac{1}{(\ell-x)^2}\right) = kqq_0\left(\frac{4\ell x}{\ell^4}\right). \quad a_x = -kqq_0 4x/(m\ell^3).$$

3. Шарик массы  $m$  и зарядом  $q$  расположен на горизонтальном стержне длины  $L$  и может без трения скользить вдоль него. На концах стержня неподвижно закреплены заряды  $q$ . Стержень раскрутили с угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси, проходящей через центр стержня. На каком расстоянии от центра стержня расположится



подвижный шарик?  $x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \sqrt{\frac{2kq^2L}{m\omega^2}}}$

4. На конце лёгкого стержня, прикрепленного с помощью трёх одинаковых вертикальных невесомых пружин к горизонтальному потолку, находится груз массой  $m$ . Расстояние между пружинами и от крайней пружины до груза одинаковы. Деформации пружин очень малы по сравнению с их длиной, а деформации стержня и потолка много меньше деформаций пружин. Найти силы упругости пружин. 1 условие равновесия, 2 условие равновесия относительно левого конца, деформация 2 пружины  $x_2 = (x_1 + x_3)/2$ .  $F_1 = -2/3 mg$ ,  $F_2 = 1/3 mg$ ,  $F_3 = 4/3 mg$



**Вопросы (блиц):**

1. Два одинаковых металлических шарика заряжены так, что заряд одного из них в 5 раз больше заряда другого. Шарики привели в соприкосновение и раздвинули на прежнее расстояние. Во сколько раз изменилась по модулю кулоновская сила, если шарики были заряжены одноименно, разноименно?
2. Почему повышение среднемесячной температуры воздуха в тропиках, например всего на  $2^{\circ}\text{C}$  (с  $25$  до  $27^{\circ}\text{C}$ ), приводит к росту грозовой активности в 100 раз?
3. Во сколько раз отличаются силы кулоновского и гравитационного взаимодействия двух электронов в вакууме?
4. Сумма величин двух точечных зарядов равна  $10$  мкКл. Заряды оба положительные и находятся на неизменном расстоянии. При какой величине одного из этих зарядов сила взаимодействия между ними будет наибольшей? 5 мкКл
5. Как изменится сила электростатического взаимодействия между двумя точечными зарядами, если расстояние между ними уменьшить в 3 раза и один из зарядов увеличить в 3 раза?
6. Два точечных заряда взаимодействуют друг с другом с некоторой силой. Как изменится сила взаимодействия, если один из зарядов увеличить на 50%, а другой на 50% уменьшить?

**Разное**

1. Три одинаковых заряженных шарика массами  $m$  и зарядом  $q$  связаны в треугольник нитями длиной  $L$  и лежат на гладком столе. Одну из нитей

пережигают. Рассчитайте ускорение среднего шарика в начальный момент времени.  $a = \frac{\sqrt{3}q^2}{20\pi\epsilon_0 ml^2}$

2. Два маленьких, проводящих, одинаковых по размеру заряженных шарика, находящиеся на расстоянии 0,2 м друг от друга, притягиваются с силой  $F_1 = 4 \cdot 10^{-3}$  Н. Будучи приведены в соприкосновение, а затем разведены на прежнее расстояние, шарики стали отталкиваться с силой  $F_2 = 2,25 \cdot 10^{-3}$  Н. Определить первоначальные заряды шариков. Только обсудить. +0,27 мкКл. -0,12 мкКл.

**Олимпиада.**

## **Занятие 14. Напряженность электрического поля.**

### **I. Вопросы (блиц):**

1. Два металлических шарика с одноименными, но разными по величине зарядами привели в соприкосновение. При этом заряд одного из них увеличился на 60%, а заряд другого уменьшился на 40%. Найти отношение начальных зарядов шаров.  $q_2 = 1,5 q_1$
2. Предложите как можно больше способов, позволяющих очистить одежду от пыли.
3. Почему электризуются капли воды при её дроблении (водопады, душ)? Полярные молекулы. Двойной электрический слой, баллоэлектрический эффект.
4. Почему на такие предметы и материалы, как резина и ногти, сенсорные экраны не реагируют? Не проводят электричество, емкость мала.
5. Чтобы выполнялся закон Кулона, необходимо три условия. Какие?
6. Есть несколько одинаковых металлических шарика, один из которых имеет заряд 16 нКл. Как получить шарик с зарядом 5 нКл?
7. Три точечных заряда  $q$ ,  $-q$  и  $-q$  расположены вдоль одной прямой на одинаковом расстоянии друг от друга. На какой из зарядов действует большая сила? На первый
8. Положительно заряженную частицу подносят близко к одноименно заряженному закрепленному точечному заряду. Как зависит ускорение частицы от расстояния между зарядами?
9. Во сколько раз уменьшится сила кулоновского отталкивания двух маленьких бусинок с равными зарядами, если, не изменяя расстояния между ними, перенести две трети заряда с первой бусинки на вторую бусинку? 5/9
10. Как изменится период колебаний математического маятника, если в точку подвеса и на груз поместить одноименные заряды?

### **II. Задачи (блиц):**

1. С какой силой взаимодействовали бы две одинаковые капли воды на расстоянии 1 км, если бы удалось передать одной из капель 1% всех электронов, содержащихся в другой капле массой 0,03 г? 2,3 МН
2. Предположим, что в атоме водорода электрон с зарядом  $-e$  движется по круговой орбите вокруг протона с зарядом  $+e$ . Радиус орбиты  $0,53 \cdot 10^{-10}$  м. Определите скорость электрона и период его обращения.  $2,2 \cdot 10^6$  м/с.  $1,52 \cdot 10^{-16}$  с

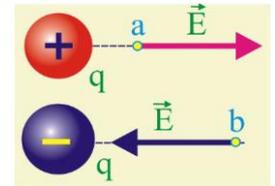
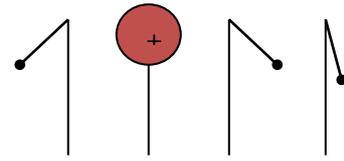
### **III. Два способа передачи действия на расстояние:**

1. Посредством переноса вещества.

2. Посредством изменения состояния промежуточной среды.

**Основные свойства электрического поля:**

- Создается электрическими зарядами.
- Действует на электрические заряды, помещенные в него, с некоторой силой (демонстрация). Электрическая сила ( $\vec{F}$ ).
- Поле неограниченно в пространстве, но убывает с расстоянием.
- Поле взаимно проникаемо (в одной и той же области пространства может находиться несколько полей).
- Электрическое поле материально.



**Измерение напряженности электрического поля:**  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$

**Напряженность электрического поля:**  $[E] = \left[ \frac{H}{Kл} \right] \cdot \boxed{\vec{F} = q\vec{E}}$

Поле задано, если известна напряженность в каждой его точке.

Формула напряженности поля точечного заряда:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

**Закон Гаусса:** Полный поток, проходящий через поверхность, пропорционален электрическому заряду, находящемуся внутри поверхности (на примере точечного заряда и плоскости):  $\Phi = \frac{q}{\epsilon_0}$

**IV. Задачи (блиц):**

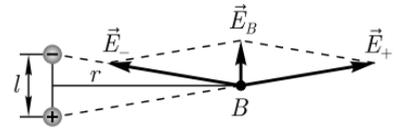
1. В точке А напряженность поля точечного заряда равна 36 В/м, а в точке В — 9 В/м. Определить напряженность поля в точке С, лежащей посередине между точками А и В. 16 В/м
2. Точечный заряд, расположенный на расстоянии 1 м от прямой, создает в ближайшей к нему точке прямой электрическое поле 10 В/м. Найти максимальное расстояние между точками на прямой, в которых заряд создает поля 8 В/м и 2 В/м, и угол между векторами напряженности электрического поля в этих точках. 2,5 м; 90°
3. В некоторый момент времени заряженная частица пролетает через начало координат, при этом ее скорость, равная  $3 \cdot 10^6$  м/с, составляет с осью х угол 35°. Какой должна быть напряженность однородного электрического поля, направленного по оси у, чтобы частица пересекла вторично ось х на расстоянии 1,5 см от начала координат, если частица а) электрон; б) протон. а)  $3,21 \cdot 10^3$  Н/Кл; б)  $5,88 \cdot 10^6$  Н/Кл.

**Олимпиада.**

1. По кольцу радиуса R равномерно распределен электрический заряд Q. Вдоль оси, проходящей через центр кольца перпендикулярно его плоскости, может двигаться точечный заряд -q. При каком положении заряда на него действует максимальная сила? Напряженность на расстоянии от центра кольца:  $E = k \frac{Qh}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$ .
2. Тонкий длинный стержень равномерно заряжен с линейной плотностью τ заряда, равной 10 мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии a = 20 см от его конца находится точечный заряд Q = 10 нКл. Определить силу F взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда. 4,5 мН

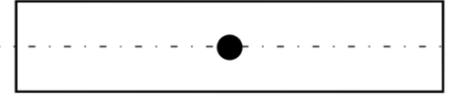
3. Определите напряженность  $E$  электростатического поля в точке  $B$  на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины.

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}$$



4. На боковой поверхности

трубы равномерно распределен положительный заряд с поверхностной плотностью  $\sigma$ . По оси трубы может двигаться шарик массы  $m$ , несущий отрицательный заряд  $-q$ . Найдите период малых колебаний шарика в середине трубы. Длина трубы  $\ell$  намного больше ее диаметра  $d$ . При смещении шарика на  $x$  из равновесия с одной стороны суммарный заряд становится больше, чем с другой его стороны на  $\sigma 2\pi R 2x$ . Это приводит к появлению на расстоянии  $\ell/2$  от этого конца равнодействующей возвращающей кулоновской силы и к колебаниям заряда.



*Вопросы (блиц):*

1. Как можно обнаружить электрическое поле?
2. Напряженность электрического поля точечного заряда на расстоянии  $r$  от него  $400 \text{ В/м}$ . Определите напряженность поля на расстоянии в два раза большем от заряда.
3. Нарисовать картину силовых линий поля между двумя точечными зарядами  $+2q$  и  $-q$ .
4. В каком случае напряженность электрического поля в какой-либо точке и сила, действующая на точечный заряд в той же точке, будут направлены в противоположные стороны?
5. Зависимость массы неоднородного стержня от его длины  $m(\ell) = k\ell^2$ , где  $k = 3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Чему равна линейная плотность стержня в точке  $\ell = 2 \text{ м}$ , меньшей полной его длины  $L$ ?
6. Будет ли устойчивым равновесие точечного заряда, находящегося посередине между двумя одинаковыми точечными зарядами?
7. Вокруг Сатурна множество колец. Они состоят из замерзших частиц льда и пыли разного размера, причём расстояние между камушками очень мало. Однако материал колец Сатурна не слипается в крупные комки. Почему? Найдите все возможные причины.
8. Человек дотрагивается до головки заряженного электроскопа, стоящего на изолирующей подставке. При этом листочки электроскопа опадают. Объясните, почему вновь разошлись листочки, когда человек убрал руку? Корпус заряжен
9. Два одинаковых по величине точечных заряда находятся на некотором расстоянии друг от друга. В каком случае напряженность электрического поля в точке, лежащей посередине между ними, больше: если эти заряды разноименные или одноименные?
10. В чем заключается различие между полем и веществом?
11. Как изменится напряженность электрического поля в данной точке, если увеличить пробный заряд вдвое?
12. Объясните, почему диполь втягивается в область, где напряженность электрического поля больше.
13. Что первично: электрическое поле или напряженность электрического поля?

## Разное

1. Нить в форме полукольца радиусом  $R = 10$  см равномерно заряжена с линейной плотностью заряда  $\tau = 0,2$  мкКл/м. Определить напряженность электрического поля, созданного нитью, в центре окружности, частью которой является нить. 36 кН/Кл
2. «Опыт Милликена». Внутри плоского незаряженного конденсатора, пластины которого расположены горизонтально на расстоянии  $d = 2$  см, падает положительно заряженная пылинка. Вследствие сопротивления воздуха пылинка движется равномерно, проходя некоторый путь за время  $t_1 = 10$  с. Когда между пластинами конденсатора создали электрическое поле  $E = 49$  кН/Кл, пылинка начала равномерно двигаться вверх, пройдя тот же путь за время  $t_2 = 5$  с. Определить отношение заряда пылинки к ее массе.  $6 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг
3. Кольцо из тонкой проволоки разрывается, если его зарядить зарядом  $Q$ . Диаметры кольца и проволоки увеличили в  $n$  раз. Определите заряд  $Q'$ , при котором разорвется новое кольцо. 
$$F = k \frac{E}{R^2} \lambda \Delta l = \alpha \frac{Q^2}{R^3} \Delta l = T \frac{\Delta l}{R} \rightarrow T = \alpha \frac{Q^2}{R^2}.$$
 Напряженность в разрезе пропорциональна  $Q$ . Ответ:  $Q' = n^2 Q$
4. Заряды по  $0,1$  мкКл расположены на расстоянии  $6$  см друг от друга. Найти напряженность электростатического поля в точке, удаленной на  $5$  см от каждого из зарядов. Решить задачу для случая, когда один заряд положительный, а другой отрицательный. 432 кВ/м
5. Заряд  $q$  равномерно распределен по объему шара радиуса  $R$  из непроводящего материала. Найти напряженность поля на расстоянии  $r$  от центра; построить график зависимости  $E$  от  $r$ .

## Олимпиада.

1. Электрическое поле создано бесконечной плоскостью, заряженной с поверхностной плотностью  $400$  нКл/м<sup>2</sup>, и бесконечной прямой нитью, заряженной с линейной плотностью  $100$  нКл/м. На расстоянии  $10$  см от нити находится точечный заряд  $10$  нКл. Определить силу, действующую на заряд, ее направление, если заряд и нить лежат в одной плоскости, параллельной заряженной плоскости.
2. Дуга, центральный угол которой  $\alpha = 30^\circ$ , вырезана из окружности радиусом  $R = 50$  см. По дуге равномерно распределён заряд  $q = 2$  мкКл. Определите напряжённость  $E$  электрического поля в центре кривизны этой дуги. 71 кВ/м.
3. Поверхность нагретой отрицательно заряженной нити электрон покидает со скоростью  $20$  м/с. Какую скорость он будет иметь на расстоянии  $R = 2$  см от ее центра? Линейная плотность заряда нити  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл/м, радиус нити  $0,5$  мм.

## Занятие 15. Проводники в электростатическом поле.

### I. Вопросы (блиц):

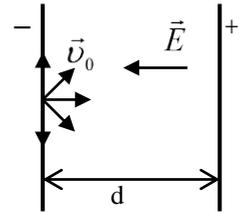
1. Чему равна напряженность поля в центре равномерно заряженного проволочного кольца, имеющего форму окружности?
2. На пробный заряд  $5$  нКл действует сила  $2 \cdot 10^{-4}$  Н. Какова напряженность электрического поля в точке, где находится заряд? 40 кН/Кл
3. Будет ли устойчивым равновесие точечного заряда, находящегося посередине

между двумя одинаковыми точечными зарядами?

4. Как расположить три точечных электрических заряда, чтобы они оставались неподвижными? Заряд одного из них в 4 раза больше любого, из двух других.
5. Электрическое поле – ветер, электрон – парусная лодка. В чем недостаток такой аналогии?
6. Каков характер движения заряженной пылинки в поле точечного заряда при условии отсутствия трения? Весом пылинки пренебречь.
7. Объясните, почему силовые линии электрического поля не пересекаются?
8. Правильно ли утверждение, что силовая линия электрического поля – это траектория движения положительного заряда в этом поле?

**II. Задачи (блиц):**

1. Из точки одной пластины вылетают во всех направлениях электроны с одинаковыми по величине начальными скоростями  $v_0$ . Они разгоняются электрическим полем  $E$  в зазоре ширины  $d$  до второй пластины. Найдите на ней радиус круга  $R$ , в который попадают электроны. Заряд электрона -  $e$ , его масса  $m$ .



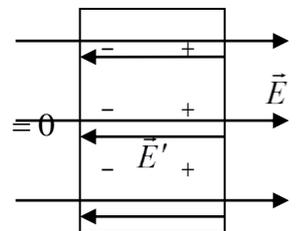
$$E = \frac{mv_0}{eE} \left( \sqrt{v_0^2 + 2 \frac{eEd}{m}} - v_0 \right)$$

2. Протон и  $\alpha$ -частица, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в плоский конденсатор параллельно пластинам и вылетают из него. Во сколько раз отклонение протона от первоначального направления на выходе из конденсатора будет больше отклонения  $\alpha$ -частицы? 2

**III. Металлический пар не проводит электрический ток! Объединение нейтральных атомов металла в кусок. Дополнительное взаимодействие атомов металла в конденсированном состоянии и образование свободных электронов. Электронный газ:**

$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$ . Почему электронный газ не вылетает из металла наружу?

Почему внешнее электростатическое поле не проникает внутрь проводника (объяснение по рисунку на доске)?  $\vec{E} + \vec{E}' = 0$



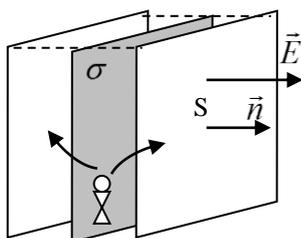
**Электростатическое поле внутри уединенного проводника равно нулю!**

С какой целью клетка Фарадея используется в магнитно-резонансном томографе? А почему внутри проводника с током электрическое поле не равно нулю?

**Электростатическая индукция** – наведение электрических зарядов в проводнике, помещенном в электростатическое поле.

Электрическое поле внутри заряженного проводящего шара, на некотором расстоянии от его поверхности, на поверхности шара:  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ . Электрическое поле

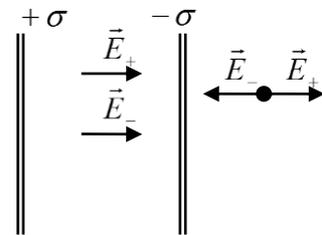
на поверхности и внутри тонкой **проводящей пластины**. Однородное электрическое поле бесконечной **равномерно заряженной плоскости**.



$$2 \cdot ES = \frac{q}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

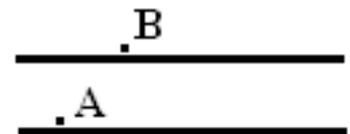
**Поле двух плоскостей** с равной поверхностной плотностью заряда, но с зарядами противоположного знака. Как направлено поле? Чему равна напряженность поля

между пластинами  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$  и за пределами пластин 0. Как быть, если заряд распределен в пространстве произвольно? Метод зеркальных изображений.



#### IV. Задачи (блиц):

1. Заряд равномерно заряженной металлической пластины  $q = 10^{-7}$  Кл. Пластина находится в однородном электрическом поле напряженностью  $E = 3 \cdot 10^4$  В/м, которое перпендикулярно пластине. Определите силу, действующую на пластину, и результирующую напряженность поля с обеих сторон пластины. Площадь пластины  $S = 1 \text{ м}^2$ . 3 мН.  $3,56 \cdot 10^4$  В/м.  $2,44 \cdot 10^4$  В/м
2. Расстояние между пластинами плоского конденсатора  $d = 4$  см. Электрон начинает двигаться от отрицательно заряженной пластины в тот момент, когда от положительно заряженной пластины начинает двигаться протон. На каком расстоянии  $l$  от положительной пластины встретятся электрон и протон? 22 мкм
3. Полусфера радиусом  $R$  равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$ . Найти модуль напряженности электрического поля  $E$  в центре полусферы.  $E = \sigma/(4\epsilon_0)$
4. Бесконечно длинная тонкостенная металлическая труба радиусом 2 см равномерно заряжена с поверхностной плотностью  $1 \text{ нКл/м}^2$ . Определить напряженность поля в точках, отстоящих от оси трубы на расстояниях 1 см и 3 см.  $E_1 = 0$ ,  $E_2 = 151$  В/м.
5. Равномерно заряженные пластины находятся на небольшом расстоянии друг от друга. Найти плотность заряда на каждой пластине, зная, что  $E_A = 3000$  В/м и  $E_B = 1000$  В/м. Точки А и В лежат вблизи пластин.  $\sigma_1 = 3,6 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>;  $\sigma_2 = -1,8 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>

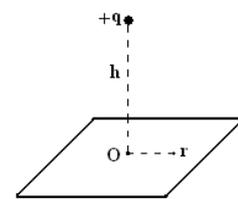


#### V. Олимпиада.

1. Две металлические пластинки расположены параллельно на близком расстоянии друг от друга. Первой пластинке сообщили заряд 2 мКл, а второй — заряд 4 мКл. Определить заряды на сторонах первой и второй пластинки. Внутри пластинок поле равно нулю. Так? У первой 3 и -1, у второй 1 и 3.
2. Сферическая оболочка радиуса  $R$  заряжена равномерно зарядом  $Q$ . Найти растягивающую силу, приходящуюся на единицу площади оболочки.  $f = \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0} = \frac{Q^2}{32\pi^2\epsilon_0 R^4}$

Давление внутри протона достигает значений порядка  $10^{35}$  Па, что превышает давление внутри самого плотного объекта во Вселенной - нейтронной звезды!

3. На высоте  $h$  над бесконечной проводящей плоскостью находится точечный заряд  $+q$ . Найдите поверхностную плотность заряда, индуцированного на плоскости, в зависимости от расстояния до основания перпендикуляра, опущенного на плоскость из точки нахождения заряда.



$$\sigma(r) = \frac{q}{2\pi} \frac{h}{\sqrt{(r^2 + h^2)^3}}$$

#### Вопросы (блиц):

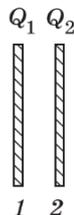
1. Всегда ли поверхностная плотность заряда у поверхности проводящего шара во всех точках одинакова?
2. Почему сближаются листочки заряженного электроскопа, если к его шарiku поднести руку?

3. На расстоянии  $d$  от большой проводящей плоскости находится точечный заряд  $q$ . С какой силой на него действует пластина?
4. Заряженный проводник, взятый в виде листа, свернули в цилиндр. Изменилась ли напряженность электрического поля у поверхности проводника?
5. Как известно, заряженный шарик притягивает бумажку. Как изменится сила притяжения, если окружить металлической сферой заряженный шарик; бумажку?
6. На столе, на изоляторе, стоит заряженный электромметр. Чтобы разрядить прибор, ученик коснулся рукой его шарика и увидел, что стрелка отклонилась на больший угол, вместо того, чтобы приблизиться к стрелке. Объясните явление.
7. Известно, что внесение незаряженного проводника в электростатическое поле, искажает его. Объясните явление.
8. Как изменится напряженность электростатического поля внутри заряженного проводника, если его поместить во внешнее электростатическое поле?
9. Напряженность электрического поля у поверхности Земли около  $100 \text{ Н/Кл}$ . Какому суммарному заряду планеты это соответствует?

### Разное

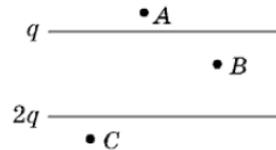
1. Точечный заряд  $q = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  находится на расстоянии  $a = 3 \text{ см}$  от металлической стенки, соединенной с землей. Найти: 1) Напряженность поля непосредственно у поверхности стенки в точке, ближайшей к заряду  $q$ ; 2)  $E = \frac{qa}{2\pi\epsilon_0 r^3}$  в точке, находящейся на расстоянии  $r = 5 \text{ см}$  от заряда  $q$ .
2. Бесконечная плоскость, расположенная горизонтально, заряжена с поверхностной плотностью  $\sigma = 9,0 \text{ мкКл/м}^2$ . Сплошной алюминиевый шарик радиусом  $R$  с зарядом  $q = 0,40 \text{ мкКл}$  помещают над плоскостью, не касаясь ее. Каким может быть значение  $R$ , чтобы шарик не падал?  $1,3 \text{ см}$
3. Металлическим пластинам 1 и 2 сообщили положительные заряды  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$  и  $Q_2 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$  соответственно. Какие заряды  $Q_1', Q_1'', Q_2', Q_2''$  расположатся на боковых сторонах пластин?

Отв.  $Q_1'' = -Q_2' = \frac{Q_1 - Q_2}{2} = -10^{-6} \text{ Кл}$ ,  $Q_1' = Q_2'' = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ .



### Олимпиада.

1. Две тонкие металлические пластины, имеющие заряды  $q$  и  $2q$ , расположены параллельно друг другу. Сила взаимодействия пластин друг с другом равна  $F$ . Найдите напряженность электрического поля в точках А, В и С. Поле, создаваемое каждой из пластин, считать однородным.  $E_A = 3F/2q$ ,  $E_B = F/2q$ ,  $E_C = 3F/2q$ .
2. Какой заряд нужно сообщить мыльному пузырю, чтобы его радиус увеличился вдвое? Температуру считать неизменной.  $q^2 = \frac{16\pi R^3}{k} (12\sigma R + 7p_0 R)$



### Занятие 16. Диэлектрики в электростатическом поле.

#### I. Вопросы (блиц):

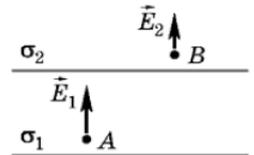
1. Два заряженных металлических шара одинакового диаметра приводят в

соприкосновение. Один из шаров полый. Поровну ли распределятся заряды на шарах?

2. Два одноименно заряженных металлических шара на некотором небольшом расстоянии друг от друга взаимодействуют с меньшей силой, чем если бы они были заряжены разноименно. Нет ли здесь противоречия с законом Кулона?
3. Внутри металлической незаряженной сферы находится точечный заряд  $q$ , смещенный от центра сферы. Как будет выглядеть картина силовых линий электрического поля внутри и вне сферы?
4. Два бесконечных длинных параллельных стержня, находящиеся на расстоянии 2 м в вакууме, заряжены равномерно с линейной плотностью 15 нКл/м. Определить силу, действующую на единицу длины стержня.
5. Человек, стоя на изолирующей подставке, прикасается к заряженному изолированному проводнику. Полностью ли разрядится при этом проводник?
6. Одной из характеристик писчей бумаги является ее плотность  $\sigma$ , для измерения которой используют внесистемную единицу  $г/м^2$ . Какое давление оказывает на стол лист бумаги плотностью  $\sigma$ ?
7. Как защитить работников лаборатории, в которой экспериментируют с большими электростатическими зарядами, от действия электрического поля этих зарядов?

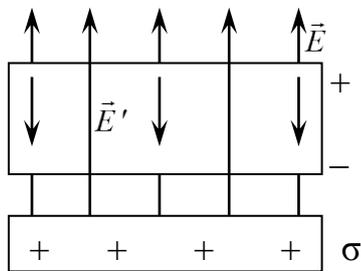
## II. Задачи (блиц):

1. Тонкий длинный стержень равномерно заряжен с линейной плотностью 10 мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии 20 см от его конца находится точечный заряд, равный 10 нКл. Определить силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда. 4,5 мН
2. Оцените среднюю плотность электрических зарядов в земной атмосфере, если известно, что напряженность электрического поля на поверхности Земли равна 100 В/м, а на высоте 1,5 км – 25 В/м.  $\rho = -4,4 \cdot 10^{-13}$  Кл/м<sup>3</sup>
3. Равномерно заряженные тонкие бесконечно большие пластины находятся на небольшом расстоянии друг от друга. Найдите поверхностные плотности их зарядов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , если напряженность поля в точке А равна  $E_1 = 3000$  В/м, а в точке В равна  $E_2 = 1000$  В/м. 35,4 мКл/м<sup>2</sup>. -17,7 мКл/м<sup>2</sup>.



## III. Диэлектрики – вещества, плохо проводящие электрический ток.

Примеры диэлектриков: дистиллированная вода, инертные газы, слюда, парафин, бумага. Познакомимся с некоторыми из электрических свойств диэлектриков. Опыты с электрометром (ослабление внешнего поля диэлектриком). Объяснение по рисунку:



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}; E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}; E_{\text{д}} = E - E'. \quad \vec{E}_{\text{д}} = \frac{\vec{E}}{\epsilon}$$

### Электростатическое поле внутри диэлектрика

(термин введен Фарадеем для обозначения веществ, в которые проникает электрическое поле). **Диэлектрическая проницаемость среды** (реакция на электрическое поле). Примеры:  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 81$ ,  $\epsilon_{\text{кер}} = 2$ . Частичная поляризация

диэлектрика. Можно ли, как в опыте с проводниками, "снять" электрический заряд с поверхности диэлектрика, прикоснувшись к нему рукой?

**Диэлектрики во внешнем электростатическом поле** (демонстрация модели электрического диполя). Силы, действующие на диполь в однородном электрическом поле:  $M = qEl \sin \alpha$ .

**Поляризация диэлектриков.** Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появления под воздействием внешнего электрического поля ориентированных по полю диполей.

**IV. Задачи (блиц):**

1. В однородное электростатическое поле напряженностью  $E = 700$  В/м перпендикулярно полю поместили стеклянную пластинку ( $\epsilon = 7$ ). Найти напряженность поля в пластинке, а также плотность связанных зарядов, возникающих на поверхностях пластинки. 100 В/м, 5,31 нКл/м<sup>2</sup>
2. Металлический шар диаметром 4 см погружен в парафин. Поверхностная плотность заряда на шаре  $0,8 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>. Какова напряженность поля в парафине на расстоянии 20 см от поверхности шара? 25120 Н/Кл
3. Сферический слой, ограниченный радиусами  $R_1 = 3$  см и  $R_2 = 5$  см, равномерно заряжен зарядом плотностью  $\rho = 3$  мкКл/м<sup>3</sup>. Диэлектрическая проницаемость слоя  $\epsilon_1 = 5$ , а окружающей среды  $\epsilon_2 = 2,5$ . Найти напряженность электрического поля: а) в центре слоя; б) между поверхностями на расстоянии  $r_1 = 4$  см от центра; в) на расстоянии  $r = 4$  см от наружной поверхности шарового слоя. 0; 0,523 кН/Кл; 0,396 кН/Кл

**V. Олимпиада.**

1. Определить радиус равномерно заряженного по объёму диэлектрического шара ( $\epsilon = 2$ ), если на расстояниях 2,5 см и 10 см от центра шара напряжённости электрического поля одинаковы. 5 см
2. Алюминиевый шарик массой  $m = 5,4$  г и плотностью  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, несущий заряд  $q = 0,1$  мкКл помещён в стеклянный сосуд с керосином, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon = 2$  и плотностью  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>. Определить значение внешнего вертикального электрического поля, при котором шарик будет оставаться в покое.  $7,6 \cdot 10^5$  Н/Кл
3. Между пластинами плоского конденсатора вложена тонкая пластинка из диэлектрика ( $\epsilon = 6$ ). Какое давление испытывает эта пластинка, если напряженность электрического поля  $E = 1$  МВ/м? Ответ:  $p = 7,4$  Па

**Вопросы (блиц):**

1. Почему крупинки манки (диэлектрические стрелки) ориентируются вдоль силовых линий электрического поля?
2. Опишите качественно, каким образом благодаря индукции заряженный надувной шар удерживается на электрически нейтральной стене.
3. Какой должна быть структура молекулы двуокиси углерода, если известно, что она является неполярной?
4. Чем объяснить, что легкий бузиновый шарик, вначале приставший к наэлектризованной палочке, затем отталкивается от нее?
5. Наэлектризованный металлический шарик опустили на дно сухой стеклянной пробирки и поднесли ее к электроскопу. Разойдутся ли листочки

электроскопа?

6. В результате пробоя твердого диэлектрика он оказывается непригодным к дальнейшему применению, а жидкие и газообразные диэлектрики могут подвергаться многократному испытанию на прочность. Почему?
7. Можно ли с помощью электризации через влияние получить два куска диэлектрика, наэлектризованных разноименно, если диэлектрик разрезать пополам?
8. Как ведет себя электрический диполь в неоднородном электрическом поле или почему заряженное тело притягивает мелкие кусочки бумаги?
9. Как изменится сила, действующая на разноименные заряды, если между ними поместить незаряженный 1) проводящий шар; 2) шар из диэлектрика?
10. Чем объяснить удаление пыли из воздуха с помощью постоянного электрического поля?
11. Одним из основных недостатков люстры Чижевского заключается в собирании большого количества пыли (копоту) на потолке и стенах вблизи люстры. Почему это происходит?
12. Когда обкладки плоского конденсатора не параллельны друг другу, то диэлектрик между ними будет перемещаться, если конденсатор зарядить? В какую сторону?
13. Как зависит диэлектрическая проницаемость газа от его давления?
14. Как именно происходит разделение электрических зарядов в грозовой туче?

**Олимпиада.**

**I. Вопросы (блиц):**

1. Чем объясняется уменьшение напряженности электрического поля в диэлектрике (проводнике)?
2. При каком угле между вектором дипольного момента (направлен от  $-$  к  $+$ ) и направлением однородного электрического поля потенциальная энергия диполя максимальна?  $\pi$
3. Почему заряженное тело притягивает мелкие кусочки бумаги?
4. Положительный и отрицательный точечные заряды притягиваются друг к другу с силой  $F$ . Уменьшится ли эта сила, если поместить между зарядами стеклянный шар?
5. Наэлектризованный металлический шарик опустили на дно сухой стеклянной пробирки и поднесли ее к электроскопу. Разойдутся ли листочки электроскопа?
6. Напишите выражение для момента пары сил, действующих на диполь в однородном поле.
7. Как именно происходит разделение электрических зарядов в грозовой туче?
8. Почему электроны в изоляторах не могут легко перемещаться?
9. На что расходует энергию движущаяся в диэлектрической среде заряженная частица (аналогия с шариком, который катится по резиновой пленке)?

**II. Задачи (блиц):**

1. Заряженный проводник окружен однородным диэлектриком. В некоторой точке их границы раздела поверхностные плотности  $\sigma$  стороннего и связанного  $\sigma'$  зарядов равны соответственно  $\sigma = 1,00 \text{ мкКл/м}^2$  и  $\sigma' = -0,80 \text{ мкКл/м}^2$ . Чему равна

диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  диэлектрика? 5

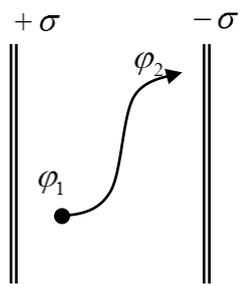
2. Определить диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла, если два одинаковых электрических заряда в вакууме взаимодействуют на расстоянии 0,2 м с той же силой, что и в масле на расстоянии 0,14 м. 2

**III.** Понятие потенциального поля на примере гравитационного поля.

**Гравитационное поле – потенциально, а сила тяжести - консервативная сила:**

$A' = E_{П_1} - E_{П_2}$ . **Электростатическое поле.** Положительно заряженное тело в однородном электростатическом поле у положительно заряженной обкладки. Работа электростатического поля при перемещении заряженного тела (аналогия с гравитационным полем):  $A' = qE(d_1 - d_2)$ . Работа не зависит от вида траектории, а по замкнутому пути равна нулю. **Электростатическое поле потенциально, а электрическая сила – консервативная сила.** Тогда  $A' = E_{П_1} - E_{П_2}$ .

**Потенциал ( $\phi$ )** – измеряется отношением потенциальной энергии взаимодействия пробного заряда с полем к величине этого заряда (измеряется отношением работы, совершаемой внешними силами по переносу пробного заряда из бесконечности в данную точку поля, к величине этого заряда).  $\phi = W/q$ .



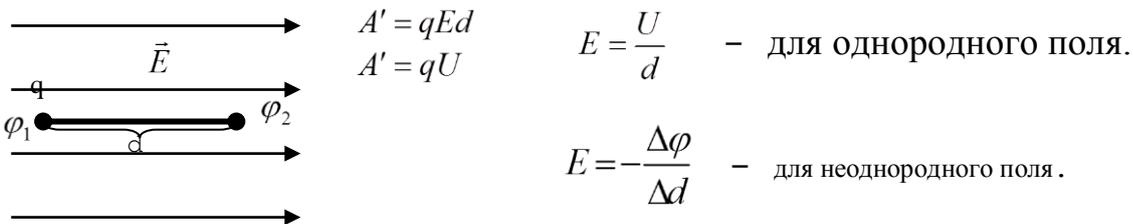
**Поле задано, если известен потенциал каждой его точки!**

**Работа электростатического поля** при перемещении заряженного тела:  $W_1 = q\phi_1$ ,  $W_2 = q\phi_2$ .  $A' = W_1 - W_2 = q(\phi_1 - \phi_2) = qU$

Работа электрического поля показывает, какую энергию передает электрическое поле зарядам, перемещая их из одной точки в другую.

Энергию можно **запасать**, перемещая заряд против действия электрической силы. Работа внешних сил при перемещении заряженного тела в электростатическом поле:  $A = q \cdot \Delta\phi$ . Связь между разностью потенциалов и напряжением:  $U = -\Delta\phi$ .

$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$  – потенциал поля точечного заряда.



**Потенциальная энергия** взаимодействия двух точечных электрических зарядов:

$E_{П} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ . **Энергия уединенного проводника:**  $E_3 = \frac{1}{2} q\phi$ . Энергия уединенного

проводящего шара (равномерно заряженной сферы):  $E_3 = \frac{1}{2} k \frac{q^2}{R}$ .

**IV. Задачи (блиц):**

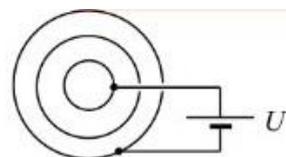
1. Приводной ремень генератора Ван-де-Граафа обладает электрическим зарядом с поверхностной плотностью  $\sigma = 5$  мКл/м<sup>2</sup>. Ремень шириной  $d = 0,5$  м движется со скоростью  $v = 20$  м/с. Какой ток  $I$  соответствует такому движению ремня? 0,05 А. Если заряд переносится между точками с разностью потенциалов 100 кВ,

то какой должна быть мощность мотора  $N$ , способного приводить в движение ремень?  $N > 5$  кВт.

- Тонкий диск радиусом  $R$  равномерно заряжен зарядом  $q$ . Найдите, во сколько раз уменьшится потенциал в центре диска, если из него изъять среднюю часть радиусом  $R/2$ . Ответ:  $\varphi_2 = 0,75 \varphi_1$
- Точечный положительный заряд  $q = 10$  мкКл закреплен на высоте  $h = 5$  м над землей. На одной вертикали с ним на земле находится шарик массой  $m = 9$  г с отрицательным зарядом  $Q = -4$  мкКл. Какую минимальную скорость  $v_{\min}$  надо сообщить шарика, чтобы он долетел до заряда наверху? Ответ: 6 м/с.

#### V. Олимпиада.

- Тонкое кольцо радиусом 10 см равномерно заряжено зарядом 10 нКл. Найдите потенциал на оси кольца в той точке, где напряженность электрического поля максимальна. Потенциал в бесконечности примите равным нулю. 735 В
- Имеются три концентрические металлические сферы с радиусами  $R$ ,  $2R$  и  $3R$ . Среднюю сферу заряжают некоторым зарядом  $Q$  ( $Q > 0$ ), а к внутренней и внешней сферам подключают источник электрического напряжения  $U$ . При каком заряде  $Q$  внутренняя и внешняя сферы останутся незаряженными?  $Q = 6UR/k$

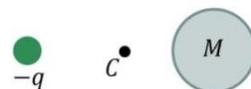


- Две одинаковые заряженные частицы поместили на расстоянии  $\ell$  друг от друга и отпустили. Через время  $t_0$  расстояние между ними удвоилось. Эти же заряды поместили на расстоянии  $3\ell$  и отпустили. Через какое время расстояние между зарядами удвоится? Время через среднюю скорость:  
 $t = t_0 \cdot 3\sqrt{3}$

- Вблизи высоковольтного провода, упавшего на землю, потенциал поля изменяется по закону  $\varphi = \frac{10}{1 + Ar}$ , где  $\varphi$  — потенциал, кВ;  $A = 0,90$  м<sup>-1</sup>;  $r$  — расстояние от провода, м. Построить график функции  $\varphi(r)$  и определить ближайшее к проводу безопасное положение человека, идущего по направлению к проводу. Длина шага человека 0,50 м, сопротивление между подошвами ног 500 кОм, допускаемая сила тока 1,0 мА. 2,2 м. Производная:  
$$\frac{d\varphi}{dr} = -\frac{10A}{(1 + Ar)^2} = -\frac{IR}{\ell} = -1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

#### Вопросы (блиц):

- Два шара, большой и маленький, равномерно заряжены с одинаковой поверхностной плотностью. Будут ли одинаковы потенциалы этих шаров?
- Полый шар равномерно заряжен электричеством. В центре шара потенциал равен 100 В, а на расстоянии 30 см от центра шара потенциал равен 50 В. Каков радиус шара? 15 см
- Как изменятся напряженность и потенциал поля точечного отрицательного заряда в точке С, если справа от этой точки расположить незаряженную металлическую сферу? Возрастет. Не изменится.
- Если известно, что напряженность электрического поля в какой-то точке равна нулю, значит ли это, что и потенциал в этой точке равен нулю?
- Всегда ли между проводником, заряженным положительно, и проводником,



заряженным отрицательно, имеется разность потенциалов? Нет. Если, например, они находятся на одинаковом расстоянии от точечного заряда.

6. Тонкий диск радиусом  $R$  равномерно заряжен зарядом  $q$ . Найдите, во сколько раз уменьшится потенциал в центре диска, если из него изъять среднюю часть радиусом  $R/2$ , но заряд  $q$  оставить тем же. Не изменится
7. Металлический шарик заряжен до потенциала  $1$  В. Шарик вносят внутрь сферической проводящей поверхности, заряженной до потенциала  $1000$  В, и касаются им этой поверхности. Заряды переходят с шарика на сферический проводник. Как объяснить кажущееся противоречие между теорией и опытом? Мы совершили работу, когда внесли шарик, Потенциал шарика стал  $1001$  В.
8. Изолированный заряженный проводник поднесли к другому изолированному проводнику острием, обращенным к заряженному проводнику. Что при этом произойдет?
9. Две частицы с одинаковыми массами, заряженные равными по величине разноименными зарядами, движутся по окружности вокруг общего центра масс. Пренебрегая гравитационным взаимодействием между частицами, найти отношение  $\alpha$  величин потенциальной и кинетической энергий частиц.  $2$
10. Что происходит при соединении заряженного электроскопа с Землей? Разобрать два случая: когда электроскоп заряжен положительно и когда отрицательно.  $Q/r+q/r=0$ .  $Q=-q$
11. Проводники  $A$  и  $B$  удалены от других тел. Проводник  $A$  заряжен, а проводник  $B$  - нет, но когда их соединяют проволокой, заряды не перетекают с  $A$  на  $B$ , а также с  $B$  на  $A$ . Приведите примеры таких проводников. Если они оба находятся в поле третьего заряда и их потенциалы одинаковы.
12. Вблизи Земли напряженность электрического поля около  $130$  В/м. Можно ли использовать напряжение между точками, отстоящими по вертикали на  $1$  м друг от друга, для питания электрической лампочки? Дайте объяснение.
13. Заряженная частица, помещенная в электрическое поле, увеличивает свою кинетическую энергию. Какая энергия при этом уменьшается? Объясните.
14. Объясните, почему в диэлектрической среде заряженная частица находится в устойчивом положении равновесия?
15. Изменится ли электрическое поле, создаваемое зарядом, если этот заряд окружить тонкой незаряженной металлической поверхностью, совпадающей с одной из эквипотенциальных поверхностей? Не изменится.
16. Из двух медных концентрических полых шаров наружный заряжен до потенциала  $5$  В, а внутренний до потенциала  $10$  В. Шары соединили проволокой. Как изменятся потенциалы шаров? До соединения заряды шаров  $q_1$  и  $q_2$ . Потенциал внешнего шара не изменится. А внутреннего?
17. Внутри проводящей заряженной сферы через небольшое отверстие вносится (без соприкосновения) металлический шарик, заряд которого равен по величине, но противоположен по знаку заряду сферы. Как изменится потенциал сферы?
18. Какова разность потенциалов гравитационного поля между токами, находящимися на высоте  $2$  и  $5$  м от поверхности Земли?
19. На расстоянии  $\ell$  снаружи от поверхности незаряженного металлического шара

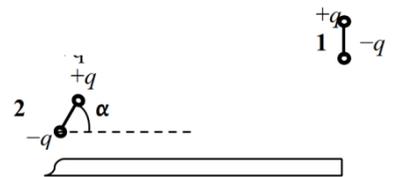
радиусом  $R$  находится точечный заряд  $q$ . Определите потенциал шара.

20. Определить напряженность электрического поля в мембране эритроцита, толщиной 25 мкм, если мембранная разность потенциалов равна 100 мВ.
21. Заряд  $Q$  равномерно распределен по объему шара радиусом  $R$  из непроводящего материала. Найти напряженность поля на расстоянии  $r$  от центра; построить график зависимости  $E$  от  $r$ . Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 1$ .

### Разное

1. Свободные заряды равномерно распределены с объемной плотностью  $\rho = 5$  нКл/м<sup>3</sup> по шару радиусом  $R = 10$  см из однородного изотропного диэлектрика с проницаемостью 5. Определить напряженность электростатического поля на расстояниях  $r_1 = 5$  см и  $r_2 = 15$  см от центра шара.  $E_1 = 1,88$  В/м;  $E_2 = 8,37$  В/м.
2. На плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами  $d = 1,5$  см подают напряжение  $U = 39$  кВ. Будет ли пробит конденсатор, если предельная напряженность электрического поля в воздухе  $E_1 = 30$  кВ/см? Будет ли пробит конденсатор, если внутрь его параллельно обкладкам ввести стеклянную пластинку ( $\varepsilon = 7$ ) толщиной  $d_1 = 0,3$  см, если предельная напряженность поля для стекла  $E_2 = 100$  кВ/см? После введения в воздухе 31,4 кВ/см, после пробоя воздуха в стекле 185 кВ/см.
3. Два маленьких шарика, связанные непроводящим стержнем длиной  $L=1$  см и заряженные зарядами  $q$  и  $-q$  ( $q = 0,1$  мкКл), находятся над прямым краем очень большой плоской пластины, равномерно заряженной положительным зарядом с поверхностной плотностью  $\sigma = 10$  мКл/м<sup>2</sup>. Стержень перпендикулярен пластине. Какую работу надо совершить, чтобы медленно передвинуть стержень так, чтобы он оказался в положении 2 очень далеко от краев пластины?  $\alpha = 30^\circ$ . Потенциал поля

$$\varphi = -\frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon} x. A' = q \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon} L(1 - \cos \alpha)$$



4. Точечный заряд  $q$  находится на расстоянии  $7r$  от центра незаряженной металлической сферы радиуса  $r$ . Сферу заземляют с помощью длинного и тонкого проводника. Найти заряд сферы после установления равновесия. Ответ обосновать.  $Q = -q/7$
5. Имеется бесконечно длинная прямая нить, заряженная равномерно с линейной плотностью  $\lambda = 0,01$  мкКл/м. Вычислить разность потенциалов точек 1 и 2, если точка 2 находится в  $\eta = 2$  раза дальше от нити, чем точка 1. 124,8 В
6. Металлический шар радиусом  $R_1$ , заряженный до потенциала, окружают концентрической сферической проводящей оболочкой радиусом  $R_2$ . Внешнюю оболочку заземляют с помощью тонкого проводника. Сколько тепла выделится при этом в проводнике?  $\Delta W = 2\pi\varepsilon_0 \frac{\varphi^2 R_1^2}{R_2}$
7. На расстоянии  $a$  от центра заземленного шара радиуса  $R$  ( $R \ll a$ ) находится точечный заряд  $q$ . Определить заряд шара. У проводника появляется потенциал, если он приобретает заряд.

8. Два маленьких шарика массами  $m_1 = 6$  г и  $m_2 = 4$  г находятся на гладком столе и несут заряды  $q_1 = 10^{-6}$  Кл и  $q_2 = 5 \cdot 10^{-6}$  Кл соответственно. В начальный момент они движутся навстречу друг другу по прямой, соединяющей их центры. При этом расстояние между шариками составляет  $l = 2$  м и их скорости равны  $v_1 = 1$  м/с и  $v_2 = 2$  м/с соответственно. На какое минимальное расстояние  $L$  приблизятся шарика друг к другу? 1,32 м
9. Внутри плоского незаряженного конденсатора, пластины которого расположены горизонтально на расстоянии  $d = 2$  см, падает положительно заряженная пылинка. Вследствие сопротивления воздуха пылинка движется равномерно, проходя некоторый путь за время  $t_0 = 10$  с. Когда на конденсатор подали напряжение  $U = 980$  В, пылинка начала двигаться равномерно вверх, пройдя тот же путь за время  $t_1 = 5$  с. Определить отношение  $\gamma$  заряда пылинки к ее массе. Силу сопротивления воздуха считать пропорциональной скорости пылинки, ускорение свободного падения принять  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.  $\gamma = 6 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг.
10. Два одинаковых металлических заряженных шара радиуса  $r = 2$  см находятся на большом расстоянии друг от друга. Один из шаров расположен при этом внутри сферической проводящей заземлённой оболочки радиуса  $R$  так, что их центры совпадают. Через небольшое изолированное отверстие в этой оболочке шары соединяют тонкой длинной проволокой. В результате на шарах устанавливаются заряды  $q_1 = 6 \cdot 10^{-10}$  Кл,  $q_2 = 2 \cdot 10^{-10}$  Кл. Чему равен радиус оболочки  $R$ ? 3 см
11. На координатной плоскости  $xu$  в точке с координатами  $[0; 0]$  находится точечный заряд 220 нКл, а в точке с координатами  $[50; 0]$  см заряд - 180 нКл. Изобразите все на чертеже и определите:
- 1) направление суммарного вектора напряженности в точках «Б» и «Г» с координатами соответственно  $[25; 0]$  см и  $[25; 43,3]$  см, и величину напряженностей в этих точках. 25,92 кН/м, 7,643 кН/м.
  - 2) потенциал в точках «Б» и «Г». 720 В, 1440 В.
  - 3) работу электростатического поля при перенесении положительного заряда 4 нКл из т. «Б» в т. «Г». 2,88 мкДж

### Олимпиада.

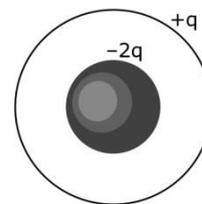
1. Провод высоковольтной линии электропередачи, расположенный на высоте  $H = 20$  м над земной поверхностью, находится под напряжением  $U = 350$  кВ относительно земли. Предполагая, что Земля не заряжена и не искажает существенно электрическое поле вблизи проводов, определите минимальный диаметр проводов, при котором еще не будет происходить электрический пробой воздуха, наблюдаемый при напряженности поля  $E_{пр} = 3 \cdot 10^6$  В/м. Теорема Гаусса, связь  $E$  и  $\Delta\phi$ , интеграл, дальше подстановкой. Ответ:  $D = 2r \approx 3,3$  см.  $r \ell n \frac{H}{r} = \frac{U}{E_{пр}}$ .
2. Два металлических шарика радиусом  $r$  с зарядами  $q$  на каждом расположены на расстоянии  $a$  друг от друга и на очень больших равных расстояниях от Земли. Первый шар заземляют и заземляющий проводник убирают. Затем такую же процедуру проделывают со вторым шариком. После этого снова заземляют

первый шар и т. д. Каким будет отношение зарядов шаров после  $n$  заземлений второго шара?  $-r/a$

3. Три полых металлических шарика разместили в вакууме так, что их центры оказались в вершинах правильного треугольника со стороной 1 м. Радиус первого шарика равен 1 см, второго – 1 см и третьего – 1/3 см. Первому шарiku сообщают заряд 100 нКл. После этого первый и третий шарики соединяют проводящей проволокой пренебрежимо малой электроёмкости, и через некоторое время её убирают. Затем такой же проволокой соединяют первый и второй шарики.

- 1) Какой заряд протёк по проволочке, когда соединили первый и второй шарики? Ответ выразите в нКл, округлите до десятых долей.
- 2) Чему равен потенциал второго шарика, после соединения первого и второго шариков? Ответ выразите в кВ, округлите до целого числа.
- 3) Чему равен модуль напряжённости поля, создаваемого шариками в центре треугольника, после соединения первого и второго шариков? Ответ выразите в кВ/м, округлите до сотых долей.

4. Металлический шарик радиуса  $R$  с отрицательным зарядом  $-2q$  находится внутри тонкостенной металлической сферы радиуса  $2R$ . Центры шарика и металлической сферы совпадают. Сфере сообщили положительный заряд  $+q$ . Шарик и сферу соединили тонким проводником ничтожной ёмкости и затем разъединили. Найдите разность потенциальных энергий  $\Delta W$  конечного и начального состояний системы.



## Занятие 18. Конденсаторы.

### I. Вопросы (блиц):

1. Проводящий стержень на изолирующей ручке поместили радиально в поле точечного заряда. Будет ли поверхность стержня эквипотенциальной?
2. Как расположите три одинаковых заряда, чтобы в заданной точке напряженность электрического поля была равна нулю? Какой будет потенциал этой точки?
3. Могут ли пересекаться линии вектора напряженности? Эквипотенциальные поверхности?
4. Две параллельные бесконечные заряженные плоскости с поверхностными плотностями зарядов  $1 \text{ нКл/м}^2$  и  $5 \text{ нКл/м}^2$  расположены на расстоянии 20 см друг от друга. Найти разность потенциалов между пластинами. 45 В
5. Найти потенциал проводящего шара радиуса 1 м, если на расстоянии 2 м от его поверхности потенциал электрического поля равен 20 В. 60 В.
6. Почему к оборванному трамвайному проводу, лежащему на земле, следует подходить все более мелкими шажками?
7. Электростатическое поле создано равномерно заряженной сферой. Напряженность в точке, отстоящей от поверхности сферы на расстоянии, равном ее радиусу, равна 120 В/м. Потенциал этой же точке 48 В. Определить радиус сферы. 20 см
8. Металлический шар радиусом  $R_1$  заряженный до потенциала  $\varphi$ ,

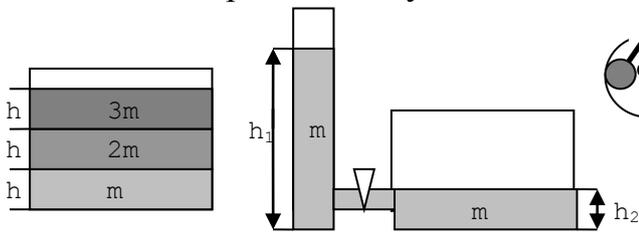
$$\varphi' = \varphi \frac{R_1}{R_2}$$

окружают сферической проводящей оболочкой радиусом  $R_2$ . Как изменится потенциал шара после того, как он будет на короткое время соединен проводником с оболочкой?

**II. Задачи (блиц):**

1. Два одинаковых шара удалены на очень большое расстояние друг от друга. Поле первого шара обладает энергией  $W_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$  Дж, а поле второго - энергией  $W_2 = 3,6 \cdot 10^{-3}$  Дж. Какое количество тепла выделится при соединении этих шаров проволокой?  $W = 2 \cdot 10^{-4}$  Дж
2. С какой скоростью пролетит электрон, втягиваемый в кольцо, заряженное положительно и с линейной плотностью  $\gamma$ , через центр кольца? Электрон находился в бесконечности.  $v^2 = \frac{4\pi k \gamma}{m}$
3. Вычислите потенциал, создаваемый тонким равномерно заряженным стержнем с линейной плотностью заряда  $10$  нКл/м, расположенной на оси стержня и удаленной от ближайшего конца стержня на расстояние, равное длине стержня.  $62$  В.

**III. Электроемкость уединенного проводника. Электроемкость (C) - свойство проводника накапливать электрический заряд, измеряемое отношением электрического заряда уединенного проводника к его потенциалу. Единица электроемкости в СИ:  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ . Электроемкость шара:  $C = 4 \cdot \pi \epsilon_0 \epsilon R$ .**



проводника накапливать электрический заряд, измеряемое отношением электрического заряда уединенного проводника к его потенциалу. Единица электроемкости в СИ:  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ . Электроемкость шара:  $C = 4 \cdot \pi \epsilon_0 \epsilon R$ .

**Электрическая постоянная:  $[\epsilon_0] = [\text{Ф/м}]$ . Конденсатор. Заряд конденсатора.**

Напряжение между обкладками конденсатора:  $U = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} d = \frac{q}{S \epsilon \epsilon_0} d \rightarrow U \sim q$ .

**Электроемкость конденсатора:**  $C = \frac{q}{U} \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} = \epsilon \cdot C_0$

Энергия заряженного конденсатора.

$$A = \frac{qU}{2} = E_s = \frac{q^2}{(2 \cdot C)} = \frac{CU^2}{2}$$

**Плотность энергии электрического поля:**

$$W_3 = \frac{CU^2}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_0 S}{d} \right) (E^2 \cdot d^2) = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 S d \quad U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

**IV. Задачи (блиц):**

1. Площадь обкладки плоского воздушного конденсатора равна  $250 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $2 \text{ мм}$ . Конденсатор заряжается от батареи с напряжением  $150 \text{ В}$ . Определите емкость конденсатора, его заряд и напряженность электрического поля между его обкладками.  $110,6 \text{ пФ}$ .  $16,6 \text{ нКл}$ .
2. После этого конденсатор отключили от батареи (заряд на обкладках при этом не изменяется) и между обкладками ввели диэлектрическую пластинку ( $\epsilon = 5$ ) такой же площади и толщиной  $1 \text{ мм}$ . Определите: а) напряженность электрического поля в диэлектрике; б) напряжение между обкладками после введения диэлектрика; в) емкость конденсатора с диэлектриком.  $90 \text{ В}$ .  $184 \text{ пФ}$ .
3. Если бы мы не отключали конденсатор от батареи и ввели диэлектрическую пластину, то каким бы стал после этого заряд конденсатора и напряженность

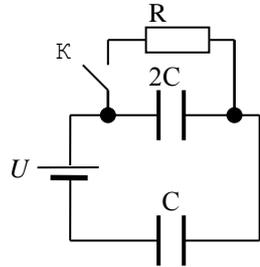
электрического поля в воздушном зазоре и в диэлектрике? 27,6 нКл. 125 кН/Кл.

4. Конденсатор емкости  $C$  подключен к батарее. Какое количество теплоты выделится в цепи, если его заполнить веществом с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ ? Батарея поддерживает на конденсаторе постоянное напряжение  $U$ .  $Q = \frac{CU^2}{2}(\varepsilon - 1)$

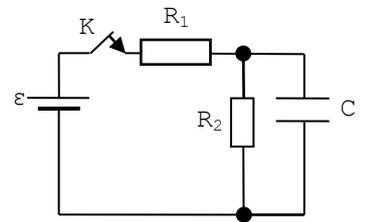
Если заряд внутри источника тока переносится от минуса к плюсу (конденсатор заряжается), то работа источника положительная, в противном случае (конденсатор разряжается) – работа источника тока отрицательная!  $W_1 + A_{ист} + A = W_2 + Q$ .

**V. Олимпиада.**

1. Какое количество теплоты выделится на резисторе после замыкания ключа  $K$ ?  $Q = CU^2 / 2$
2. В электрической цепи, схема которой показана на рисунке, все элементы идеальные: ЭДС источника равна 24 В, величина сопротивления каждого резистора равна 10 Ом. Ключ  $K$  замыкают на длительное время, за которое конденсатор успевает полностью зарядиться, а затем размыкают. Какой ток будет течь через сопротивление, подключенное параллельно конденсатору в момент времени, когда на конденсаторе энергия уменьшится в 9 раз? 0,4 А



3. Между пластинами плоского конденсатора расположена диэлектрическая пластина ( $\varepsilon = 3$ ), заполняющая весь объем конденсатора. Конденсатор через сопротивление подключен к аккумулятору с ЭДС  $\varepsilon = 100$  В. Пластину быстро выдергивают, так что заряд на конденсаторе не успевает измениться. Какая энергия выделится в цепи в виде тепла?  $W = \frac{C_0 E^2}{2}(\varepsilon - 1)^2 = 2$  Дж. Емкость конденсатора без диэлектрика равна  $C_0 = 100$  мкФ.



*Вопросы (блиц):*

1. Если к шарiku заряженного электроскопа поднести (не касаясь шарика) руку, листочки немного спадут. Почему?
2. Почему у конденсатора с диэлектриком электрическая емкость больше?
3. Обкладки конденсатора одинаковы и расположены симметрично относительно некоторой плоскости. Емкость конденсатора  $C = 1$  мкФ. На одну обкладку нанесен заряд  $q_1 = 3$  мкКл, на другую –  $q_2 = -2$  мкКл. Чему равна разность потенциалов между обкладками? 0,5 В.
4. Определите массу воды, которую можно нагреть от комнатной температуры до кипения, полностью затратив энергию заряженного до напряжения 10 кВ конденсатора емкостью 100 мкФ. 15 г.
5. Конденсатор подключили к аккумулятору. Расстояние между пластинами конденсатора уменьшили в два раза. Как изменилась разность потенциалов между пластинами, а также напряженность поля между пластинами и заряд конденсатора?
6. В системе зажигания автомобиля конденсатор емкостью 0,25 мкФ с пробивным напряжением 300 В вышел из строя. Как заменить его конденсаторами емкостью 0,3 мкФ с пробивным напряжением 150 В? Два последовательно и 2 параллельно к батарее.

7. Как от заряженного конденсатора получить максимальную мощность разряда?
8. Если смесь газов прогнать под давлением через активированный (тонко измельченный) древесный уголь, то отдельные молекулы газа прочно свяжутся с поверхностью частичек угля и останутся сцепленными с ней. На этом принципе основано действие противогаза. Почему такое происходит?
9. Каким должен быть радиус шара, чтобы его емкость (в вакууме) равнялась  $1\Phi$ ?
10. Как изменится емкость шара, если его радиус увеличить в 4 раза?  
Увеличится в 4 раза
11. Что будет с разностью потенциалов между пластинками конденсатора, если уменьшить расстояние между ними? Если увеличить?
12. Поле плоского воздушного конденсатора имеет напряжённость  $E$ , а заряд конденсатора равен  $Q$ . Какая сила действует на каждую из его пластин?  $QE/2$
13. Плоский воздушный конденсатор присоединён обкладками к аккумулятору. Чтобы уменьшить напряжённость поля в конденсаторе, поместим его в непроводящую жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Правильно ли мы поступили? В итоге напряжённость не изменится.
14. Плоский конденсатор, пластины которого велики по сравнению с расстоянием между ними, присоединен к источнику постоянного напряжения. Изменится ли напряженность электрического поля внутри конденсатора, если заполнить пространство между обкладками диэлектриком? Рассмотреть два случая: а) источник остается включенным, б) источник отключен.
15. Какова емкость керамического конденсатора с площадью пластин в  $1\text{ см}^2$ , расстоянием между ними в  $0,1\text{ мм}$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 10000$ ?
16. Как изменится емкость проводника, если его заряд уменьшить в 100 раз? Не измениться
17. Конденсатор подключен к аккумулятору. Раздвигая пластины конденсатора, мы преодолеваем силы электростатического притяжения между пластинами и, следовательно, совершаем работу. На что идет эта работа? Как изменится энергия конденсатора?
18. В двух одинаковых плоских конденсаторах пространство между обкладками заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3$ , в одном наполовину, в другом полностью. Найти отношение емкостей  $\alpha$  этих конденсаторов.  $2/3$
19. Как изменится сила взаимодействия пластин плоского конденсатора, если расстояние между ними уменьшить, не изменяя заряда конденсатора?
20. Плоский конденсатор имеет емкость  $C$ . На одну из пластин конденсатора поместили заряд  $+q$ , а на другую – заряд  $+4q$ . Определите напряжение на конденсаторе.
21. Пластины заряженного и отключенного от батареи конденсатора притягиваются с силой  $F$ . Изменится ли та сила, если ввести в конденсатор пластину из диэлектрика, не касаясь пластин?
22. Плоский конденсатор зарядили до разности потенциалов, немного не достигающей пробойного значения, и отсоединили от источника напряжения.

Произойдет ли пробой, если пластины начать сближать?

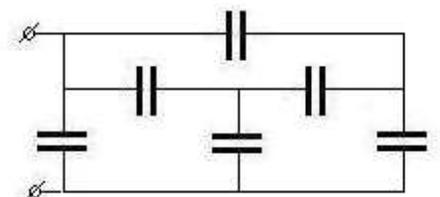
23. Как изменится емкость плоского конденсатора, если между его обкладками поместить металлическую пластину пренебрежимо малой толщины в случаях:  
а) пластина электрически изолирована; б) пластина соединена с одной из обкладок?

### Разное.

1. Мы живем внутри огромного конденсатора, образуемого земной поверхностью и ионосферой, начинающейся на высоте  $h$  примерно 60 км. а) Определите емкость этого конденсатора; б) Покажите, что рассчитать емкость можно, рассматривая этот конденсатор либо как сферический, либо как плоский; в) Определите энергию  $W$  этого конденсатора, если напряжение между ионосферой и поверхностью Земли составляет  $U = 300$  кВ.  $C \approx 76$  мФ;  $W \approx 1,14 \cdot 10^9$  Дж.
2. В однородном электрическом поле с напряженностью 60 кВ/м перемещается заряд 5 нКл. Вектор перемещения, равный по модулю 20 см, составляет угол  $60^\circ$  с направлением силовых линий поля. Найти: а) разность потенциалов между конечной и начальной точками; б) работу, совершенную при перемещении заряда. 6 нВ, 30 мкДж
3. Поверхностная плотность заряда на бесконечной плоскости  $\sigma = 8,85 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>. Найти работу кулоновских сил по перемещению точечного заряда  $q = 10$  нКл на расстояние  $\Delta x = 2,0$  см вдоль силовых линий электростатического поля данной плоскости. 100 пДж
4. Два плоских воздушных конденсатора одинаковой емкости соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов  $U = 300$  В. Определить разность потенциалов этой системы, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить слюдой  $\epsilon = 7$ . Ответ: 75 В.

### Олимпиада.

1. С какой силой втягивается диэлектрическая пластина в плоский конденсатор с зарядом  $q = 1$  мкКл, когда она входит в пространство между обкладками на длину  $x = 6$  см? Диэлектрическая проницаемость пластины  $\epsilon = 3$ , а толщина её немного меньше расстояния между обкладками  $d = 1$  мм. Размеры обкладок, как и пластины,  $a \times b = 10$  см  $\times$  8 см.
2. Найдите энергию электрического поля, заключенного между двумя концентрическими сферами с радиусами  $R$  и  $r$ , несущими заряды  $Q$  и  $-Q$  соответственно. Плотность энергии электромагнитного поля  $W = \epsilon_0 E^2 / 2$ .  
Можно через емкость сферического конденсатора:  $C = 4\pi\epsilon_0 \left( \frac{rR}{R-r} \right)$ . Дальше через энергию конденсатора.. Можно через напряженность и энергию тонкого шарового слоя и интеграл.
3. Конденсатор емкостью  $C$  присоединен к источнику тока с напряжением  $U$ . Какую работу нужно совершить, чтобы медленно увеличить расстояние между обкладками конденсатора в 3 раза?
4. Найти емкость батареи конденсаторов. Каждый конденсатор имеет емкость  $C$ .
5. Из 6 одинаковых по размерам конденсаторов часть

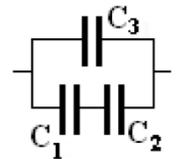


– воздушные, а часть заполнена диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 3. известно, что если все эти конденсаторы соединить параллельно, то емкость этой системы окажется в 48 раз больше, чем при их последовательном соединении. Найдите, сколько конденсаторов имеют диэлектрик. Ответ: 3

## Занятие 19. Сила тока.

### I. Вопросы (блиц):

1. Плоский воздушный конденсатор после зарядки отключают от источника напряжения и погружают в керосин. Как изменится энергия, накопленная в конденсаторе?
2. На какую высоту можно поднять тело массой в 1 кг, полностью затратив энергию заряженного до напряжения 10 кВ конденсатора емкостью 100 мкФ? Около 0,5 км.
3. К заряженному конденсатору, обладающему энергией  $E_0$ , присоединяют такой же, но незаряженный конденсатор. Какое количество теплоты выделилось в этом процессе?
4. Если вы зарядите себя до потенциала в 15000 В, волоча ноги по ковру, то сколько энергии вы запасете?
5. Найдите емкость батареи конденсаторов.  $C_1 = 0,1$  мкФ,  $C_2 = 0,4$  мкФ,  $C_3 = 0,52$  мкФ.  $C_{об} = 0,6$  мкФ
6. Пластины плоского конденсатора один раз раздвигают, оставляя их все время подключенными к источнику напряжения, другой раз – отключенными после первоначальной зарядки. В каком из этих двух случаев нужно совершить большую работу по раздвиганию пластин?
7. Конденсатор подключили к аккумулятору. Расстояние между пластинами конденсатора уменьшили в два раза. Как изменилась разность потенциалов между пластинами, а также напряженность поля между пластинами и заряд конденсатора?
8. Конденсатор отключили от аккумулятора, после чего расстояние между пластинами уменьшили в два раза. Как изменится заряд, напряженность поля и разность потенциалов между пластинами?
9. Заряженный конденсатор подключили параллельно к такому же незаряженному. Во сколько раз изменилась энергия поля первого конденсатора?
10. Как связана работа источника питания, заряжающего батарею конденсаторов емкости  $C$ , с энергией электрического поля заряженной батареи?  $A_{ист} = 2W$
11. Два одинаковых плоских конденсатора емкости  $C$  соединены параллельно и заряжены до напряжения  $U$ . Пластины одного из конденсаторов разводят на большое расстояние. Найти напряжение на втором конденсаторе и его энергию.



### II. Задачи (блиц):

1. Конденсаторы емкостями 3 и 1 мкФ соединены последовательно и подключены к источнику тока с ЭДС 200 В. Сколько тепла выделится при пробое конденсатора меньшей емкости? 45 мДж
2. Конденсатор емкостью  $C_1 = 0,10$  мкФ, рассчитанный на напряжение 50 В,

включается последовательно с конденсатором емкостью  $C_2 = 0,20$  мкФ, рассчитанным на напряжение 200 В. Какое максимальное напряжение можно приложить к концам этой цепи? Ответ: 75 В.

3. Батарею последовательно соединенных конденсаторов  $C_1 = 4$  мкФ,  $C_2 = 5$  мкФ,  $C_3 = 20$  мкФ присоединили сначала к аккумулятору с ЭДС  $\varepsilon = 12$  В, а затем к незаряженному конденсатору  $C_4 = 8$  мкФ. Какое напряжение установилось на конденсаторе  $C_4$  и на сколько изменилась энергия всей батареи конденсаторов. 2,4 В. 0,12 мДж

**III. Простейшая электрическая цепь.** Если за время  $t$  через спираль лампочки прошло  $N$  электронов, то  $q = Ne$  и  $I = \frac{q}{t} = \frac{Ne}{t}$ .

Можно ли измерить силу тока таким способом? Нет! Почему?

Можно ли измерить силу тока в проводнике по его **тепловому** действию? Да, но метод не оперативен и очень неточен!

Зависит ли **химическое** действие электрического тока от его направления? Да! Масса выделившегося на катоде металла  $m = N \cdot m_0$ , перенесенный заряд  $q = N \cdot q_0$ . Объединяя, получим:  $m =$

$\frac{m_0}{q_0} q = kq = kIt$ . Можно ли измерить силу тока в проводнике по

его химическому действию? Да, но метод не оперативен!

Силу тока измеряют по его **магнитному** действию. Формула для силы электрического тока в проводнике:  $I = q_0 n \bar{v} S$ .

**IV. Задачи (блиц):**

1. На цоколе электрической лампочки написано (60 В, 200 мА).

Сколько электронов проходит через поперечное сечение спирали лампочки за 30 с?

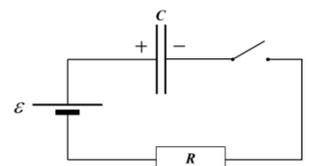
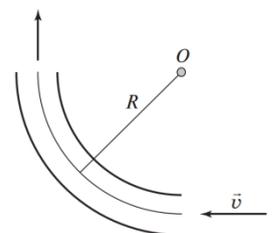
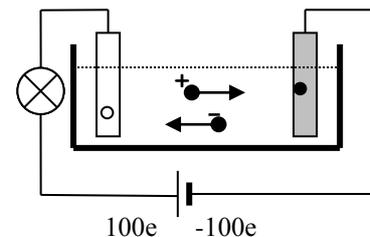
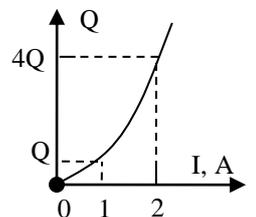
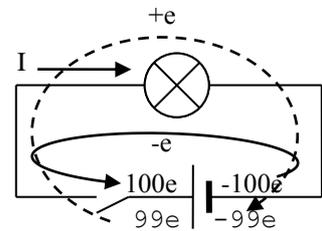
2. Селектор частиц по кинетической энергии представляет собой конденсатор, пластины которого изогнуты так, что в сечении получаются дуги с радиусами  $R_1 = 60$  см и  $R_2 = 61$  см. В конденсаторе создается поле напряженностью  $E = 100$  кВ/м. Считая, что селектор отбирает частицы,двигающиеся по средней линии конденсатора (не попадающие на пластины), определить их кинетическую энергию, зная, что заряд частиц равен  $2e$ . Ответ:  $10^{-14}$  Дж

**V. Олимпиада.**

1. Заряженный конденсатор емкостью  $C$  подключили к резистору сопротивлением  $R$ . Найти время, за которое энергия конденсатора уменьшится вдвое.  $t = 0,35RC$

2. Электрическая цепь состоит из последовательно соединённых идеального источника напряжения с ЭДС  $\varepsilon = 18$  В, резистора сопротивлением  $R = 10$  Ом, разомкнутого ключа и конденсатора, заряженного до напряжения  $\varepsilon/3$  (полярность указана на схеме). Ёмкость конденсатора  $C = 1$  мФ. Сопротивление проводов и ключа очень мало. Ключ замыкают.

- 1) Найдите силу тока в этой цепи сразу после замыкания ключа. 1,2 А



- 2) Найдите максимальную скорость изменения энергии конденсатора в этой цепи. 8,1 Дж/с.  $\varepsilon I = P + I^2 R$
  - 3) Найдите силу тока в цепи в тот момент, когда достигается максимальная скорость изменения энергии конденсатора. 0,9 А
  - 4) Найдите напряжение на конденсаторе в момент, когда достигается максимальная скорость изменения энергии конденсатора. 9 В
  - 5) Определите количество теплоты  $Q_1$ , выделившееся в этой цепи к моменту достижения максимальной скорости изменения энергии конденсатора. 31,5 мкДж
  - 6) Найдите общее количество теплоты  $Q_2$ , выделившееся в резисторе в течение очень большого промежутка времени после замыкания ключа. 162 мкДж
3. В ускорителе частиц пучок протонов диаметром  $d = 2$  мм образует ток  $I = 1$  мА. Кинетическая энергия каждого протона равна  $W = 20$  МэВ. Пучок попадает на металлическую мишень и поглощается ею. а) Какова концентрация  $n$  протонов в пучке? б) Сколько протонов  $N$  попадет в мишень за  $t = 1$  мин? а)  $n = \frac{2I}{\pi q d^2} \sqrt{\frac{2m}{W}}$   
 $\approx 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ ; б)  $N = It/q = 3,75 \cdot 10^{17}$ .

#### Вопросы (блиц):

1. Если пространство между обкладками плоского воздушного конденсатора заполнить изолятором с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , то что произойдет с напряженностью поля, напряжением на обкладках конденсатора и энергией электрического поля?
2. В течение 20 с сила тока в проводнике равномерно возросла от 1 А до 5 А. Какой заряд прошел по проводнику? 60 Кл
3. За счет, каких видов энергии может происходить разделение зарядов в источнике тока?
4. Что общего и в чем различие между термопарой и фотоэлементом?
5. Чем отличаются батарейки от аккумуляторов? Почему нельзя перезаряжать батарейки?
6. Утверждается, что, бродя в квартире по полу с пластиковым покрытием, мы заряжаемся до потенциала в сотни тысяч вольт. Оцените, почему мы не погибаем от таких разрядов?

#### Разное

1. Плоский воздушный конденсатор объемом  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  с закороченными пластинами поместили в однородное электрическое поле так, что вектор напряженности этого поля перпендикулярен пластинам. Чему равна напряженность поля, если для увеличения расстояния между пластинами в три раза была совершена работа  $15,93 \cdot 10^{-10}$  Дж. 300 В/м
2. К батарее из  $n$  последовательно соединенных одинаковых конденсаторов, емкостью  $C$  каждый, приложено постоянное напряжение  $U$ . Один из конденсаторов пробивается. Определите изменение энергии батареи, энергию разряда и работу источника питания.  $A_{\text{исч}} = \frac{CU^2}{2n(n-1)}$
3. Между пластинами конденсатора находится диэлектрик с диэлектрической проницаемостью 1,8. После зарядки конденсатора его отключили от источника тока. Какова емкость конденсатора с диэлектриком,

если минимальная работа, которую нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора, равна 2,3 Дж, а установившееся напряжение на пластинах конденсатора без диэлектрика – 860 В. 25,2 мкФ

### Занятие 20. Закон Ома.

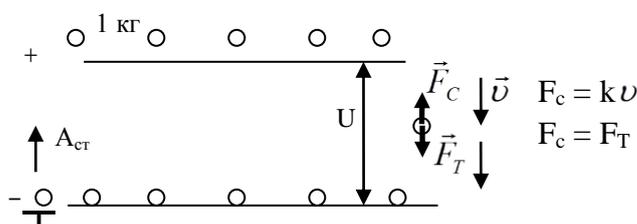
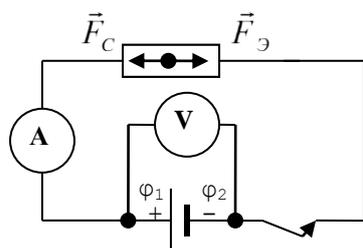
#### I. Вопросы (блиц):

1. Почему единицу силы тока устанавливают по его магнитному действию?
2. Напряжение на участке цепи 2 В. Объясните, что это означает?
3. В металлической трубе переменного сечения движется электрон. Изменится ли его скорость при прохождении сужения?
4. Где больше средняя скорость упорядоченного движения электронов: в нити лампы или в проводах, подводящих к ней ток?
5. Есть ли внутри проводника с током электрическое поле?
6. Коль электрический заряд переносится свободными заряженными частицами, то нельзя ли его измерять в граммах?
7. Два одинаковых плоских конденсатора, соединенные параллельно, заряжены до напряжения  $U = 50$  В. Пластины одного из конденсаторов начинают двигать, уменьшая зазор между ними втрое. Чему равно установившееся напряжение  $U_1$  на этом конденсаторе? Ответ: 25 В.
8. Два металлических одноименно заряженных шара соединены проводником. Может ли электрический заряд перетекать от шара, имеющего меньший заряд, к шару, имеющему больший заряд? При каком условии?

#### II. Задачи (блиц):

1. Ток в проводнике меняется со временем по закону  $I = 4 + 2t$ . Какой заряд пройдет через поперечное сечение проводника за время от  $t_1 = 2$  с до  $t_2 = 12$  с?
2. Предположим, что в атоме водорода электрон движется вокруг протона по круговой орбите радиуса  $5,3 \cdot 10^{-11}$  м. Чему равен ток, обусловленный движением электрона вокруг протона? 1,05 мА
3. Ширина ленты генератора Ван де Граафа  $d = 20$  см. Заряженный участок ленты движется вертикально вверх со скоростью, модуль которой  $v = 10$  см/с. Поверхностная плотность избыточных зарядов на ленте  $\sigma = 40$  мкКл/м<sup>2</sup>. Определите направление и силу электрического тока, обусловленного движением ленты. 0,8 мкА
4. Максимально допустимая плотность тока в медном проводнике 10 А/мм<sup>2</sup>. Чему равна скорость дрейфа электронов? Концентрация электронов  $8,5 \cdot 10^{28}$ . 0,07 см/с

III. Простейшая электрическая цепь (схема на доске). Переход электрона с клеммы "-" на клемму "+" источника тока эквивалентен переносу элементарного заряда  $e$  с клеммы "+" на Простейшая электрическая цепь (рисунок на доске).



Механическая аналогия простейшей электрической цепи (шарики массой 1 кг в поле силы тяжести). На каком участке электрической цепи скорость движения свободных заряженных частиц должна быть больше? Почему она на всех участках проводника постоянного сечения одинакова? Когда такое может быть? Аналогия: падение шариков в вязкой среде (парашютист). **Электрическая цепь оказывает сопротивление току.** Зависит ли сила тока на участке электрической цепи от приложенного напряжения и сопротивления этого участка? Объяснение справедливости закона Ома на основе аналогии (если необходимо, то экспериментальная проверка):  $I \sim v \sim \mathbf{F}, \sim \mathbf{E} \sim \mathbf{U}$ .

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению.

$$I = \frac{U}{R}$$

Измерение сопротивления проводника:  $R = U/I \rightarrow 1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}$ .

Проводник, в котором сила тока прямо пропорциональна напряжению, называется **резистором**. Способы соединения резисторов друг с другом. Существует три способа соединения резисторов: **последовательное, параллельное и смешанное**.

#### IV. Задачи (блиц):

1. По медному проводу сечением  $0,17 \text{ мм}^2$  течет ток  $0,15 \text{ А}$ . Определить, какая сила действует на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля. Удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .  $2,4 \cdot 10^{-21} \text{ Н}$
2. Сколько витков проволоки следует вплотную намотать на фарфоровую трубку радиусом  $10 \text{ см}$ , чтобы изготовить реостат сопротивлением  $50 \text{ Ом}$ ? Удельное сопротивление проволоки  $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , ее диаметр  $2 \text{ мм}$ .  $50$
3. Два изолированных металлических шарика с радиусами  $2 \text{ см}$  и  $1 \text{ см}$  находятся достаточно далеко один от другого. Шарика заряжены положительными одноименными зарядами  $q_1 = q_2 = 4 \text{ мкКл}$  и соединены прямой медной проволокой длиной  $3 \text{ м}$ . Оценить скорость направленного движения электронов в первый момент после соединения.  $30 \text{ м/с}$
4. Плоский конденсатор заполнен веществом с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3$  и удельным сопротивлением  $\rho = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Найти сопротивление  $R$  между обкладками конденсатора, если его емкость равна  $C = 100 \text{ пФ}$ .  $R = 26,6 \text{ МОм}$ .

#### V. Олимпиада.

1. Равнобедренный треугольник ABC, у которого стороны AB и BC равны, сделан из однородной проволоки. Если измерить сопротивление между точками A и B, то оно окажется в  $k$  раз больше, чем сопротивление, измеренное между точками A и C. Найти, во сколько раз отличаются длины сторон AB и AC.  $\frac{a}{b} = 2k - 1$ .
2. Имеется два материала с плотностями  $\rho_1 = 1500 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_2 = 6000 \text{ кг/м}^3$ . Из этих материалов было изготовлено два одинаковых по размерам цилиндрических провода. Радиусы проводов  $R = R_1 = R_2 = 1 \text{ см}$ . При этом внутренняя часть одного провода радиусом  $r = 0,25 \text{ см}$  сделана из менее плотного материала, а внешняя - из более плотного материала. У второго провода - наоборот, при таком же размере внутренней части. Определите отношения масс  $m_1/m_2$  этих проводов. Ответ:  $3,2$ .

### Вопросы (блиц):

1. Объясните, почему сопротивление проволоки зависит от его материала, длины и площади поперечного сечения.
2. Изменится ли сопротивление вольфрамового волоска электрической лампы, рассчитанной на 220 В, если присоединить ее к источнику тока с напряжением 4 В?
3. Разность потенциалов между концами проводника с удельным сопротивлением  $\rho$ , площадью поперечного сечения  $S$  и длиной  $\ell$  равна  $U$ . Как изменится средняя скорость направленного движения электронов вдоль проводника  $v$ , если увеличить в три раза: а) напряжение  $U$ ; б) длину  $\ell$ ; в) площадь  $S$ ?
4. Имеются два мотка медной проволоки одинаковой массы, но сопротивление одного из них в 16 раз больше сопротивления другого. Во сколько раз различаются их диаметры?
5. Почему сопротивление кожи человека зависит от ее состояния, площади контакта, приложенного напряжения, длительности протекания тока?
6. Допустим, что мы проложили провода до Луны и собрали простейшую цепь с лампочкой. Через какое время загорится лампочка после замыкания цепи?

### Занятие 21. Соединение резисторов.

#### I. Вопросы (блиц):

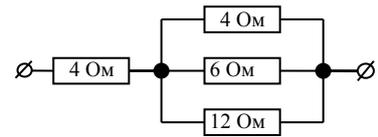
1. Какова природа электрического сопротивления?
2. Что можно определить по формуле:  $\frac{US}{I\ell}$ ? Удельное сопротивление
3. Чему равно сопротивление алюминиевого провода, если такой же по длине и сечению медный провод имеет сопротивление 3,2 Ом?
4. К источнику постоянного напряжения подключен последовательно резистор и реостат. Как изменяется напряжение на резисторе в зависимости от сопротивления реостата?
5. Железная и алюминиевая проволоки имеют равные массы и одинаковые длины. Какая из них обладает большим сопротивлением?
6. Разность давлений определяет скорость потока жидкости, разность атмосферного давления — скорость ветра, разность температур — поток тепла, разность высот — скорость потока воды в реке. А что определяет разность потенциалов?
7. Напряжение шага — напряжение между двумя точками земли, обусловленное растеканием тока на землю, при одновременном касании их ногами человека. Как это понимать?

#### II. Задачи (блиц):

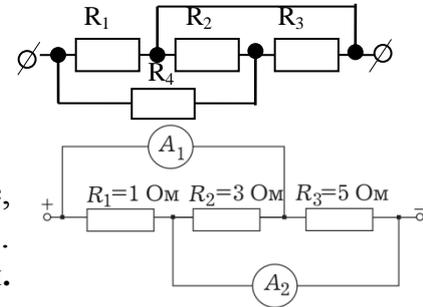
5. Какое напряжение можно приложить к катушке, имеющей 1000 витков медного провода со средним диаметром витков 6 см, если допустимая плотность тока 2 А/мм<sup>2</sup>? 6,4 В
6. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено средой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и удельным сопротивлением  $\rho$ . Чему равно сопротивление такого конденсатора, если его ёмкость равна  $C$ ?  $R = \frac{\rho\epsilon_0\epsilon}{C}$

### III. Смешанное соединение (совместное решение с учениками задачи № 1).

**Задача.** Четыре резистора соединены по схеме, приведенной на рисунке. Напряжение между точками А и В равно 18 В. Определите общее сопротивление и токи в отдельных резисторах.



**Эквивалентные схемы.** **Задача:** Внешняя цепь гальванического элемента составлена из трех резисторов с сопротивлением  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 \text{ Ом}$ . Найти общее сопротивление. Точки на одном проводе, можно соединять друг с другом!  $0,6 \text{ Ом}$



**Задача:** Вычислите показания идеальных амперметров в схеме, изображённой на рисунке 8. Напряжение источника 15 В. Идеальный амперметр в схеме можно временно заменять проводом.  $I_1 = 8 \text{ А}$ .  $I_2 = 20 \text{ А}$

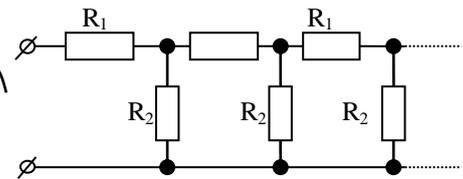
**Принципы симметрии.** **Задача:** Определите сопротивление проволочной сетки, если сопротивление каждого звена  $r$ . Точки схемы, имеющие одинаковый потенциал, можно разъединять или соединять проводом.

#### Бесконечная цепь.

**Задача:** На рисунке изображена



бесконечная цепь, образованная повторением одного и того же элемента, состоящего из сопротивлений  $R_1 = 2 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ . Найти сопротивление этой цепи.  $4 \text{ Ом}$



#### Расширение пределов измерения амперметра и вольтметра.

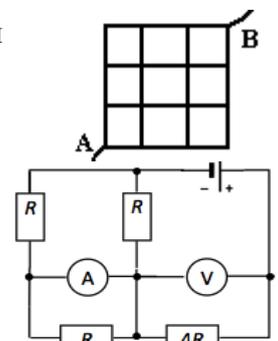
Идеальный амперметр в цепи можно временно заменить проводом, а идеальный вольтметр временно удалить из неё!

#### IV. Задачи (блиц):

1. Определить сопротивление цепочки между точками А и В.

Сопротивление каждого звена  $r = 1 \text{ Ом}$ .  $R_{AB} = 13/7 \text{ Ом}$

2. Четыре резистора, амперметр и вольтметр подключили к идеальной батарейке с  $U_0 = 9 \text{ В}$ , как показано на рисунке. Найдите показания идеальных приборов, если  $R = 1 \text{ Ом}$ .  $1 \text{ А}$ ,  $8 \text{ В}$ .



3. Рассчитайте ток через переключку АВ в схеме, приведенной на рисунке 1. Величины сопротивлений таковы:  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = 4 \text{ Ом}$ . Напряжение на клеммах 12 В.  $(1/6) \text{ А}$

Точки на одном проводе можно соединять друг с другом.

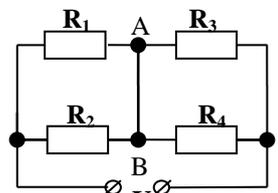
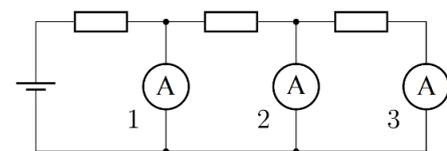


Рис. 1

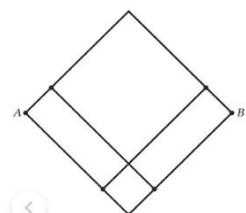
#### V. Олимпиада.

1. Цепь, схема которой представлена на рисунке, собрана из трех

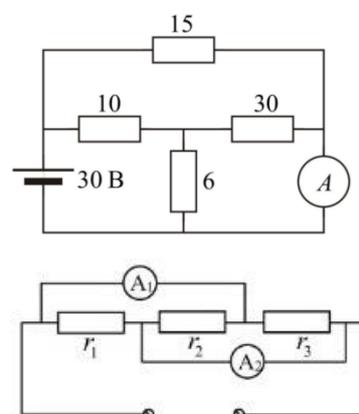
одинаковых резисторов и трех одинаковых амперметров. Показания первого и третьего вольтметров  $I_1 = 10 \text{ мА}$  и  $I_3 = 4 \text{ мА}$  соответственно. Найдите показания  $I_2$  второго амперметра. Связываем токи через напряжения, решая 3



уравнения, получаем  $R_A = R \frac{2}{3} (1 + \sqrt{2})$ .  $6,5 \text{ мА}$

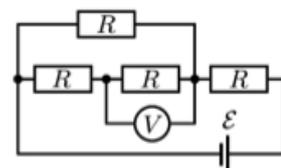
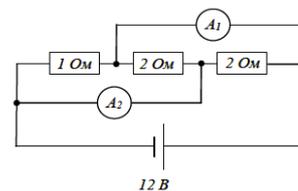


- Определите эквивалентное сопротивление  $R_{AB}$ , если узлы, расположенные на сторонах квадрата, делят их в отношении  $1 : 3$ . Сопротивление единицы длины проводников, равно  $r$ , сторона квадрата равна  $a$ . Узлы в схеме отмечены жирными точками. 2,36 r
- Определите показания идеального амперметра в приведенной на рисунке схеме. Сопротивления резисторов указаны в Омах. 2,33 А.
- Из резисторов  $r_1, r_2, r_3$ , идеальных амперметров и проводов собрали электрическую цепь. Когда к цепи приложили некоторое электрическое напряжение, показания амперметров составили  $I_{A1} = I$ .  $I_{A2} = 2I/3$ . Найти  $r_3$  и  $r_2$ , если известно, что: 1)  $r_1 = r$ ; 2) сопротивления двух резисторов равны другу, третьего – отличается от них.  $r_2 = r, r_3 = 0,5r$ . ( $r_2 = r_3 = r/3$ )



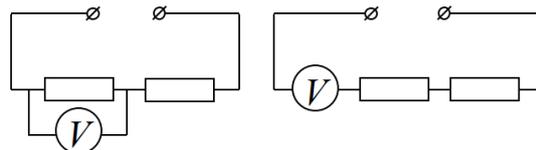
Вопросы (блиц):

- При последовательном соединении резисторов, их общее сопротивление больше, чем сопротивление каждого из них. Как это можно объяснить?
- Найти показания идеальных амперметров в цепи, изображённой на рисунке.  $I_1 = 18$  А,  $I_2 = 12$  А.
- При параллельном соединении резисторов, их общее сопротивление меньше, чем сопротивление каждого из них. Как это можно объяснить?
- Имеется источник тока напряжением 6 В, реостат сопротивлением 30 Ом и две лампочки, на которых написано: 3,5 В, 0,35 А и 2,5 В, 0,5 А. Как собрать цепь, чтобы лампочки работали в нормальном режиме? Чему должно быть равно сопротивление реостата?
- Чему равно сопротивление между двумя вершинами треугольника, составленного из трех резисторов сопротивлением  $R$  каждый?
- Идеальный вольтметр включён в цепь, схема которой изображена на рисунке. Цепь состоит из четырёх одинаковых резисторов сопротивлением  $R$  и батареи с напряжением  $\varepsilon = 9$  В и нулевым внутренним сопротивлением. Найдите показания вольтметра. 1,8 В
- К источнику постоянного напряжения подключен параллельно резистор и реостат. Как изменяется сила тока в резисторе в зависимости от сопротивления реостата?
- Два последовательно соединенных проводника имеют площади поперечных сечений  $S_2 = 2S_1$ . Через сечение первого проводника за 1 с пробегает заряд 1 мкКл. Какой заряд пробежит через сечение второго проводника за две секунды?
- У вас есть два резистора на 3 Ом каждый, и один резистор на 6 Ом. Как их надо соединить в цепь, чтобы получить общее сопротивление 7,5 Ом? 5 Ом? 1,2 Ом?
- Как изготовить резистор сопротивлением 3,75 Ом, используя несколько из десяти резисторов сопротивлением 8 Ом?

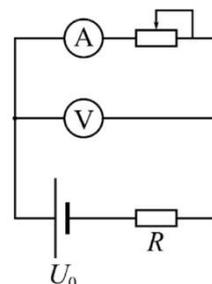


## Разное

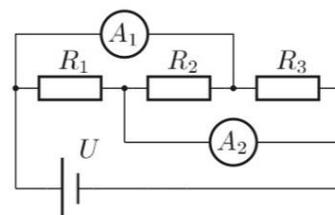
1. Электрическая цепь, схема которой показана на левом рисунке, состоит из двух одинаковых резисторов и вольтметра и подключена к источнику постоянного напряжения. Когда вольтметр включают последовательно с резисторами (правый рисунок), его показания увеличиваются в  $3/2$  раза. Найти отношение сопротивления резистора к сопротивлению вольтметра.  $1/4$



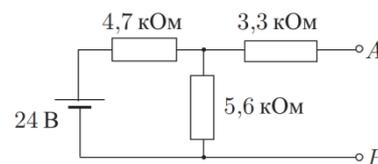
2. В цепи, изображенной на рисунке, сопротивление вольтметра  $R_V = 10$  кОм, сопротивление амперметра  $R_A = 1$  Ом. При изменении сопротивления реостата изменяется ток через амперметр  $I_A$  и напряжение  $U_V$  на вольтметре. При токе через амперметр  $I_{A1} = 15$  мА вольтметр показал  $U_{V1} = 3$  В, а при токе  $I_{A2} = 30$  мА – напряжение  $U_{V2} = 1,5$  В. Определите, чему равны  $R$  и  $U_0$ . Что покажет вольтметр, если ток через амперметр будет близок к нулю?



3. В электрической цепи сила тока, проходящего через резистор  $R_3$  равна 1 мА. Сопротивление резисторов  $R_1 = 1$  кОм и  $R_3 = 3$  кОм. Чему равно напряжение батарейки? Амперметры идеальные.

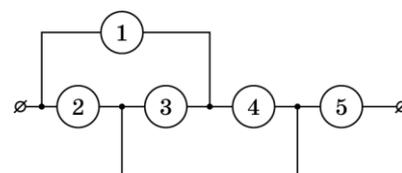


4. Каковы будут показания приборов, включенных между точками А и В на приведенной схеме? а) Идеальный вольтметр; б) идеальный амперметр; в) вольтметр с сопротивлением 50 кОм; г) амперметр с сопротивлением 150 Ом. а) 13 В; б) 2,2 мА; в) 12 В; г) 2,2 мА.



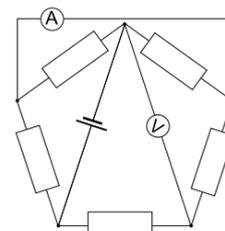
## Олимпиада.

1. Запутанная схема Школьник из трёх одинаковых вольтметров и двух одинаковых амперметров собрал электрическую цепь, схема которой показана на рисунке. Школьник был не очень внимательным и забыл, какие приборы были установлены в каком месте схемы, но записал показания приборов. Вольтметры показывали 2 В, 12 В и 14 В, показания амперметров 200 мкА и 520 мкА. Чертим эквивалентную, 3 и 4 один А, другой V



- 1) Определите, на каких местах в схеме стояли амперметры, а на каких — вольтметры. 3 и 5 - амперметры
- 2) Определите внутренние сопротивления вольтметров и амперметров.  $R_A = 10$  кОм.  $R_V = 50$  кОм.

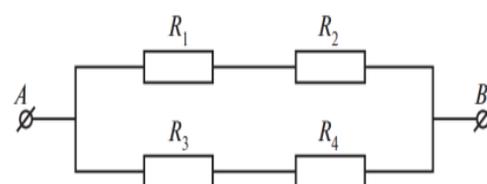
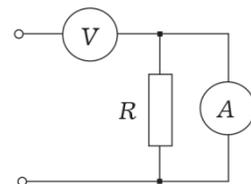
2. Электрическая цепь, схема которой приведена на рисунке ниже, состоит из пяти резисторов сопротивлением  $R = 1$  Ом, батарейки с напряжением  $U_0 = 7$  В и нулевым внутренним сопротивлением, а также идеальных амперметра и вольтметра. Чему равны показания  $I_A$  и  $U_V$  амперметра и вольтметра соответственно? 1А, 1 В.



## Занятие 22. Работа и мощность тока.

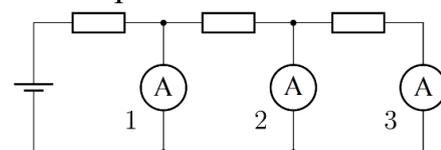
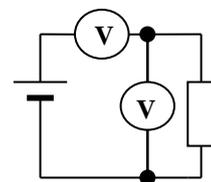
### I. Вопросы (блиц):

1. Ученик по ошибке включил вольтметр вместо амперметра при измерении величины тока в цепи. Что при этом произошло с накалом нити лампы? Что покажет вольтметр?
2. Три одинаковых резистора соединены параллельно. Общее сопротивление цепи увеличивается на 700 Ом, когда один из резисторов отключается и присоединяется последовательно двум оставшимся. Каково сопротивление каждого резистора? 600 Ом.
3. По ошибке на лабораторной работе ученик поменял местами вольтметр и амперметр в схеме. Он собрал цепь, схема которой изображена на рисунке. Что показали его приборы, если их считать идеальными? Напряжение источника по-прежнему 4,5 В, а сопротивление резистора 3 Ом. 4,5 В. 0
4. Почему сопротивление вольтметра всегда должно быть значительно больше, чем сопротивление того участка, на концах которого измеряется напряжение?
5. Почему шунт к амперметру, измеряющему большие токи, будет иметь большую массу?
6. Четыре резистора соединены последовательно и имеют сопротивления  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом,  $R_4 = 3$  Ом. К цепочке в точках А и В подводят напряжение  $U = 10$  В. Какое напряжение  $U_3$  покажет вольтметр, присоединенный к резистору  $R_3$ ? Ответ: 5 В
7. На сколько равных частей требуется разрезать проводник сопротивлением 64 Ом, чтобы, соединив эти части параллельно, получить сопротивление 1 Ом.
8. Как измерить сопротивление резистора с помощью амперметра и вольтметра с неизвестными внутренними сопротивлениями?



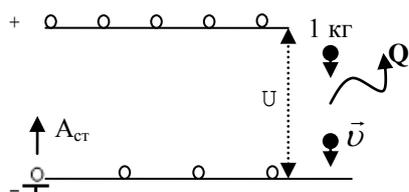
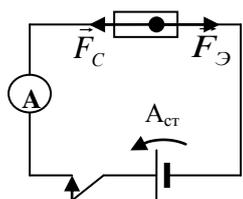
### II. Задачи (блиц):

1. Одинаковые резисторы соединены кольцом. Омметр, подключенный к одному резистору, показывает сопротивление 16 Ом, а подключенный к двум последовательным резисторам – 24 Ом. Сколько резисторов в кольце? Чему равно сопротивление каждого из них? 5. 20 Ом
2. Два одинаковых вольтметра соединены последовательно и подключены к батарее. Параллельно одному из вольтметров подключен резистор, при этом показания вольтметров составляют 1,4 В и 3,1 В. Отключим теперь один из вольтметров. Что будет показывать оставшийся прибор? Напряжение батарейки можно считать неизменным. 2,47 В
3. Цепь, схема которой представлена на рисунке, собрана из трех одинаковых резисторов и трех одинаковых амперметров. Показания первого и третьего вольтметров  $I_1 = 10$  мА и  $I_3 = 4$  мА соответственно. Найдите показания  $I_2$  второго амперметра. Связываем токи через напряжения, решая 3 уравнения, получаем  $R_A = R \frac{2}{3}(1 + \sqrt{2})$  . 6,5 мА



уравнения, получаем  $R_A = R \frac{2}{3}(1 + \sqrt{2})$  . 6,5 мА

**III.** Схема простейшей электрической цепи. Механическая аналогия замкнутой электрической цепи. Какую работу совершает электрическое поле, перемещая заряд 1 Кл



$$A' = qU = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t.$$

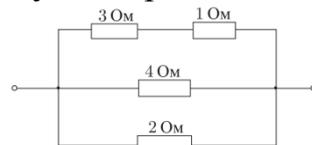
клеммы "+" на клемму "-" источника тока, если напряжение между

клеммами  $U$ ? А если перемещает заряд  $q$ ?

Для цепи с резистором:  $A' = Q = I^2Rt$ . Если в цепи есть электродвигатель, то:  $A' = Q + A$ . **Электрическая мощность (P)** - свойство электрического тока совершать работу за данный промежуток времени, измеряемое отношением произведенной работы к этому промежутку. **Единицы мощности в СИ:**  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$ . Зная мощность потребителя, можно рассчитать **работу электрического тока:**  $A' = P \cdot t$ . **Единица работы в СИ:**  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}$ . Употребляемая единица  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$ .

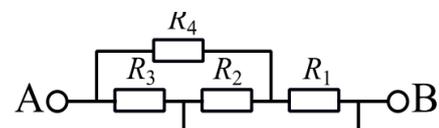
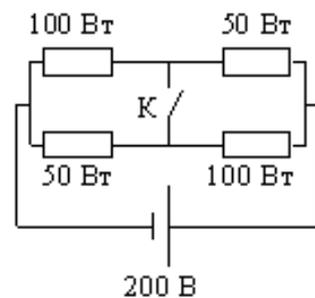
**IV. Задачи:**

1. Электромотор постоянного тока подключили к напряжению 200 В. Сопротивление обмотки якоря равно 2 Ом. При каком значении тока через обмотку полезная мощность мотора будет максимальной? Чему она равна? Каков при этом КПД мотора? 50 А. 5 кВт. 50 %.
2. Четыре проводника с сопротивлением 1 Ом, 2 Ом, 3 Ом и 4 Ом соединили так, что общее сопротивление цепи оказалось равным 1 Ом. Какая мощность  $P$  развивается в проводнике сопротивлением 2 Ом, когда через проводник сопротивлением 3 Ом идет ток 3 А? Ответ:  $P = 72 \text{ Вт}$ .



**V. Олимпиада.**

1. К источнику постоянного напряжения 200 В подключена схема из четырех резисторов, как показано на рисунке. На двух резисторах выделяется мощность 50 Вт, на других двух - 100 Вт. Найдите сопротивления резисторов и мощности, которые будут выделяться, если замкнуть ключ К. Ответ:  $R_1 = 178 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 89 \text{ Ом}$ .  $P'_1 = 56,25 \text{ Вт}$ .  $P'_2 = 112,5 \text{ Вт}$
2. В цепи, схема которой представлена на рисунке к задаче, сопротивления резисторов  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 6 \text{ Ом}$ .



- Найдите эквивалентное сопротивление  $R_{06}$  цепи. 3,58 Ом
- Контакты А и В подключают к источнику постоянного напряжения  $U = 10 \text{ В}$ .
- Найдите мощность  $P$ , которая рассеивается на всей цепи. 28 Вт
- На каком резисторе рассеивается наименьшая мощность? 2
- Найдите эту наименьшую мощность  $P_{\text{мин}}$ .

3. Сопротивление  $R$  спирали зависит от температуры по закону  $R = R_0 + \alpha(t - t_0)$ , где  $t$  - температура спирали,  $R_0 = 10 \text{ Ом}$ ,  $\alpha = 40,0 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . На спираль подаётся напряжение  $U = 220 \text{ В}$ , и за время  $\tau_1 = 100 \text{ мкс}$  она

нагревается от  $t_0$  до  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ . При данных температурах и временах излучением и теплоотдачей можно пренебречь.

1) До какой температуры  $t_2$  нагреется спираль за время  $\tau_2 = 334$  мкс от момента включения?  $t_2 = 188^\circ\text{C}$

2) Определите теплоёмкость спирали.  $C = 7,2 \cdot 10^{-3}$  Дж/  $^\circ\text{C}$

*Вопросы (блиц):*

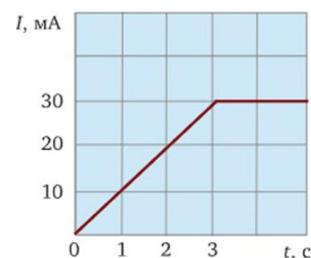
1. Остается ли постоянной мощность, потребляемая лампочкой, при различных накалах?
2. Электроплитку мощностью 440 Вт и электроплитку мощностью 880 Вт включили в сеть, соединив их последовательно.
  - 1) В какой из плиток выделяется больше теплоты? в первой
  - 2) Во сколько раз? 2
3. Почему молния расщепляет деревья?
4. Через спираль лампочки карманного фонаря каждую минуту переносится такой же заряд, как и при ударе молнии. Почему же столь несопоставимы производимые ими эффекты?
5. Иногда перегоревшую лампочку удается заставить снова светиться, встряхивая ее. Почему "ожившая" лампочка светит ярче?
6. За какое время две одинаковые параллельно соединенные спирали дадут такое же количество теплоты, которое выделяется при их последовательном соединении за 20 минут?
7. Лампочку, рассчитанную на напряжение 110 В, включили в сеть с напряжением 220 В через реостат. Чему равно КПД цепи?
8. «Падение» напряжения указывает, сколько энергии на единицу заряда выделяется в виде света и тепла на данном участке цепи. Так ли это?
9. Три резистора соединены последовательно и подключены к источнику тока постоянного напряжения. Сопротивления резисторов:  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 4$  Ом. Как нужно изменить сопротивление второго резистора, чтобы мощность, выделяемая на нем, уменьшилась в 2 раза, а на первом резисторе выделялась прежняя мощность? Как изменится при этом мощность, выделяемая на третьем резисторе?

**Разное**

1. Электромотор с сопротивлением обмотки 7 Ом потребляет ток силой 2 А и имеет при этом КПД 96%. Какую механическую работу совершает мотор за время 3 с? 2016 Дж
2. В цепь батареи с ЭДС  $\varepsilon = 24$  В включен электромотор. Нагруженный мотор потребляет мощность в  $n = 10$  раз большую, чем при работе холостую. Разность потенциалов на клеммах мотора при нагрузке  $U$  падает на 20% по сравнению с разностью потенциалов при холостом ходе  $U_1$ . Ток через мотор при нагрузке  $I = 5$  А. Найти сопротивление подводящих проводов  $R$ . Внутренним сопротивлением батареи пренебречь. 
$$R = \frac{0,2\varepsilon}{I(1 - \frac{0,8}{n})} \approx 1 \text{ Ом.}$$
3. На диаграмме показана зависимость силы тока от времени в проводнике. Рассчитать количество теплоты, выделенное в проводнике сопротивлением  $R =$

700 Ом, за промежуток времени от 0 до 5 с. 1,9 Дж

4. Конденсатор емкостью  $C = 100$  мкФ заряжается постоянным током через резистор сопротивлением  $R = 100$  кОм. Через какое время  $\tau$  после начала зарядки энергия, запасенная в конденсаторе, станет равной энергии, выделенной на резисторе? Первоначально конденсатор был не заряжен. 20 с



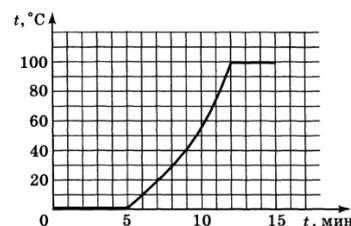
5. Профессор МГТУ им. Баумана делает ремонт у себя дома. На кухне он положил электрический теплый пол площадью  $6 \text{ м}^2$  с питанием от сети напряжением 220 В. Во время работы этого теплого пола по нему идет ток в 3 А. Определите, сколько стоит непрерывная работа одного квадратного метра теплого пола в ноябре, если стоимость электроэнергии в доме профессора 5,43 рубля за кВт·ч. 430 рублей.

### Олимпиада.

1. Зависимость силы тока от времени в проводнике, сопротивление которого  $R = 12$  Ом, имеет вид  $I = 5,0 - 0,20t$ , где все в единицах СИ. Температура проводника поддерживается постоянной. Определить количество теплоты, выделенной в проводнике за время убывания силы тока до нуля. 2,5 кДж

2. В дне теплоизолированного сосуда (калориметра) имеется небольшое отверстие, через которое может вытекать вода. В сосуд поместили смесь воды и льда при температуре  $0^\circ\text{C}$  вместе с электрическим нагревателем мощностью  $P = 600$  Вт, и начали следить за изменением температуры содержимого калориметра в зависимости от времени.

Экспериментальный график зависимости температуры  $t$  от времени  $\tau$  представлен на рисунке.



1) Определите массу воды, оставшейся в калориметре к моменту окончания таяния льда.

2) Какая средняя масса воды вытекла из отверстия калориметра в течение 1 мин?

3) Сколько льда было в калориметре в начале эксперимента?

4) Сколько воды находилось в калориметре в начале эксперимента?

5) Определите массу воды, оставшейся в калориметре к концу эксперимента ( $t = 17$  мин). Удельная теплота парообразования воды  $L = 2260$  кДж/кг, удельная теплоёмкость воды  $c_v = 4,2$  кДж/(кг·К), удельная теплота плавления льда  $\lambda = 340$  кДж/кг. Примечание. Теплоёмкость калориметра можно не учитывать.

1) 0,86 кг; 2) 0,074 кг; 3) 0,53 кг; 4) 0,70 кг; 5) 0

### Занятие 23. ЭДС источника тока.

#### I. Вопросы (блиц):

1. По стальной проволоке пропускают ток такой силы, что она слегка накаляется. Почему при охлаждении одной части проволоки другая ее часть нагревается сильнее?

2. Две лампы мощностью 50 Вт и 100 Вт, рассчитанные на напряжение 220 В, включены в сеть последовательно. Какая из них горит ярче? первая

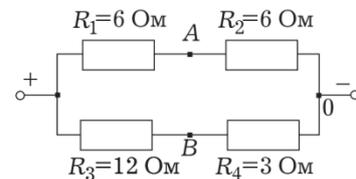
3. Улица в сельской местности освещена лампами, питаемыми генератором небольшой мощности. Почему в том конце улицы, который находится дальше

от генератора, лампы менее накалены?

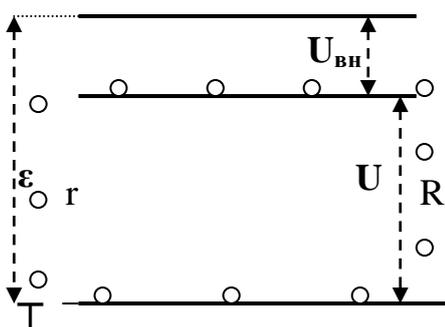
- Две электрические лампочки включены в сеть параллельно. Сопротивление первой лампочки  $R_1 = 360 \text{ Ом}$ , второй –  $R_2 = 240 \text{ Ом}$ . Какая из лампочек поглощает большую мощность и во сколько раз? 1,5
- Вагон освещается пятью лампочками, включенными последовательно. Уменьшится ли расход электроэнергии, если уменьшить число ламп до четырех?
- Проволочный предохранитель перегорает, если напряжение на нем равно 10 В. При каком напряжении перегорит предохранитель, изготовленный из того же материала, если его длину увеличить в 2 раза, полагая, что вся выделившаяся теплота идет на нагревание и плавление проволоки?
- Почему при уменьшении размеров провода в два раза, тепловыделение с единицы его поверхности при той же силе тока увеличивается в 8 раз?
- Цилиндрический однородный проводник подключен торцами к клеммам источника постоянного напряжения. Как нужно изменить длину проводника, чтобы скорость его нагрева током возросла в 4 раза. Потерями тепла пренебречь.

**II. Задачи (блиц):**

- Лабораторная электроплитка, сопротивление спирали которой  $R = 20 \text{ Ом}$ , включена в сеть последовательно с резистором сопротивлением  $R_0 = 10 \text{ Ом}$ . При длительном включении плитка нагрелась от комнатной температуры  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  до максимальной температуры  $t_1 = 52^\circ\text{C}$ . До какой максимальной температуры  $t_x$  нагреется плитка, если параллельно ей включить ещё одну такую же плитку?  $38^\circ\text{C}$
- Какое напряжение покажет идеальный вольтметр, включённый между точками А и В электрической цепи, изображённой на рисунке? Напряжение источника тока 60 В. 18 В



**III. Механическая аналогия замкнутой электрической цепи. Какую работу совершает электрическое поле, перемещая заряд с клеммы минус на клемму плюс. Работа сторонних сил:  $A_{ст} = q \mathcal{E}$ ,  $\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$ . Подключим гальванический элемент к резистору. Механическая модель цепи. Почему  $U < \mathcal{E}$ ? Чему равно  $U_{вн}$ ? Как зависит  $U$  и  $U_{вн}$  от  $R$ ?  $\mathcal{E} = U + U_{вн}$  – экспериментальная проверка.  $U = IR$ ,  $U_{вн} = I \cdot r$ ,  $\mathcal{E} = U + I \cdot r$ . Рассмотреть случаи: 1)  $I = 0$ ;  $U = \mathcal{E}$  (цепь разомкнута); 2)  $r = 0$ ;  $\mathcal{E} = U$  (идеальный источник тока); 3)  $r \neq 0$ ,  $I \neq 0$ ,  $U < \mathcal{E}$ .**



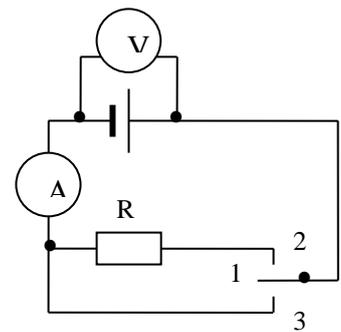
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Источник тока имеет две характеристики: **электродвижущая сила (ЭДС) и внутреннее сопротивление.**

**Задача:** Внутреннее сопротивление источника тока 0,5 Ом, а его ЭДС 1,5 В. Сопротивление потребителя 2,5 Ом. Сопротивление амперметра и подводящих

проводов ничтожно мало, а сопротивление вольтметра очень велико. Определить показания амперметра и вольтметра для положений 1, 2 и 3 переключателя П.

**Полезная мощность. Полная мощность. КПД источника тока.** Полезная мощность максимальна при  $R = r$ , при этом КПД цепи  $\eta = 50\%$ . Чем меньше  $r$  и больше  $R$ , тем больше КПД источника тока, однако  $P_n$  не максимальна!



#### IV. Задачи:

1. Определить ток короткого замыкания  $I_0$  для аккумуляторной батареи, если при токе нагрузки  $I_1 = 5$  А она отдает во внешнюю цепь мощность  $P_1 = 9,5$  Вт, а при токе нагрузки  $I_2 = 8$  А – мощность  $P_2 = 14,4$  Вт. 62 А
2. Мультиметр DT-838 в режиме вольтметра имеет внутреннее сопротивление  $R_V = 1$  МОм. В первом опыте батарею с некоторым внутренним сопротивлением подключают к резистору сопротивлением  $R_1 = 1$  кОм а мультиметром в режиме вольтметра измеряют напряжение  $U_1$  на резисторе. Во втором опыте батарею мультиметр в режиме вольтметра и резистор сопротивлением  $R_2 = 2$  кОм подключают последовательно В такой цепи показания мультиметра составляют  $U_2$ . Оказалось, что  $U_1 = U_2$ . Определите внутреннее сопротивление  $r$  батареи, считая её ЭДС  $\mathcal{E}$  постоянной, но неизвестной. Ответ дайте численно и в общем виде. 2 Ом
3. При измерении напряжения на зажимах элемента вольтметром с внутренним сопротивлением  $R_1 = 20$  Ом было получено значение  $U_1 = 1,37$  В, а при замыкании элемента на амперметр с внутренним сопротивлением  $R_2 = 10$  Ом получено значение тока  $I = 0,132$  А. Найти ЭДС и внутреннее сопротивление элемента.  $\mathcal{E} = 1,42$  В.

#### V. Олимпиада.

1. Источник тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 100$  В с внутренним сопротивлением  $R_0 = 10$  Ом подключен к электрическому чайнику. Определить, с какой скоростью вырывается из носика чайника пар, когда вода кипит, если мощность, выделяемая в чайнике, максимальна? Площадь носика чайника  $S = 4,0$  см<sup>2</sup>. 0,47 м/с
2. К батарее с ЭДС  $\mathcal{E} = 6$  В подключили последовательно идеальный амперметр и вольтметр. Когда параллельно вольтметру подключили резистор, показания амперметра удвоились, а вольтметра – вдвое уменьшились. Определите исходные показания вольтметра. Выразить  $r$  и  $R$  через  $R_V$ , потом 4 В.

#### Вопросы (блиц):

1. Почему гальванический элемент с небольшой - порядка нескольких вольт - ЭДС может дать значительный ток, а электрофорная машина, ЭДС которой достигает десятков тысяч вольт, дает ток ничтожной силы?
2. Какую работу  $A$  совершает источник тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 12$  В за  $t = 5$  с, если ток в цепи  $I = 3$  А?  $A = \mathcal{E}It = 180$  Дж.
3. Автомобильные аккумуляторы считают разряжёнными, если: а) лампы осветительной сети машины горят слабо; б) при изменении числа оборотов двигателя автомобиля накал лампы изменяется. Дайте объяснение этим

признакам.

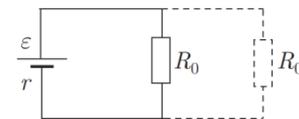
4. При каких условиях от данного элемента можно получить максимальный ток?
5. Потребителю сопротивлением  $R = 0,1$  Ом требуется питание током  $I = (6,0 \pm 0,5)$  А. Достаточно ли будет одного гальванического элемента с электродвижущей силой  $\varepsilon = 1,8$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,3$  Ом?
6. Чему равно внутреннее сопротивление  $r$  аккумуляторной батареи, если при ее разряде через внешнюю цепь с сопротивлением  $R = 3$  Ом во внешней цепи выделяется  $\eta = 90\%$  запасенной энергии?  $1/3$  Ом
7. Как будет изменяться напряжение на клеммах источника тока при увеличении тока в цепи?
8. Правильно ли утверждение, что вольтметр, подключенный к клеммам разомкнутого источника, показывает ЭДС?
9. Внутреннее сопротивление источника тока равно  $3$  Ом. Разность потенциалов на зажимах батареи измерили вольтметром, сопротивление которого  $200$  Ом. Сколько процентов от действительного значения ЭДС составит ошибка, если измеренное значение принять равным ЭДС?  $1,5\%$
10. Почему при включении в сеть электроутюга (электроплитки) накал ламп в квартире сразу же заметно падает, но вскоре возрастает, достигая примерно прежнего уровня?
11. Изменится ли напряжение на клеммах источника постоянного тока, если параллельно с ним включить конденсатор?
12. Как определить сопротивление данного вольтметра, если имеется другой вольтметр, сопротивление которого известно?
13. Во сколько раз сопротивление  $R$  нагрузки должно быть больше внутреннего сопротивления  $r$  источника тока, чтобы при расчетах силы тока в цепи, если пренебречь величиной  $r$ , ошибка не превысила бы  $1,0\%$ ?  $R = 99 \cdot r$
14. От каких факторов зависит внутреннее сопротивление аккумулятора?
15. Почему при коротком замыкании напряжение на клеммах источника тока близко к нулю, ведь ток в цепи имеет наибольшее значение?
16. В двух цепях, содержащих каждая источник тока и резистор, максимальные силы тока одинаковы, а полезная максимальная мощность в одном случае в два раза больше, чем во втором. Какими параметрами отличаются эти цепи?

### Разное.

1. Резисторы, сопротивления которых  $2$  Ом и  $8$  Ом, поочередно подключаемые к батарее, потребляют одинаковую мощность  $8$  Вт. Какую максимальную мощность на внешней нагрузке можно получить от данного источника тока?
2. Сила тока в сопротивлении  $R = 8$  Ом изменяется по закону  $I = k\sqrt{t}$ , где  $k = A/\sqrt{c}$ . Найти количество теплоты, выделившееся на сопротивлении  $R$  в течение первых  $5$  секунд. Ответ:  $Q = 1$  Дж.
3. Батарейка с ЭДС  $4,5$  В и внутренним сопротивлением  $1$  Ом подключена через ключ к последовательно соединенным резистору сопротивлением  $5$  кОм и конденсатору большой емкости. Чему равна сила тока в момент времени, когда напряжение на конденсаторе достигло  $3$  В? Как она изменяется после замыкания ключа? Как она изменяется при параллельном соединении конденсатора и резистора.

4. Сопротивление  $R_0$  потребляет мощность  $P$ . Если к нему подключить параллельно еще такое же сопротивление  $R_0$ , то в них обоих выделяется та же мощность  $P$ . Дать простейшую схему, в которой это возможно,

и ее расчет.  $r = R_0/\sqrt{2}$ . Для  $\varepsilon$  получаем:  $\varepsilon = \sqrt{PR_0} (1 + \sqrt{2}) \frac{1}{\sqrt{2}}$



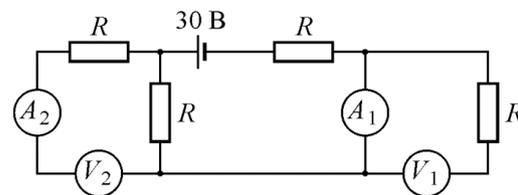
5. Конденсатор переменной емкости подключен к источнику, электродвижущая сила которого  $\varepsilon = 100$  В. Определить силу тока в цепи при равномерном изменении электроемкости от 200 до 1000 пФ за промежуток времени  $t = 0,50$  с. 0,4 мкА

6. Какую максимальную механическую мощность  $P_{\max}$  может развить электромотор, включенный в сеть постоянного тока с напряжением  $U = 120$  В, если сопротивление обмоток мотора  $R = 20$  Ом? Каков при этом коэффициент полезного действия мотора  $\eta$ ? 180 Вт. 0,5

7. Чему равен КПД электромотора постоянного тока, если в момент его включения в сеть сила тока 15 А, а в установившемся режиме сила тока 9 А? 0,4

### Олимпиада.

1. Школьник собрал электрическую цепь, схема которой показана на рисунке. Источник питания с напряжением на выводах 30 В имеет пренебрежимо малое внутреннее сопротивление. Одинаковые вольтметры и одинаковые амперметры идеальны. Сопротивление  $R$  равно 50 Ом.



1) Что показывает амперметр  $A_1$ ? Ответ выразите в мА, округлите до целого числа.

2) Что показывает вольтметр  $V_2$ ? Ответ выразите в В, округлите до целого числа.

3) Затем школьник поменял местами амперметр  $A_1$  с вольтметром  $V_1$  и амперметр  $A_2$  с вольтметром  $V_2$ .

4) Что показывает амперметр  $A_1$ ? Ответ выразите в мА, округлите до целого числа.

5) Что показывает вольтметр  $V_1$ ? Ответ выразите в В, округлите до целого числа.

Школьник снова присоединил приборы на первоначальные места (см. рис.). Затем он поменял местами амперметр  $A_1$  и вольтметр  $V_2$ .

6) Что показывает амперметр  $A_2$ ? Ответ выразите в мА, округлите до целого числа.

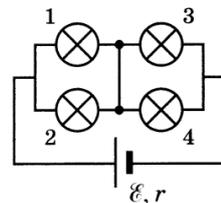
7) Что показывает вольтметр  $V_1$ ? Ответ выразите в В, округлите до целого числа.

2. Когда к источнику постоянного напряжения подключили вольтметр, то он показал напряжение  $(11,765 \pm 0,002)$  В. При подключении к этому источнику двух таких вольтметров, соединенных параллельно, каждый из них показал напряжение  $(11,538 \pm 0,002)$  В. Найдите отношение внутренних сопротивлений вольтметра и источника и оцените возможную ошибку результата. Ответ  $R/r \approx 49 \pm 1$ . Для оценки точности можно применить, например, «интервальный» метод: взять максимальные и минимальные в пределах ошибки значения  $U_1$  и  $U_2$ , получим максимальное

и минимальное значение  $z$  :  $z_{\min} = 48,939$  и  $z_{\max} = 50,749$  . Как видно, отклонения от «среднего» значения примерно равны  $\Delta z = 0,9$ .

## Занятие 24. Уравнения Кирхгофа.

### I. Вопросы (блиц):



1. Чем больше лампочек подключено параллельно к источнику тока, тем тусклее горит каждая из них. Почему?
2. Определите КПД источника тока в цепи, схема которой изображена на рисунке. Все лампы, включенные в цепь, имеют одинаковое сопротивление 20 Ом. Внутреннее сопротивление источника тока 2 Ом. 91%.
3. Имеются два подобных друг другу гальванических элемента, изготовленных из идентичных материалов, все размеры которых отличаются в 2 раза. Как соотносятся электрические характеристики этих элементов: ЭДС, внутреннее сопротивление, эффективное время работы на постоянную нагрузку? ЭДС источника неизменная, уменьшится в 2 раза, возрастет в 8 раз (в 8 раз больше электролита).
4. Определите внутреннее сопротивление источника питания, ЭДС которого 6 В, если сила тока короткого замыкания 400 мА. Ответ:  $r = 15$  Ом.
5. Во сколько раз сопротивление  $R$  нагрузки должно быть больше внутреннего сопротивления  $r$  источника тока, чтобы при расчетах силы тока в цепи, если пренебречь величиной  $r$ , ошибка не превысила бы 1,0%?  $R = 99 \cdot r$
6. К источнику тока с ЭДС  $\varepsilon = 8$  В подключена некоторая нагрузка. При этом напряжение на зажимах источника составляет  $U = 6,4$  В. Найти КПД цепи. 80 %
7. Два потребителя подключаются к электрической батарее: один раз последовательно, другой – параллельно. В каком случае КПД будет больше?
8. Как определить сопротивление данного вольтметра, если имеется другой вольтметр, сопротивление которого известно?

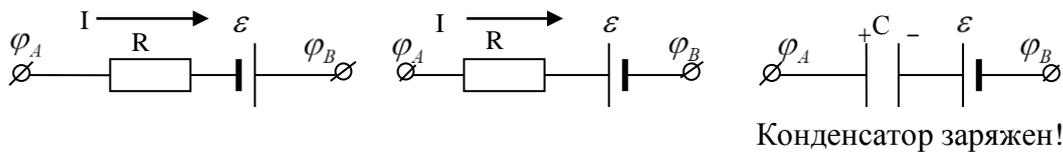
### II. Задачи (блиц):

1. В сеть с напряжением  $U = 24$  В включен электромотор. Нагруженный мотор потребляет мощность в  $k = 10$  раз большую, чем при работе холостую. Разность потенциалов на клеммах мотора при нагрузке падает на  $n = 20\%$  по сравнению с разностью потенциалов при холостом ходе. Определить мощность тепловых потерь в подводящих проводах при холостом ходе, если сила нагрузочного тока  $I = 5,0$  А. 0,16 В
2. При увеличении внешнего сопротивления цепи в 5 раз напряжение на зажимах источника возросло с 10 В до 30В. Какова ЭДС источника? 60 В
3. Два вольтметра, соединенных между собой последовательно, подключены к клеммам источника тока и показывают напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . При подключении только одного первого вольтметра, он показывает напряжение  $U_3$ . Определите ЭДС источника тока.  $\varepsilon = \frac{U_2 U_3}{U_3 - U_1}$
4. Известно, что ЭДС источника постоянного тока равна  $\varepsilon = (4,50 \pm 0,02)$  В, а его внутреннее сопротивление равно  $r = (0,50 \pm 0,05)$  Ом. К этому источнику подключили амперметр, и он показал величину силы тока  $I = (5,0 \pm 0,2)$  А. Определите внутреннее сопротивление амперметра и оцените ошибку Вашего результата.  $R_A \approx (0,40 \pm 0,09)$  Ом (методом границ).

### III. Способы соединения одинаковых источников тока:

#### Последовательное соединение. Параллельное соединение.

#### Закон Ома для участка электрической цепи, содержащего ЭДС:



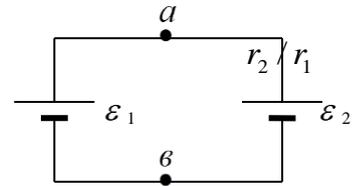
$$IR + Ir - \varepsilon = \varphi_A - \varphi_B;$$

$$IR + Ir + \varepsilon = \varphi_A - \varphi_B;$$

$$U_c + \varepsilon = \varphi_A - \varphi_B.$$

**Пример 1:** Аккумулятор с ЭДС 25 В и внутренним сопротивлением 1 Ом заряжается от сети с напряжением 40 В через резистор сопротивлением 5 Ом. Найти напряжение на зажимах аккумулятора.

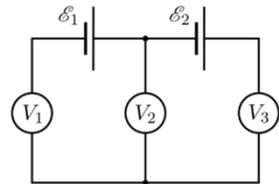
**Метод узловых потенциалов. Пример 1:** Два аккумулятора с ЭДС  $\varepsilon_1 = 57$  В и  $\varepsilon_2 = 32$  В соединены как показано на рисунке. Какова разность потенциалов между точками а и в, если отношение внутренних сопротивлений аккумуляторов = 1,5? Каковы ЭДС батареи и внутреннее сопротивление?



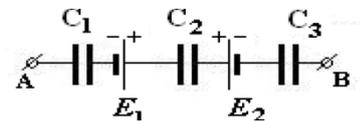
#### Законы Кирхгофа.

#### IV. Задачи:

1. Электрическая цепь, схема которой приведена на рисунке, собрана из двух разных источников и трёх одинаковых вольтметров. ЭДС правого источника известна и равна  $\varepsilon_2 = 10$  В, правый вольтметр показывает напряжение  $U_3 = 12$  В. Найти показания двух остальных вольтметров и ЭДС левого источника. Внутренним сопротивлением источников пренебречь.  $U_1 = 10$  В,  $U_2 = 2$  В,  $\varepsilon_1 = 12$  В



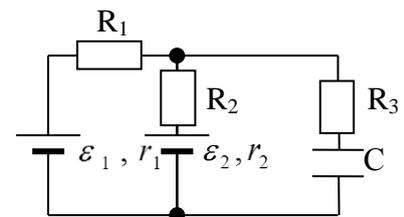
2. В некоторой цепи имеется участок, показанный на рисунке. ЭДС источников  $\varepsilon_1 = 1$  В,  $\varepsilon_2 = 2$  В, напряжение на участке равно  $\varphi_A - \varphi_B = 3$  В. Ёмкости конденсаторов  $C_1 = 20$  мкФ,  $C_2 = 30$  мкФ,  $C_3 = 60$  мкФ. Найти напряжение на каждом конденсаторе.  $U_1 = 1$  В.  $U_2 = 2/3$  В.  $U_3 = 1/3$  В.



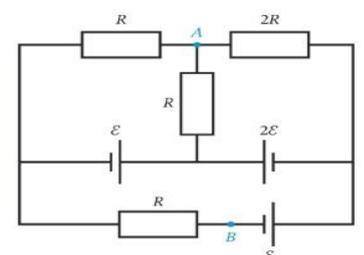
3. Замкнутая цепь образована двумя аккумуляторами, по ошибке соединенными в батарею разноименными полюсами. ЭДС и внутренние сопротивления источников:  $\varepsilon_1 = 12$  В,  $r_1 = 0,1$  Ом;  $\varepsilon_2 = 6$  В;  $r_2 = 0,2$  Ом. Определить силу тока в данной цепи и разность потенциалов на полюсах источников тока. 20 А, 0.

#### V. Олимпиада.

1. Генератор постоянного тока с ЭДС  $\varepsilon_1 = 12$  В и внутренним сопротивлением  $r_1 = 0,2$  Ом заряжает аккумулятор с ЭДС  $\varepsilon_2 = 10$  В и внутренним сопротивлением  $r_2 = 0,6$  Ом. Параллельно аккумулятору включена лампочка с сопротивлением  $R = 3$  Ом. Определите ток через аккумулятор и лампочку 1,58 А, 3,65 А



2. Найти заряд конденсатора, если  $C = 2$  мкФ,  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = R_3 = 3$  Ом,  $r_1 = 0,25$  Ом,  $r_2 = 0,75$  Ом,  $\varepsilon_1 = 4$  В,  $\varepsilon_2 = 2$  В.



3. В схеме, изображенной на рисунке, определите разность

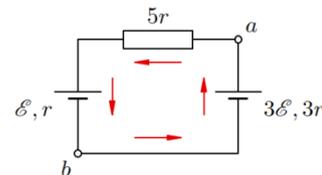
потенциалов точек А и В:  $\varphi_A - \varphi_B$ . Источник питания считайте идеальным. Известно, что напряжение на нем  $U = 10$  В. 22 В

*Вопросы (блиц):*

1. В каких случаях целесообразно последовательное соединение одинаковых источников тока в батарею, а в каких – параллельное.
2. Три одинаковые батареи, соединенные параллельно, подключены к внешнему резистору. Как изменится сила тока в резисторе, если поменять полярность клемм одной из батарей?
3. Можно ли подключить непосредственно к зажимам источника ЭДС амперметр, вольтметр?
4. Два одинаковых источника тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$  соединены одноименными полюсами (разноименными полюсами). Определите показания идеального амперметра и вольтметра.
5. Как определить сопротивление данного вольтметра, если имеется другой вольтметр, сопротивление которого известно?
6. Чтобы увеличить ток, протекавший в цепи одного аккумулятора, к нему присоединили второй. Однако, как при последовательном, так и при параллельном соединении этих аккумуляторов получался меньший ток. В каком случае это возможно?

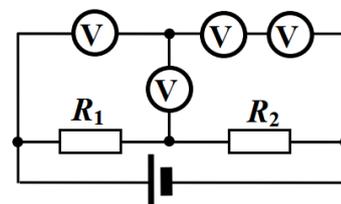
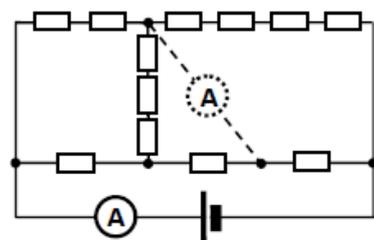
**Разное**

1. Три батареи аккумуляторов с ЭДС 12 В, 5 В и 10 В и одинаковыми внутренними сопротивлениями в 1 Ом, соединены между собой одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов ничтожно мало. Определить силы токов, идущих через каждую батарею.  $I_1 = 3$  А,  $I_2 = 4$  А,  $I_3 = 1$  А.
2. Два источника тока с ЭДС  $\varepsilon$  и  $3\varepsilon$  и внутренними сопротивлениями соответственно  $r$  и  $3r$  включены в цепь последовательно (соединены одноименные клеммы источников). Последовательно с источниками подключен резистор сопротивлением  $5r$  (см. рисунок). Найдите силу тока в цепи и разность потенциалов между точками а и b.  $\varphi_a - \varphi_b = (7/3)\varepsilon$



**Олимпиада.**

1. Из 12 одинаковых резисторов и аккумулятора собрана схема, показанная на рисунке. У нас есть практически идеальный амперметр. Если подключить его непосредственно к аккумулятору, то он покажет силу тока  $I_0 = 11$  А. Если включить его в схему так, как показано на рисунке, то его показания изменятся на  $I = 1,1$  А. Определите показания амперметра после переноса его в положение, показанное пунктиром (ветвь с источником при этом не разрывается). Сопротивление соединительных проводов пренебрежимо мало. 0,5 А
2. Ученик собрал цепь, схема которой показана на рисунке, из аккумулятора, двух резисторов и четырех одинаковых вольтметров, сопротивление которых равно  $R_V = 2$  МОм. ЭДС источника  $\varepsilon = 12$  В, а его внутреннее сопротивление  $r = 2$  Ом. Сопротивления резисторов  $R_1 = 6$



Ом и  $R_2 = 4$  Ом. Определите показания всех вольтметров.

## Занятие 25. Магнитное поле тока.

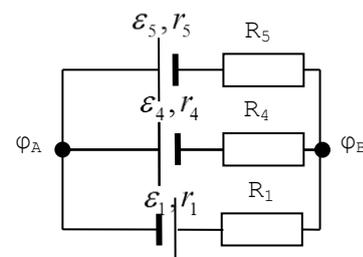
### I. Вопросы (блиц):

1. Все обладатели плееров как один говорят, что чем больше сопротивление наушников – тем быстрее садится батарейка. Так ли это?
2. Какие свойства электрического тока измеряет амперметр, вольтметр, омметр?
3. Как соединить большое число одинаковых элементов, чтобы во внешней цепи получить максимальную мощность?
4. Некоторое число  $n$  одинаковых источников тока, соединенных параллельно, подключены к внешнему сопротивлению. Если переключить полярность одного источника, то сила тока во внешнем сопротивлении уменьшится в 2 раза. Определите значение  $n$ . Ответ:  $n = 4$ .
5. При силе тока 1,5 А напряжение на участке некоторой цепи равно 20 В. При силе тока 0,5 А напряжение на этом участке равно 8 В. Определить ЭДС, действующую на этом участке.
6. Какими станут ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока, зашунтированного сопротивлением  $R$ ? Определите ЭДС элемента, если при увеличении внешнего сопротивления цепи в  $n$  раз разность потенциалов на зажимах элемента, равная  $U$ , увеличивается на  $k$  процентов.

$$\varepsilon = U \left( 1 + \frac{k}{1 - \frac{1}{n} - \frac{k}{n}} \right)$$

### II. Задачи (блиц):

1. Вольтметр, подключенный к параллельно соединенным одинаковыми полюсами элементам с  $\varepsilon_1 = 1,5$  В и  $\varepsilon_2 = 2$  В, показал напряжение  $U = 1,7$  В. Чему равно отношение внутренних сопротивлений элементов?  $r_1/r_2 = 2/3$
2. В схеме, показанной на рисунке, резисторы имеют сопротивления  $R_4 = 50$  Ом,  $R_5 = 10$  Ом. ЭДС источников тока  $\varepsilon_1 = 9$  В,  $\varepsilon_4 = 6$  В и  $\varepsilon_5 = 2$  В, внутреннее сопротивление которых равно нулю. Определить токи  $I_4$  и  $I_5$ , сопротивление резистора  $R_1$  и разность потенциалов  $\varphi_A - \varphi_B$ .  $I_4 = I_5 = 0,1$  А,  $R_1 = 50$  Ом,  $\varphi_A - \varphi_B = 1$  В.
3. Два параллельно соединенные сопротивления 7 Ом и 8 Ом и параллельно же подключенного к ним плоского конденсатора с площадью пластин  $6 \text{ м}^2$ , диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 12 и толщиной 0,14 мм, подключены последовательно к зажимам батареи, ЭДС которой 36 В, а внутреннее сопротивление 2 Ом. Начертите цепь. Найдите:
  - 1) ток короткого замыкания; ток через каждое сопротивление. 18 А; 3,36 А; 2,94 А.
  - 2) напряжение на параллельном соединении; емкость конденсатора; заряд конденсатора; напряженность электростатического поля между пластинами. 23,5 В; 4,55 мкФ; 107 мкКл; 168 кВ/м.
  - 3) проверить баланс мощностей. 227 Вт, 79 Вт, 69 Вт, 79 Вт.



### III. Основные свойства магнитного поля:

1. Магнитное поле создается проводниками с током (движущимися заряженными частицами) и намагниченными телами.

2. Магнитное поле действует на проводники с током (движущиеся заряженные частицы) и на намагниченные тела. Магнитное поле материально.

Как обнаружить магнитное поле в пространстве?

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие.

Измерение индукции магнитного поля с помощью рамки с током:  $B = \frac{M_{\max}}{I \cdot S}$ .

Говорят, что магнитное поле задано, если известна магнитная индукция в каждой его точке!

**Магнитное поле прямого проводника с током:**  $B = \mu \cdot \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r}$ .

**Магнитное поле кольцевого тока:**  $B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}$ .

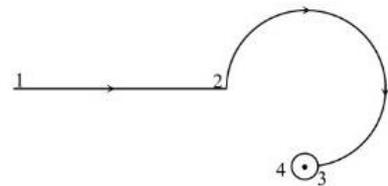
**Магнитное поле соленоида:**  $B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I$ .

**Закон Био-Савара-Лапласа** (вычисление вектора индукции поля в заданной точке):  $\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta l \sin \theta}{4\pi r^2}$ , где  $\theta$  – угол между направлением элемента тока в проводнике и радиус-вектором.

#### IV. Задачи:

1. Проволочный виток радиусом 5 см находится в однородном магнитном поле напряженностью 2 кА/м. Плоскость витка образует угол  $60^\circ$  с направлением поля. По витку течет ток 4 А. Найдите вращающий момент, действующий на виток. 39,5 мкН·м

2. Бесконечный провод, по которому течет ток  $I$ , согнут следующим образом: провод 1-2 – полу бесконечный, прямой и расположен в плоскости рисунка; провод 2-3 представляет собой три четверти окружности радиуса  $R$ , провод 3-4 – полу бесконечный, прямой, расположен перпендикулярно плоскости рисунка, а ток по нему течет «на нас». Найти индукцию магнитного поля в центре кольца 2-3. Известно, что продолжение провода 1-2 проходит через центр окружности.  $B = \frac{\mu_0 I}{8\pi R} \sqrt{9\pi^2 + 4}$



3. Над центром кругового витка на расстоянии  $d = 3$  см от него параллельно плоскости витка проходит длинный прямой провод с током  $I_2 = 5$  А. Сила тока в витке  $I_1 = 3$  А, его радиус  $R = 8$  см. Определить индукцию магнитного поля (модуль и направление вектора  $B$ ) в центре витка. 46 мкТл

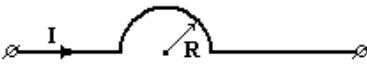
#### V. Олимпиада.

1. Индукция магнитного поля Земли вблизи магнитных полюсов примерно равна  $10^{-4}$  Тл. Предположим, что такое поле создается кольцевым током радиуса 5000 км, протекающим в плоскости экватора. Чему должна равняться сила такого тока?  $8,0 \cdot 10^5$  А.

2. Найти величину индукции магнитного поля в точке  $A$ , создаваемого горизонтальным током  $I$  в длинном прямолинейном проводе с «петлей» в форме окружности радиуса  $R$  в средней его части. Плоскость «петли» также горизонтальна. Точка  $A$  расположена над центром петли на расстоянии, равном ее диаметру.

3. Непроводящая сфера радиусом 10 мм, заряженная равномерно с поверхностной плотностью  $15 \text{ мкКл/м}^2$ , вращается с угловой скоростью 20 рад/с вокруг оси, проходящей через ее центр. Найти магнитную индукцию в центре сферы. Ответ:  $B = 2,96 \cdot 10^{-12} \text{ Тл}$ .
4. Шарик радиуса  $r$  и массы  $m$  удерживается на неподвижном шаре радиуса  $R$  невесомой нитью длины  $\ell$ , закрепленной в верхней точке шара  $C$ . Других точек соприкосновения между нитью и шаром нет. Пренебрегая трением, найдите натяжение нити.  $T = mg \frac{\ell + r}{R}$

*Вопросы (блиц):*

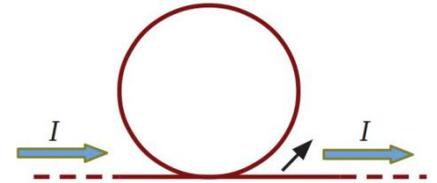
1. Воспользовавшись принципом суперпозиции, доказать, что величина индукции поля соленоида в центре одного из его торцов в два раза меньше, чем внутри соленоида.
2. Контур с током имеет вид, показанный на рисунке. Сила тока равна  $I$ . Найти величину магнитной индукции в центре полуокружности радиуса  $R$ . 
3. По двум одинаковым кольцевым проводникам, имеющим общий центр и расположенным в перпендикулярных плоскостях, текут одинаковые токи. Модуль вектора магнитной индукции в общем центре проводников равен  $B$ . Какой будет магнитная индукция в той же точке, если прежний ток пойдет только по одному проводнику?  $B/\sqrt{2}$
4. Как соотносятся магнитные поля в соленоидах при одинаковом токе? При одинаковом токе внутри соленоида магнитные поля складываются и усиливают друг друга, а снаружи соленоида — вычитаются и уничтожаются.
5. Кабель состоит из центрального и наружного проводника, который своей цилиндрической поверхностью охватывает центральный провод. Существует ли магнитное поле вокруг кабеля, если по проводникам проходит ток одинаковой силы противоположного направления? одинакового направления?
6. Два одинаковых витка радиусом  $R = 5 \text{ см}$  расположены параллельно настолько близко друг к другу, что их центры практически совпадают. По виткам пропускают токи  $I_1 = I_2 = I = 10 \text{ А}$ : Найти магнитную индукцию  $B$  результирующего поля в центре витков в случаях, когда токи направлены: а) в одну сторону; б) в противоположные стороны.  $25 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ . 0
7. Что и как необходимо сделать, чтобы в соленоиде без сердечника индукция магнитного поля выросла в два раза, при уменьшении силы тока вдвое?
8. По двум параллельным проводникам в одном направлении текут одинаковые токи. Определите направление вектора магнитной индукции в точке между проводниками.
9. Почему при разгоне электрички метрополитена стрелка компаса устанавливается перпендикулярно направлению движения вагона? Почему этот эффект особенно заметен, если компас положить на сиденье?

**Разное**

1. За промежуток времени  $\Delta t = 10,0 \text{ с}$  работа по разделению зарядов в источнике тока составила  $A_{\text{ст}} = 12,0 \text{ кДж}$  при потребляемой мощности  $P = 1,16 \text{ кВт}$  и

напряжении на полюсах источника  $U = 11,6$  В. Найти внутреннее сопротивление источника тока.  $0,004$  Ом

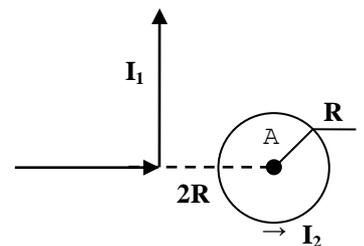
2. Длинный изолированный прямой провод с током образует посередине петлю в виде кольца радиусом  $15$  см, так что прямая часть провода проходит по касательной к кольцу. Индукция магнитного поля, созданного током в центре кольца, равна  $50$  мкТл. Найти силу тока в проводнике.  $9,1$  А



3. Проволочное кольцо с током находится в однородном магнитном поле, индукция которого  $0,01$  Тл. Сила тока в кольце  $0,5$  А. Радиус кольца  $2$  см. Какой максимальный момент сил может действовать на кольцо со стороны магнитного поля?  $6,28 \cdot 10^{-6}$  Н·м
4. Определите величину тока в кольцевом проводнике радиусом  $20$  см, который содержит  $8$  витков проволоки, если помещенная в центре на острие магнитная стрелка отклонилась на угол  $30^\circ$ . Плоскость кольцевого тока совпадает с плоскостью магнитного меридиана. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли  $18$  мкТл.  $0,4$  А
5. При подключении вольтметра к клеммам одного аккумулятора он показывает напряжение  $U_1 = 20,0$  В, а при подключении к четырем таким же аккумуляторам, соединенным параллельно – напряжение  $U_4 = 22,4$  В.
- 1) Два таких вольтметра соединили параллельно и подключили к трем таким аккумуляторам, соединенным последовательно. Каковы показания каждого из этих вольтметров?  $35,0$
  - 2) Какое напряжение покажет идеальный вольтметр, если подключить его к одному такому аккумулятору?  $20,3$  В

### Олимпиада.

1. По двум бесконечно длинным параллельным проводам текут одинаковые по величине токи. В первом случае токи направлены одинаково, во втором – противоположно. Найдите отношение максимального значения магнитной индукции в точке, равноудаленной от обоих проводов в первом и во втором случаях. Ответ:  $2$
2. Магнитное поле создано проводниками с током  $I_1 = I_2 = 1$  А.  $R = 1$  см. Найти индукцию магнитного поля в точке А.  $57,8$  мкТл
3. По проводнику согнутому в виде квадратной рамки со стороной  $a = 10$  см, течёт ток силой  $5$  А. Определить магнитную индукцию поля в точке, равноудалённой от вершины квадрата на расстояние, равное длине его стороны.  $20$  мкТл



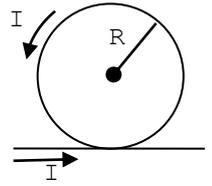
### Занятие 26. Сила Ампера.

#### I. Вопросы (блиц):

1. Докажите, что в центре длинного соленоида на его оси индукция магнитного поля в два раза больше, чем возле его края?
2. Сверхпроводящее кольцо с током перекручивают, превращая его в «восьмерку» из двух одинаковых колец. Затем «восьмерку» складывают так, что получается

одно двойное кольцо. Как изменится индукция магнитного поля в центре кольца по сравнению с первоначальной индукцией?

3. Бесконечно длинный тонкий проводник, по которому течет ток 120 А, переходит в окружность радиуса 11 см. Определите индукцию магнитного поля в центре окружности. 903 мкТл



4. О чем «говорит» (информирует нас) картина магнитного поля, полученная с помощью железных опилок?

5. Два бесконечных прямых провода с токами  $I_1 = I_2 = 1$  А находятся на расстоянии 60 см друг от друга. Найти индукцию магнитного поля в точке, расположенной посередине между ними, если в них текут токи противоположного направления. 1,3 мкТл

6. По медной трубе, в направлении ее продольной оси, течет ток. Намагнитится ли стальной стержень, помещенный в эту трубу?

7. Какова магнитная индукция в центре проволочного ромба, если батарейку подключить к вершинам ромба, лежащим на одной диагонали?

8. К двум произвольным точкам проволочного кольца подведены идущие радиально провода, соединенные с весьма удаленным источником тока. Чему равна индукция магнитного поля в центре кольца?

9. Проволочное кольцо с током свободно подвешено на мягких подводящих проводах и охватывает посередине магнита. Что произойдет с кольцом, если изменить направление тока в нем на противоположное направление?

## II. Задачи (блиц):

1. Длинный изолированный проводник с током  $I_1 = 10$  А расположен перпендикулярно плоскости кругового витка с током  $I_2 = 3$  А, касаясь его в одной точке. Радиус витка  $R = 3$  см. Найти магнитную индукцию (модуль и направление вектора) поля, созданного обоими проводниками в центре витка. 70 мкТл.  $73^\circ$ .

2. Имеются два кольца с током, имеющие общий центр и расположенные в одной плоскости. Радиус первого кольца 10 см, радиус второго – 5 см, сила тока в первом кольце 50 А, во втором – 30 А. Токи имеют противоположные направления. Чему равна магнитная индукция в центре колец. 62,8 мкТл

3. По двум параллельным проводникам бесконечной длины, находящимся на расстоянии 5 см друг от друга, текут токи по 10 А. Определить модуль и направление вектора магнитной индукции в точке, находящейся на расстоянии 3 см от первого проводника и 4 см от второго. Направление токов выбирается произвольно. 8,3 мкТл

**III. Сила Ампера** (демонстрация). Эта сила перпендикулярна как индукции магнитного поля, так и проводнику с током.  $F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$ .

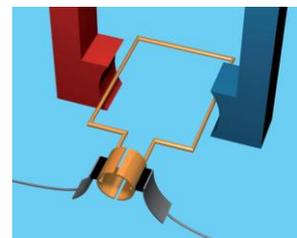
Правило левой руки для определения направления силы Ампера. Количественное исследование зависимости силы Ампера от модуля вектора магнитной индукции, силы тока в проводнике, длины активной части проводника, угла между направлением магнитной индукции и направлением тока:

Взаимодействие **параллельных токов** (последовательные рассуждения с выводом формулы):  $F_{12} = F_{21} = F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi \cdot r} \Delta l$ .

Электроизмерительный прибор, его назначение. Приборы **магнито-электрической системы**. Принцип действия прибора.  $M_{max} = IBNS$  – максимальный вращающий момент, действующий на рамку током в магнитном поле. Он максимален, если угол между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{n}$  равен  $90^\circ$ , а если угол равен  $0^\circ$ , то и момент равен нулю (демонстрация). Поэтому, в общем случае, момент сил, действующих со стороны магнитного поля на рамку с током, определяется формулой:  $M_{max} = IBNS \rightarrow \vec{M} = \vec{P}_M \times \vec{B}$ .  $\vec{P} = IN\vec{S}$  – магнитный дипольный момент катушки с током или, например, магнитной стрелки.

**Электродвигатель** постоянного тока. Принцип его действия.

Обозначение на электрических схемах.



#### IV. Задачи:

1. Прямой проводник, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции на гладком горизонтальном столе, при пропускании по нему тока силой 1 А приобрел ускорение  $2 \text{ м/с}^2$ . Площадь поперечного сечения проводника  $1 \text{ мм}^2$ , плотность материала проводника  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Чему равна индукция магнитного поля? 30 мТл
2. Прямолинейный проводник длиной 20 см и массой 25 г лежит на горизонтальной поверхности в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл. При протекании тока в течение 1 с проводник подпрыгнул на высоту 5 см. Вычислить прошедший заряд. Силовые линии поля направлены горизонтально и перпендикулярны к проводнику. 2,75 Кл
3. По трем длинным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии 250 мм друг от друга, протекают токи силой 5, 10 и 15 А соответственно. В первом и третьем проводниках ток протекает в одном направлении, во втором – навстречу ему. Найти значение и направление силы, действующей на единицу длины третьего проводника. 74,4 мкН. Вниз под углом  $6,17^\circ$  к вертикали.

#### V. Олимпиада.

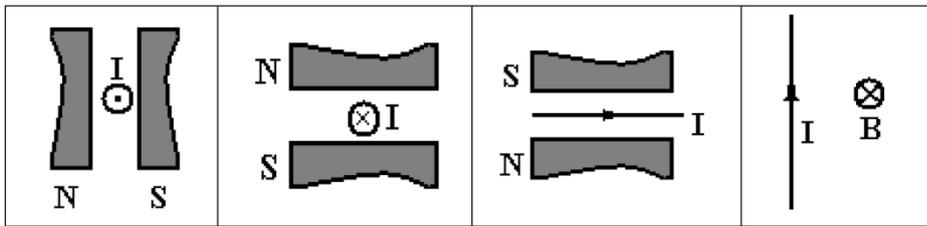
1. Найти отношение силы кулоновского отталкивания к силе амперова притяжения двух параллельных электронных пучков, прошедших ускоряющую разность потенциалов 10 кВ. 25
2. Тонкий проводник в виде полукольца радиусом  $R = 5 \text{ см}$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 10 \text{ мТл}$ . Плоскость полукольца перпендикулярна линиям магнитной индукции, а подводящие провода расположены вдоль линий  $\vec{B}$ . По проводнику протекает ток  $I = 50 \text{ А}$ . Определите силу  $\vec{F}$ , действующую на проводник.  $F = 2IBR$ . 0,05 Н
3. Виток с током диаметром 10 см помещён в магнитное поле с индукцией 90 Тл, направленное перпендикулярно плоскости витка. Какой максимальный ток можно пропускать через этот виток, если прочность провода равна 200 Н? Ответ: 44 А.
4. Круговой виток с током 0,2 А свободно установился в магнитном поле с индукцией 0,4 Тл и затем его повернули на  $45^\circ$ , совершив работу 0,2 Дж. Чему равен радиус витка? 1,65 м
5. Проводящая рамка в форме равностороннего треугольника выполнена из проволоки длиной  $\ell$  и массой  $m$ . Рамка неподвижно лежит на гладком

горизонтальном столе и помещена в однородное магнитное поле, линии индукции которого параллельны одной из сторон рамки. Рамка обтекается постоянным током силой  $I$ . При каком значении магнитной индукции рамка начнет двигаться? Влиянием подводющих проводов пренебречь. Сделайте рисунок, на котором укажите все силы, действующие на рамку. Рамку поворачивает пара сил, действующих на две другие стороны рамки. Правило моментов.

$$B_{\min} = \frac{4mg}{\sqrt{3} \cdot I\ell}$$

*Вопросы (блиц):*

1. В магнитное поле, направленное в доску, помещен провод, по которому течет ток справа налево. Определите направление силы Ампера.
2. Как будут взаимодействовать между собой витки соленоида, если по ним потечет: а) постоянный ток; б) переменный ток?
3. Ток в горизонтальном проводе течет с юга на север. Куда направлена сила, действующая на провод со стороны магнитного поля Земли в Томске?
4. Прямолинейный ток  $I_1$  проходит по оси кругового тока  $I_2$ . С какой силой взаимодействуют эти токи?
5. В начале XX в. был изобретен «электродинамический ускоритель массы», или рельсотрон. Рассмотрим простейшую модель. Пусть магнитное поле однородное и модуль его вектора магнитной индукции равен  $B = 0,1$  Тл. Предположим, что через изначально покоившийся стержень массой  $m = 1$  кг пропустили короткий импульс электрического тока, разрядив через него батарею конденсаторов емкостью  $C = 1$  мФ, заряженный до напряжения  $U = 10$  кВ. Расстояние между рельсами равно  $L = 1$  м.
  - 1) Какую скорость  $V$  приобретет в результате этого стержень? 1 м/с
  - 2) Пусть через стержень, находящийся в том же магнитном поле, пропускают постоянный ток силой 10 кА, и он при этом разгоняется, проходя вдоль рельсов расстояние  $S = 5$  м. Какую скорость приобретет стержень в этом случае, если его трение о рельсы мало? 100 м/с.
  - 3) Оцените, на какое максимальное расстояние от рельсотрона можно запустить такой стержень, если наклонить рельсы под углом к горизонту, сохраняя перпендикулярность вектора магнитной индукции плоскости рельсов?  $x_{\max} = V^2/g = 104/10 = 1000$  м.
  - 4) При испытаниях опытного образца рельсотрона, созданного в 2008 г., снаряду массой около 2,5 кг удалось сообщить начальную скорость 2,5 км/с. Оцените, какую массу воды можно превратить в пар если израсходовать на это всю кинетическую энергию такого снаряда.
6. Проволочное кольцо с током свободно подвешено на мягких подводных проводах и охватывает посередине магнита. Что произойдет с кольцом, если изменить направление тока в нем на противоположное направление?
7. Почему «гудят» провода в линиях электропередачи?
8. Почему замкнутый подвижный проводник, по которому идет ток, стремится принять форму кольца, даже если он не находится в магнитном поле?
9. На приведенных ниже рисунках укажите направление силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле.

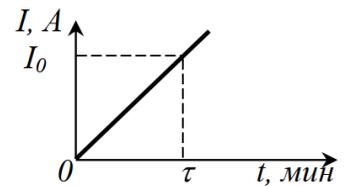


### Разное

1. Молния ударила в железную мачту высотой 7 м и диаметром 10 см, причем электроны движутся вниз по мачте. Если разность потенциалов между вершиной и основанием мачты равна 20 кВ, то какую величину и направление имеет индукция магнитного поля на расстоянии 50 см к северу от мачты? 100 Тл
2. Определить вращающий момент плоского контура площадью  $0,08 \text{ м}^2$ , помещенного в однородное магнитное поле с индукцией 20 Тл, если по контуру течет ток 10 А, а плоскость контура составляет с линиями индукции угол  $30^\circ$ . 13,86 Н·м
3. Золотой диск радиусом  $R$  может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр. К ободу диска и к его оси подведены скользящие контакты, с помощью которых диск подсоединен к источнику с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ . Суммарное сопротивление подводящих проводов равно  $R_{\text{пр}}$ . Диск находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B$ , линии индукции этого поля горизонтальны. Какую минимальную силу  $F$  надо приложить к краю диска, чтобы диск оставался неподвижным? Силой трения пренебречь. Удельное сопротивление золота считать пренебрежимо малым. Ответ:  $F_{\text{min}} = \varepsilon BR / (R_{\text{пр}} + r)$ .
4. Прямой медный провод с током находится в магнитном поле с индукцией  $B = 175 \text{ мТл}$ . При каком минимальном значении напряженности  $E$  электрического поля внутри провода сила Ампера и сила тяжести, действующие на провод, уравновешены? 8,6 мН/Кл

### Олимпиада.

1. На горизонтальном столе лежит прямолинейный проводник массой  $m$  и длиной  $\ell$ . Линии однородного магнитного поля направлены перпендикулярно проводнику под углом  $\alpha$  к поверхности стола. Ток в проводнике медленно изменяется по закону, приведённому на рисунке. В какой момент времени проводник начнёт двигаться? Коэффициент трения между стержнем и поверхностью стола равен  $\mu$ , модуль магнитной индукции равен  $B$ . Влиянием подводящих проводов пренебречь.



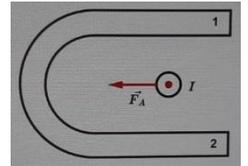
### Занятие 27. Сила Лоренца.

#### I. Вопросы (блиц):

1. Объясните, почему прямоугольный проволочный виток с током всегда будет стремиться установиться в магнитном поле так, чтобы плоскость витка была перпендикулярна к полю. Как действуют силы на виток в таком положении? Где это явление можно использовать в технике?
2. Около длинного полосового магнита, установленного вертикально, расположен гибкий свободный проводник. Как расположится проводник, если по нему

пропустить ток сверху вниз?

3. Где северный полюс у магнита на рисунке? 2
4. Почему без магнитов не было бы движения в электрическом двигателе?
5. Почему не проскакивает «магнитная искра» при приближении двух магнитов друг к другу?
6. Два длинных проводника, по которым течет одинаковый ток, пересекаются, не соприкасаясь, под прямым углом. Опишите магнитные силы, с которыми один проводник действует на другой.
7. В одном из двух одинаково длинных «черных ящиков» находится постоянный магнит, а в другом – длинная катушка из медной проволоки, подключенная к батарее. Как определить, в каком из них находится постоянный магнит?



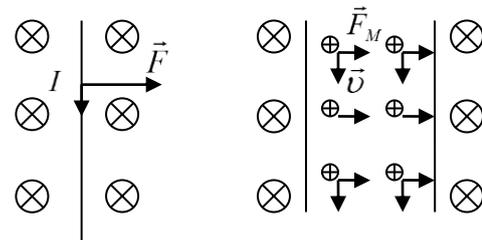
**II. Задачи (блиц):**

1. В горизонтальном однородном магнитном поле находится в равновесии незакрепленный горизонтальный прямолинейный проводник из меди с поперечным сечением  $1,0 \text{ мм}^2$ . Какой ток течет по проводнику при индукции поля  $10^{-2} \text{ Тл}$ ? Проводник расположен перпендикулярно полю.  $I = 8,7 \text{ А}$ .
2. Подвешенный горизонтально на двух невесомых нитях прямолинейный проводник находится в однородном магнитном поле, вектор индукции которого направлен вертикально. Если по проводнику течет ток  $I_1 = 1 \text{ А}$ , то нити отклоняются от вертикали на угол  $\alpha_1 = 30^\circ$ . При какой силе тока  $I_2$  в проводнике нити отклонятся на угол  $\alpha_2 = 60^\circ$ ? 3 А
3. Прямоугольная проволочная рамка расположена в одной плоскости с длинным прямым проводом так, что две ее стороны длинами 80 см параллельны проводу, стороны, длиной 50 см – перпендикулярны. По проводу течет ток 2,5 А. Ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии 10 см. Определите силу тока текущего по рамке, если сила, действующая на рамку, равна 0,1 Н. 30 кА

**III. Действие магнитного поля на проводник с током (демонстрация). На что действует магнитное поле? На ток (упорядоченно движущиеся заряженные частицы)?!**

$$I = q_0 n v S; \quad F_A = N \cdot q_0 \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

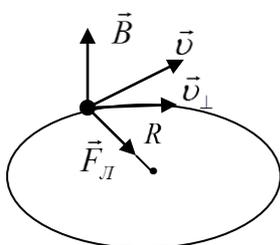
Сила, действующая со стороны магнитного поля на каждую движущуюся заряженную частицу (сила Лоренца):  $F_L = q_0 \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$ .



**Анализ формулы:**

1. Магнитное поле действует только на движущиеся заряженные частицы. Магнитная сила (сила Лоренца) – относительна!
2. Сила равна нулю, если движение происходит вдоль линий магнитного поля, и максимальна, если скорость частицы перпендикулярна магнитной индукции.
3. Направление силы определяется с помощью правила левой руки.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле. Циклотрон.



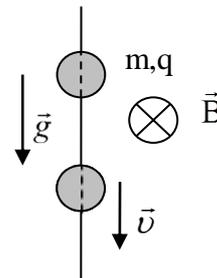
$$R = \frac{m v_{\perp}}{q B} \rightarrow R = \frac{P_{\perp}}{q B}$$

$$T = \frac{2 \pi R}{v_{\perp}} = \frac{2 \pi m}{q B}$$

$$n = \frac{1}{T} = \frac{q B}{2 \pi m}$$

#### IV. Задачи:

1. На длинную вертикальную спицу надета бусинка массы  $m$  и зарядом  $q$ . Перпендикулярно спице приложено магнитное поле с индукцией  $B$ . Если бусинку отпустить, то, падая вниз, она через какое-то время приобретает постоянную скорость  $v$ . Найдите коэффициент трения между бусинкой и спицей.  $\mu = \frac{mg}{qvB}$

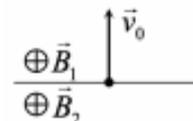


2. В небольшом циклотроне с максимальным радиусом 0,5 м протоны ускоряются в магнитном поле с индукцией 1,7 Тл, Рассчитайте кинетическую энергию протонов, покидающих циклотрон. 34,8 МэВ

3. Протон влетает со скоростью 14,8 км/с в область пространства, где имеется электрическое поле с напряженностью 117,2 В/м и магнитное поле с магнитной индукцией 27,5 мТл, которые совпадают по направлению. Определите ускорение протона в начальный момент времени, если направление вектора его скорости перпендикулярно этим полям. 40,8 Гм/с<sup>2</sup>

#### V. Олимпиада.

1. В двух областях создана однородные магнитные поля с индукциями  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  ( $B_2 = 2B_1$ ), векторы которых параллельны. Частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  находится на границе раздела полей и имеет скорость  $v_0$ , направленную перпендикулярно границе раздела. Найти среднюю скорость смещения частицы вдоль границы раздела полей за



большое время.  $S = d_1 - d_2$  за 2 полупериода.  $v_{cp} = \frac{2v_0}{\pi} \left( \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1} \right) = \frac{2v_0}{3\pi}$

2. Два электрона движутся с одинаковой по модулю скоростью  $v$  в однородном магнитном поле. В некоторый момент расстояние между ними равно  $2R$ , а скорость электронов перпендикулярна магнитному полю и прямой, соединяющей электроны. При какой индукции магнитного поля расстояние между электронами остается неизменным? Электроны движутся в разные стороны и вращаются вокруг их общего центра масс.  $B = \frac{mv}{eR} = \frac{ke}{4vR^2}$

3. Свободная заряженная частица движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  по окружности радиусом  $R$ . В некоторый момент времени включают однородное электрическое поле, напряженность  $E$  которого направлена параллельно магнитной индукции. Через какое время  $\Delta t$  после включения электрического поля кинетическая энергия частицы увеличится в  $n = 2$  раза? Силу тяжести не учитывать. Ответ.  $\Delta t = \sqrt{n-1} \cdot \frac{BR}{E}$ .

4. Заряженная частица движется равномерно прямолинейно в скрещенных по прямым углом однородных электрическом и магнитном полях. Найдите отношение времен  $n = t_1/t_2$ , за которые при выключении магнитного  $t_1$  или электрического  $t_2$  полей вектор скорости частицы составляет с первоначальным направлением угол  $\alpha = 45^\circ$ . Силой тяжести пренебречь.  $n = 4/\pi = 1,27$

*Вопросы (блиц):*

1. Почему жидкий проводник при пропускании по нему тока стремится уменьшить площадь своего поперечного сечения?
2. В какую сторону отклонится горизонтальный пучок положительных ионов, движущийся справа налево, если к нему сверху поднести магнит?
3. В однородное магнитное поле под одинаковыми углами к линиям  $\vec{B}$  с одинаковыми скоростями влетают электрон и протон. Одновременно ли они выйдут из области поля?
4. Влияет ли движение заряженной частицы в магнитном поле на индукцию этого поля?
5. Чем объяснить, что кривизна траектории электрона, движущегося в магнитном поле, после прохождения сквозь металлическую фольгу увеличивается?
6. Если через ионизированный газ (плазму) пропустить электрический ток, то плазма сжимается (пинч-эффект) в виде плазменного шнура. Пинч-эффект используется для тепловой изоляции горячей плазмы от стенок трубки при получении управляемой термоядерной реакции синтеза. Почему происходит сжатие плазмы при этих условиях?
7. В электронном микроскопе для фокусировки электронного пучка используется магнитная линза. Простейшая магнитная линза представляет собой катушку с током. Рассеянный пучок электронов фокусируется, проходя через магнитное поле катушки. Как это объяснить?
8. Начальная скорость электрона составляет некоторый угол с совпадающими по направлению векторами напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Каков характер движения электрона?
9. Почему два параллельных проводника, по которым текут токи в одном направлении, притягиваются, а два параллельных пучка электронов – отталкиваются?
10. Утверждают, что при приближении кометы к Солнцу на ее голову налетает солнечный ветер, который захватывает своим магнитным полем ионы кометного газа, и гонит их прочь от Солнца. Так ли это?
11. Почему в Канаде северные сияния бывают чаще, чем в Сибири, расположенной на той же географической широте?
12. Если через ионизированный газ (плазму) пропустить электрический ток, то плазма сжимается (пинч-эффект) в виде плазменного шнура. Пинч-эффект используется для тепловой изоляции горячей плазмы от стенок трубки при получении управляемой термоядерной реакции синтеза. Почему происходит сжатие плазмы при этих условиях?
13. Будет ли устойчивым движение заряженной частицы вдоль линии индукции однородного магнитного поля?
14. Электрон, обладающий скоростью  $v$ , движется в однородном и постоянном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , перпендикулярном к его скорости. Найти величину момента количества движения  $L$  электрона.
15. Железо намного более проницаемо для магнитного поля, чем воздух, поэтому оно втягивается в него. Как это понимать?

16. Как изменится период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле при увеличении её скорости в два раза?

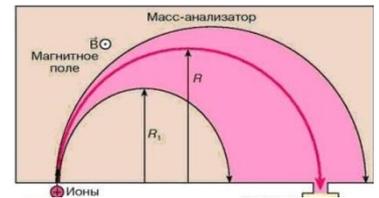
**Разное.**

1. Вдоль клина с углом  $\alpha$  при основании проложены рельсы, расстояние между которыми  $\ell$ . По рельсам с трением (коэффициент трения равен  $\mu$ ) скользит проводящий брусок массой  $m$ . Какой минимальный ток  $I$  следует пропустить через брусок, чтобы он не скользил вниз, если вся система находится в магнитном поле, индукция которого  $B$  направлена вертикально?

$$I = \frac{mg \cdot \operatorname{tg} \alpha - \mu}{B\ell}$$

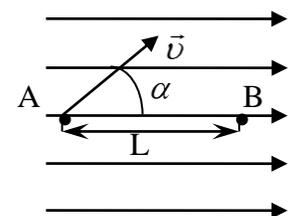
2. Протон влетает со скоростью  $2 \cdot 10^6$  м/с в область, где включено магнитное и электрическое поле. Магнитное поле с индукцией  $B = 0.4$  Тл перпендикулярно скорости частицы. Чему равно и куда направлена напряженность электрического поля, если протон продолжает двигаться прямолинейно и равномерно?  $0,8$  МВ/м

3. Однозарядный положительный ион никеля  $^{58}\text{Ni}$  ускоряется разностью потенциалов  $U = 3$  кВ и попадает в масс-спектрограф с индукцией магнитного поля, равной  $B = 0,12$  Тл. 1) Каков радиус кривизны  $r$  его орбиты в спектрографе? 1)  $r \approx 0,501$  м; 2) На сколько отличаются радиусы кривизны  $r$  и  $R$  ионов изотопов  $^{58}\text{Ni}$  и  $^{60}\text{Ni}$ ? б)  $r/R = 1,017$ ;  $R - r = 9$  мм.



4. По наклонной плоскости скатывается деревянный цилиндр, масса которого  $m = 0,25$  кг, длина  $\ell = 0,1$  м. На цилиндр намотали один виток провода так, что плоскость витка проходит через ось и параллельна наклонной плоскости. При какой силе тока в витке  $I$  цилиндр будет находиться в равновесии? Система расположена в магнитном поле, индукция которого  $B = 1$  Тл и направлена вертикально вверх.

5. Электрон влетает в однородное магнитное поле. В точке А он имеет скорость  $\vec{v}$ , которая составляет с направлением поля угол  $\alpha$ . При каких значениях индукции магнитного поля электрон окажется в точке В. Заряд электрона  $e$ , масса  $m$ , расстояние между точками А и В равно  $L$ .  $B_n = \frac{2\pi m v \cos \beta}{qL} n$



6. Определить скорость (модуль и направление) электрона, движущегося по винтовой линии, имеющей радиус  $R = 5$  см и шаг  $h = 20$  см, в однородном магнитном поле. Магнитная индукция поля  $B = 0,10$  мТл.

**Олимпиада.**

1. На шероховатом непроводящем диске, расположенном в горизонтальной плоскости, лежит точечное тело, находящееся на расстоянии  $R = 0.5$  м от центра диска, и несущее заряд  $q = 75$  мкКл. Диск равномерно вращается вокруг своей оси против часовой стрелки (если смотреть сверху), совершая  $n = 0.5$  оборота в секунду. Коэффициент трения между телом и поверхностью диска равен  $\mu = 0.6$ . Какой должна быть минимальная масса  $m$  тела для того, чтобы в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 2$  Тл, направленном вертикально вверх, тело не скользило по поверхности диска?  $0,22$  г

## Занятие 28. ЭДС в движущихся проводниках.

### I. Вопросы (блиц):

1. В каких случаях магнитное поле не отклоняет движущуюся в нем частицу?
2. Могут ли ионы разной массы, ускоренные одним и тем же электрическим полем, иметь одинаковые траектории в магнитном поле?
3. Какую величину можно определить по этой формуле:  $qV/m$ ? Циклотронную частоту
4. Электроны с кинетической энергией  $E_{Кэ}$  движутся по прямой линии в скрещенных электрическом и магнитном полях. Протоны какой энергии  $E_{Кр}$  пройдут по такой же траектории? Скорости частиц одинаковы:  $v = \frac{E}{B} \cdot \frac{E_{Кр}}{E_{Кэ}} = \frac{m_p}{m_e}$
5. Частица с зарядом 1 мКл и массой 4 мг влетает под углом  $30^\circ$  к однородному магнитному полю с индукцией 1 Тл со скоростью 20 км/с. Каков шаг винтовой линии? 435 м
6. Увеличение скорости заряженных частиц в циклотроне осуществляется исключительно за счет воздействия на частицы электрического поля. Зачем необходимо еще и магнитное поле?
7. Найти тангенциальное ускорение электрона, влетевшего в однородное магнитное поле перпендикулярно его направлению.
8. Почему уровень океана может изменяться в данном месте из-за течений?
9. Узкий канал заполнен электролитом. Если нужным образом создать электрическое и магнитное поля, то жидкость начнет течь. Почему?
10. Почему частица, движущаяся по спирали в неоднородном магнитном поле, «отражается» от области, где магнитная индукция этого поля больше?
11. Вблизи длинного прямого проводника с током пролетает протон со скоростью  $\vec{v}$ . Как направлена сила Лоренца, действующая на протон?

### II. Задачи (блиц):

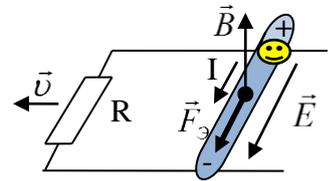
1. Ион углерода  $^{12}_6\text{C}$  влетает со скоростью  $10^6$  м/с в однородное магнитное поле, индукция которого 0,3 Тл. Ион движется по окружности радиусом 21,25 см, причем направление индукции магнитного поля перпендикулярно плоскости окружности. Сколько электронов не достает в атоме углерода? 2
2. Покоящийся в начальный момент протон ускоряется однородным электрическим полем. Через 0,05 с он влетает в магнитное поле с индукцией 1 мТл, которое перпендикулярно электрическому полю. Как и во сколько раз отличаются в этот момент нормальная и тангенциальная составляющие ускорения? 4790
3.  $\alpha$ -частица, летевшая со скоростью  $v_x = 2 \cdot 10^5$  м/с вдоль оси Ох, попадает в область пространства, где присутствуют однородные электрическое и магнитное поля, причём и напряжённость электрического поля, и индукция магнитного поля направлены вдоль оси Оу.  $E = 1000$  В/м,  $B = 0,5$  Тл. Во сколько раз изменится величина скорости частицы, когда она сделает  $N = 20$  оборотов вокруг оси ОУ? 1,6



### III. Возникновение ЭДС при движении проводника в магнитном поле.

Движение свободных положительно заряженных частиц в проводнике при его перемещении в однородном магнитном поле. Для неподвижного наблюдателя-

учителя движение свободных зарядов в проводнике вызывается **силой Лоренца** (сторонняя сила):  $F_M = q \cdot v \cdot B$ . В выражение для магнитной силы входит скорость частицы.

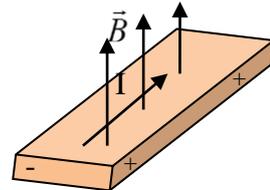


Проводник, движущийся в магнитном поле, новый источник электрического тока!

$$\varepsilon = \frac{A_{CT}}{q} = \frac{F_M \cdot \ell}{q} = v \cdot B \cdot \ell. \text{ Ток можно генерировать в проводе, движущемся в}$$

**магнитном поле!** Для наблюдателя, который движется вместе с проводником, силы Лоренца нет (заряды в проводнике покоятся), но перераспределение зарядов происходит (заряд сохраняется). Почему? В движущейся системе отсчета сторонняя сила - электрическая сила:

$$\varepsilon = \frac{A_{CT}}{q} = \frac{F_{Э} \cdot \ell}{q} = E \cdot \ell, E = v \cdot B.$$

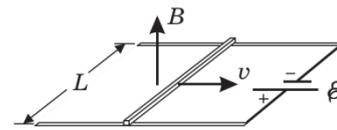


**Эффект Холла** - явление возникновения разности потенциалов при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле.

#### IV. Задачи (блиц):

4. Самолет летит горизонтально, держа курс строго на север при сильном западном ветре, имеющем скорость 40 м/с. Собственная скорость самолета 720 км/ч. Чему равна разность потенциалов между концами крыльев самолета, если размах крыльев составляет 50 м, а вертикальная составляющая магнитного поля Земли 50 мкТл? 0,49 В

5. В магнитном поле с индукцией  $B = 1$  Тл, направленной вертикально вверх, по горизонтальным рельсам равномерно движется проводящий стержень длиной  $L = 0,4$  м со скоростью  $v = 5$  м/с. Концы рельсов присоединены к батарее с ЭДС  $\varepsilon = 10,1$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,1$  Ом. Какое количество теплоты  $Q$  выделится в стержне за время  $\tau = 10$  с, если его сопротивление  $R = 10$  Ом? Сопротивлением рельсов и соединительных проводов пренебречь.  $Q \approx 64$  Дж.



6. В крови содержатся ионы, так что в ней возможно наблюдать эффект Холла. В большой артерии диаметром  $D = 0,85$  см скорость крови составляет  $v = 0,6$  м/с. Если индукция магнитного поля равна  $B = 0,2$  Тл, какая разность потенциалов  $U$  возникает по диаметру артерии?  $1,02 \cdot 10^{-3}$  В.

#### V. Олимпиада.

1. Проводник массой 100 г скользит без трения по двум длинным горизонтальным проводящим рельсам, расположенным на расстоянии 10 см друг от друга. На одном конце рельсы замкнуты сопротивлением 1 Ом. Система находится в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл. Проводнику сообщили горизонтальную скорость 20 см/с в направлении удаляющихся рельсов. Пренебрегая сопротивлением рельсов и проводника, а также магнитным полем индукционного тока, найдите расстояние, пройденное проводником до остановки. Сила тока в данный момент  $\varepsilon/R$ ,  $S = \frac{mv_0 R}{(B\ell)^2}$  а изменение импульса тела равно импульсу силы.

2. По гладким горизонтальным рельсам, проложенным на расстоянии  $\ell = 1,5$  м друг от друга и замкнутым с одного конца на конденсатор емкостью  $C = 0,3$  Ф, тянут планку массой  $m = 0,5$  кг горизонтальной силой  $F = 4$  Н. Система

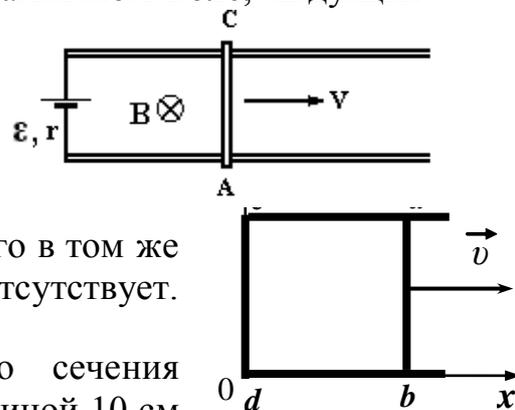
находится в вертикальном однородном магнитном поле индукции  $B = 1$  Тл. Найти ускорение  $a$  планки. Начальная скорость планки равна нулю.  $3,4 \text{ м/с}^2$

Вопросы (блиц):

1. Почему во время грозы нельзя ложиться на землю? (Самый лучший способ защиты: найти овраг или ложбину и сесть, обхватив ноги руками).
2. При каком условии напряжение на концах проводника, который движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, равно ЭДС индукции?
3. Металлический стержень, не соединенный с другими проводниками, движется в магнитном поле. Почему, не смотря на наличие ЭДС, по стержню не течет ток?
4. Как известно, пуск мощных электродвигателей во избежание сгорания обмотки якоря производится при помощи пусковых реостатов. Стартер автомашины включается без реостата. Почему?
5. Почему геомагнитные бури нарушают миграцию птиц?
6. Между концами крыльев самолета, летящего в магнитном поле Земли, натянута изолированная проволока. Можно ли экспериментально доказать наличие индуцированного электрического поля в этой проволоке?
7. По прямолинейному рельсовому пути, изолированному от земли, равномерно идет поезд. В каком-то месте оба рельса замкнуты на гальванометр. Будут ли изменяться показания гальванометра в зависимости от того, приближается поезд к гальванометру или удаляется от него?
8. По П-образному проводнику перемещается с постоянной скоростью  $v$  под действием силы  $F$  замыкающая провод перемычка. Контур находится в перпендикулярном его плоскости однородном магнитном поле с индукцией  $B$ . Чему равна сила  $F$ , если в контуре выделяется каждую секунду количество теплоты  $Q$ .  $F = Q/v$
9. Вблизи электронного пучка магнитная стрелка отклоняется. Как бы вела себя эта стрелка, если бы она двигалась вдоль пучка с той же скоростью и в том же направлении, что и электроны в пучке?

Разное

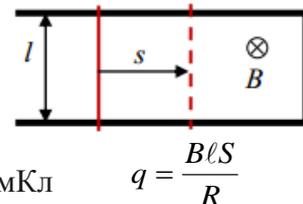
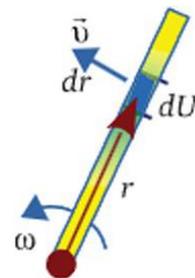
1. На горизонтальных рельсах с подключенным к ним источником тока расположен проводник  $AC$  длиной  $L = 10$  см, способный скользить по рельсам без трения. Вся система находится в однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально и равна  $B = 0,1$  Тл. Внутреннее сопротивление источника тока  $r = 0,2$  Ом, сопротивление  $R_{AC} = 0,1$  Ом, сопротивление остальных проводников пренебрежимо мало. Найти ток в цепи при движении проводника  $AC$  со скоростью  $V_1 = 10$  см/с вправо, если при движении его в том же направлении со скоростью  $V_2 = 40$  см/с ток в цепи отсутствует.  $0,01$  А
2. По П-образному проводнику  $acdb$  постоянного сечения скользит со скоростью  $2$  м/с медная перемычка  $ab$  длиной  $10$  см из того же материала и такого же сечения. Проводники, образующие контур, помещены в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции



которого направлен перпендикулярно плоскости проводников. Какова индукция магнитного поля  $B$ , если в тот момент, когда  $ab = ac$ , разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$  равна 3 мВ? Сопротивление между проводниками в точках контакта пренебрежимо мало, а сопротивление проводов велико. 5 мТл.

### Олимпиада.

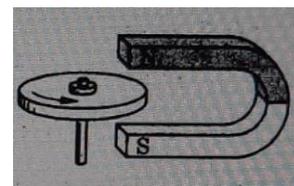
1. Кольцо из медной проволоки площадью сечения  $S = 0,5 \text{ мм}^2$  лежит неподвижно на горизонтальном столе в вертикальном магнитном поле индукции  $B = 0,01 \text{ Тл}$ . По кольцу поступательно скользит перемычка, сопротивление которой мало по сравнению с сопротивлением кольца, и им можно пренебречь. Скорость перемычки постоянна и равна  $v = 40 \text{ см/с}$ . Найти силу тока  $I$  в перемычке в тот момент, когда она проходит через центр кольца.
2. Проводящий стержень вращается в постоянном во времени однородном магнитном поле. Ось вращения параллельна силовым линиям магнитного поля и проходит через один из концов стержня перпендикулярно ему. Частота вращения  $n = 300$  оборотов в минуту, длина стержня  $\ell = 50 \text{ см}$ , индукция поля  $B = 20 \text{ мТл}$ . Найти разность потенциалов, возникающую на концах данного проводника. 79 мВ.
3. На П-образной шине с пренебрежимо малым сопротивлением лежит перемычка, длина которой  $\ell = 20 \text{ см}$ . Перемычка перпендикулярна сторонам шины. В окружающем пространстве создано магнитное поле с индукцией  $B = 0,5 \text{ Тл}$ , перпендикулярное плоскости шины. Перемычку плавно перемещают, не поворачивая, на расстояние  $s = 15 \text{ см}$ . Найти величину заряда, протекшего через перемычку за время перемещения. Сопротивление перемычки  $R = 10 \text{ Ом}$ . 1,5 мКл



### Занятие 29. Ток в металлах.

#### I. Вопросы (блиц):

1. В цепь небольшого электродвигателя последовательно с ним включают электрическую лампочку мощностью примерно равной мощности электродвигателя. В момент включения двигателя лампа загорается, а потом быстро гаснет. Если затормозить ротор, то лампа горит ярко. Объяснит явление.
2. При работе электромотора сила тока равна 0,25 А. КПД электромотора 90%. Определите, до какого значения увеличится сила тока, если полностью затормозить его ротор? 2,5 А
3. Концы сложенной вдвое проволоки присоединены к гальванометру. Почему стрелка прибора остается на нуле, когда проволока пересекает линии индукции магнитного поля?
4. С какой скоростью будет лететь электрон по прямой во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях?
5. Между полюсами подковообразного магнита вращается алюминиевый диск в направлении, указанном стрелкой. Какое направление имеет индукционный ток? К центру диска



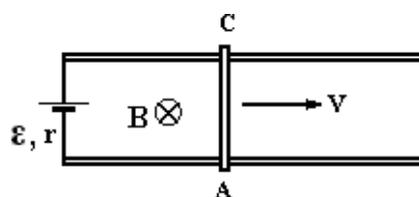
6. **Объясните** смысл следующего утверждения: «Электродвигатель работает одновременно как двигатель и как генератор».

**II. Задачи (блиц):**

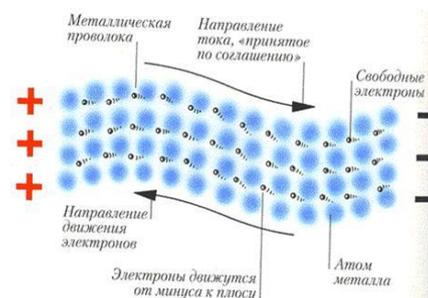
4. По горизонтальным параллельным рельсам, расстояние между которыми  $\ell$ , скользит без трения перемычка массой  $m$ . Рельсы соединены резистором сопротивлением  $R$  и находятся в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ . Перемычке сообщают скорость  $v_0$ . Какое расстояние она пройдет до остановки?  $S = \frac{mv_0 R}{(Bl)^2}$

5. В магнитном поле с индукцией  $B$  вращается стержень длиной  $\ell$  с постоянной круговой скоростью  $\omega$ . Найдите ЭДС индукции, возникающей в стержне, если ось вращения проходит через конец стержня параллельно силовым линиям магнитного поля.  $\varepsilon = \frac{B\omega\ell^2}{2}$

6. На горизонтальных рельсах с подключенным к ним источником тока расположен проводник AC, способный скользить по рельсам без трения. Вся система находится в однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально. Если проводник AC удерживать в покое, то по цепи течет ток  $I_0 = 1,6$  А. Если проводник предоставить самому себе, он начнет двигаться и приобретет скорость, установившееся значение которой  $V_0 = 3,6$  м/с. Какой ток будет протекать в цепи, если проводник перемещать в том же направлении со скоростью  $V = 5,2$  м/с? Сопротивлением рельсов пренебречь. - 0,71 А



**III. Проводники** - вещества, хорошо проводящие электрический ток (металлы, расплавы металлов, электролиты, все газы при высоких напряжениях или при низком напряжении и сильном разрежении газа). Движение свободных электронов в металле (ионы и свободные электроны). Движение свободных электронов напоминает рой танцующих комаров. Электронный газ. Тепловое движение электронного газа:



$$\frac{m_e \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \rightarrow v_{мен} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$$

Электрическое поле внутри металлического проводника. Движение электронов под действием электрического поля (перескакивание от иона к иону) в металле (дрейф - от английского – drift, снос судна). Такое путешествие электронов как раз и называется электрическим током.

**IV. Задачи:**

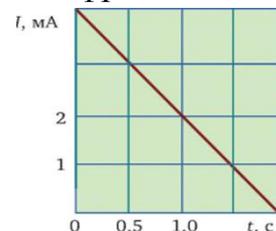
1. Какая мощность выделяется в единице объема проводника длиной 0,2 м, если на его концах поддерживается разность потенциалов 4 В. Удельное сопротивление проводника  $10^{-6}$  Ом·м. Ответ:  $\rho_{уд} = 4 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>.
2. Проводник длиной  $\ell = 0,8$  м и диаметром  $d = 0,5$  мм находится при температуре  $t_1 = 24^\circ\text{C}$ , при этом его сопротивление  $R_1$ . После нагревания до температуры  $t_2 =$

$64^{\circ}\text{C}$ , его сопротивление стало  $R_2$ .  $\rho_0 = 8,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·мм – удельное сопротивление материала при  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 6,51 \cdot 10^{-3}$   $1/^{\circ}\text{C}$ - температурный коэффициент сопротивления. 0,36 Ом, 0,44 Ом

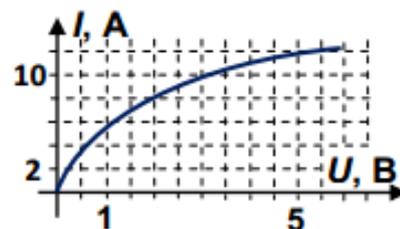
- Найдите минимальную массу медного провода, предназначенного для передачи мощности  $P = 12$  кВт на расстояние  $L = 100$  м от генератора с напряжением  $U = 220$  В, если допустимые потери мощности в линии составляют 2%.  $m = 6,25$  кг
- На гладком столе покоится отрезок медного провода длиной 1,0 м. К нему подключается напряжение 1,0 кВ. Какой будет скорость  $v = \frac{mU}{e\rho_{\text{yo}}\rho\ell}$  «отдачи» проводника в момент включения напряжения?  $3,6 \cdot 10^{-5}$  с
- Лампа накаливания потребляет из сети с напряжением  $U = 220$  В мощность  $P = 60$  Вт. Рабочая температура нити накала лампы  $T_p = 3000$  К. Чему равно сопротивление  $R_k$  неработающей лампы при температуре в комнате  $t_k = 27^{\circ}\text{C}$ , если известно, что оно пропорционально абсолютной температуре? Ответ: 80 Ом

#### V. Олимпиада.

- На диаграмме показано изменение силы тока со временем в вольфрамовой нити. Длина нити  $\ell = 2,5$  м; сечение  $S = 0,20$  мм<sup>2</sup>. Определить: а) электрическую энергию, преобразованную в теплоту за промежуток от 0 до 2 с; б) заряд, прошедший через поперечное сечение нити за то же время. Температурной зависимостью сопротивления от температуры пренебречь. 7,3 мкДж. 4 мКл.



- Нелинейный элемент, ВАХ которого показана на рисунке, подключили к источнику постоянного тока с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 0,5 Ом. Какую мощность этот элемент будет потреблять от источника? 16 Вт



- Металлический цилиндр заданных размеров совершает продольные механические колебания с частотой  $\omega$ . Приняв, что электроны свободно движутся в металле, подсчитать, какие заряды возникают на концах цилиндра.  $q = \frac{m_e \omega^2 V \epsilon_0}{e}$

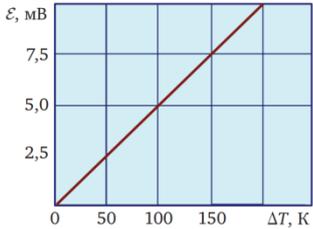
#### Вопросы (блиц):

- Почему не засоряются провода, по которым течет электрический ток?
- О каких свойствах вещества можно судить по его удельному сопротивлению?
- Электрический ток в проводнике обусловлен направленным движением электронов. Почему он не возникает при поступательном движении проводника?
- Почему многие сплавы металлов имеют гораздо большее сопротивление по сравнению с сопротивлением компонентов этих сплавов?
- Почему возникает разность потенциалов между концами громоотвода?
- Почему сопротивление металлов при освещении практически не изменяется?
- В металлической трубе переменного сечения движется электрон. Изменится ли его скорость при прохождении сужения?
- Прокомментируйте выражение: «Даже если проводник не включен в цепь с внешней ЭДС, мгновенное значение протекающего через него тока не равно нулю» (тепловой шум).
- Разрешите недоумение: тепловая скорость, с которой свободные электроны

летают внутри металла, составляет сотни метров в секунду при комнатной температуре, но когда источник сообщает им дополнительную дрейфовую скорость порядка одного миллиметра в секунду, то проводник раскаляется до высоких температур.

### Разное

1. Какую скорость направленного движения имеют свободные электроны внутри медного проводника длиной 1 м, к концам которого приложено напряжение 1 В?
2. Найдите, во сколько раз коэффициент полезного действия линии электропередачи при напряжении  $U_1 = 200$  кВ больше коэффициента полезного действия линии при напряжении  $U_2 = 100$  кВ. Сопротивление линии  $R = 0,4$  кОм, передаваемая от источника мощность  $P = 10^4$  кВт.  

$$\eta_1 = \frac{(U_1^2 - PR)}{(U_2^2 - PR)} \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = 1,5$$
3. Найти концентрацию свободных электронов в меди и в вольфраме. Считать, что в кристалле меди коллективизированы по одному электрону от каждого атома, а вольфраме — по два. Медь:  $8,46 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ; Вольфрам:  $6,74 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .
4. Определить отношения напряженностей электрического поля и скоростей упорядоченного движения электронов при одинаковой плотности тока в меди и в вольфраме. Считать, что в проводимости меди участвует по одному электрону от каждого атома, а в проводимости вольфрама — по два. 0,31. 0,08.
5. Считая, что в проводимости меди и серебра участвует по одному электрону от каждого атома, найти отношение скоростей дрейфа электронов в данных проводниках при одинаковой плотности тока.
6. Используя градуировочный график, где  $\varepsilon$  — термоЭДС;  $\Delta T$  — разность температур горячего и холодного спаев, определить удельную термоЭДС термопары. Какова температура горячего спаив, если холодный спай находится при температуре  $20^\circ\text{C}$ , а термоЭДС равна  $8,0$  мВ?  

7. Оцените, какую мощность имеет 100-ваттная лампочка в начальный момент включения её в осветительную сеть напряжением 200 В, если рабочая температура нити накаливания составляет  $2700^\circ\text{C}$ , а температурный коэффициент сопротивления вольфрама  $0,004^\circ\text{C}^{-1}$ . Ответ. 1,15 кВт.
8. Какова температура печи, если помещенная в нее термопара железо-константан ( $K = 0,05$  мВ/К) дает на гальванометре чувствительностью  $10^{-7}$  А/дел и сопротивлением 1 кОм отклонение на 200 делений? Второй спай термопары погружен в тающий лед.
9. На гладком столе покоится отрезок медного провода длиной 1,0 м. К нему подключается напряжение 1,0 кВ. Какой будет скорость «отдачи» проводника в момент включения напряжения?
10.  $\alpha$ -частица, ускоренная напряжением 250 кВ, пролетает поперечное однородное магнитное поле с индукцией 0,51 Тл. Толщина области с полем 10 см. Определить угол отклонения  $\alpha$ -частицы от первоначального направления движения.
11. Заряженная частица, двигаясь в магнитном поле по дуге окружности радиусом

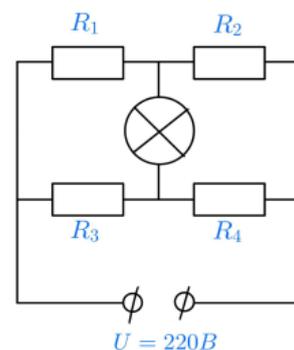
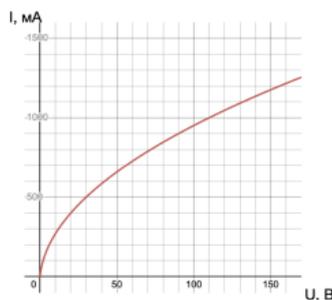
20 см, прошла через свинцовую пластинку, после чего радиус кривизны ее траектории стал равен 1 см. Какая часть первоначальной кинетической энергии частицы пошла на нагревание пластинки?

12. Тонкая металлическая пластинка массой  $m$  падает вертикально вниз равноускоренно так, что ее плоскость остается горизонтальной. Падению пластинки противодействует сила сопротивления среды  $F_c$ . Найти напряженность электрического поля  $E$ , возникающего внутри пластинки вследствие инерции свободных электронов. Масса электрона  $m_e$ , его заряд  $e$

### Олимпиада.

1. Количество теплоты, которую спираль электроплитки отдает окружающей среде в единицу времени, прямо пропорциональна разности температур спирали и окружающей среды. При подключении электроплитки к источнику напряжения  $U_1 = 110$  В с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением ее спираль разогрелась до температуры  $t_1 = 1000^\circ\text{C}$ . При этом температура в кухне поддерживалась постоянной и равной  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . До какой температуры в той же кухне разогреется спираль, если увеличить напряжение источника вдвое? Температурный коэффициент сопротивления для спирали электроплитки  $\alpha = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .  $3700^\circ\text{C}$

2. Экспериментатор собрал цепь, схема которой приведена на рисунке. Сопротивление резисторов:  $R_1 = 50$  Ом,  $R_2 = 100$  Ом,  $R_3 = 200$  Ом,  $R_4 = 150$  Ом. Вольт-амперная характеристика лампы накаливания приведена на рисунке. Определите мощность, рассеиваемую лампой. 4,48 Вт



### Занятие 30. Ток в электролитах

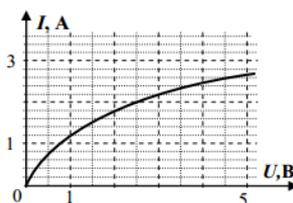
#### I. Вопросы (блиц):

1. Назовите известные вам свойства металлов.
2. Почему пусковой ток в лампе накаливания больше рабочего?
3. Если значения работы выхода двух металлов равны соответственно 2,8 эВ и 3,2 эВ, то какая контактная разность потенциалов возникает, когда эти металлы приводятся в соприкосновение друг с другом? Какой из этих металлов будет иметь более высокий потенциал? 0,4 В
4. Лампу, рассчитанную на напряжение 220 В, включили в сеть с напряжением 110 В. Во сколько раз уменьшится потребляемая ею мощность?
5. Сколько электронов проводимости приходится на 1 грамм натрия?
6. Почему нить накаливания обычно перегорает при включении лампочки, а не после многочасового горения, когда, казалось бы, эта нить сильнее всего нагрета (назовите хотя бы три причины)?
7. Электрическая мощность вычисляется, в том числе, по формуле  $P = U^2/R$ . Значит ли это, что если лампу накаливания, рассчитанную на 220 В, включить в сеть напряжением 127 В, то мощность лампы уменьшится в 3 раза?

8. Каким образом вообще кристаллическая решетка, подобная арматуре, может повлиять на такие свойства, как теплопроводность или электрическая проводимость?
9. Если плавно повышать напряжение, подаваемое на лампу накаливания, то как будет меняться: 1) ток через лампу; 2) сопротивление лампы; 3) мощность лампы; 4) оттенок испускаемого света?
10. Как объяснить, что чем меньше теплоёмкость металла, тем лучше он проводит ток?
11. Почему лампочка ярко вспыхивает, если включенный последовательно с ней проволочный резистор поместить в жидкий гелий?

**II. Задачи (блиц):**

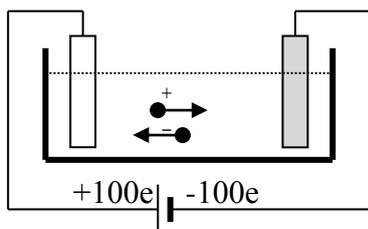
1. Какое количество электронов ежесекундно проходит через нить лампы накаливания, если при напряжении 220 В ее мощность 150 Вт?  $N = 4,3 \cdot 10^{18}$ .
2. Лампочка накаливания при подключении к источнику напряжением  $U_1 = 12$  В потребляет мощность  $N_1 = 48$  Вт и имеет температуру нити  $t_1 = 2000$  °С. При снижении напряжения до величины  $U_2 = 6$  В температура нити уменьшилась до  $t_2 = 1000$  °С, а потребляемая мощность стала равной  $N_2 = 22$  Вт. Определить температурный коэффициент сопротивления нити лампочки  $\alpha$ .  $\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .
3. Лампа накаливания, ВАХ которой показана на графике, работает от батарейки с ЭДС 4,5 В с внутренним сопротивлением 1 Ом. Какую мощность потребляет лампа? 5 Вт



**III. Жидкости-проводники:** расплавы металлов, электролиты.

Растворяемое вещество + растворитель = раствор.

Электролитическая диссоциация - распад молекул электролита на ионы под влиянием электрического поля молекул растворителя. Носителями свободного заряда в электролитах являются положительно заряженные и отрицательно заряженные ионы.



$$q = q_0 \cdot N; m = m_0 \cdot N;$$

$$m = \frac{m_0}{q_0} q; m = k \cdot I \cdot t; k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{M_B}{N_A Z e}$$

**IV. Задачи:**

1. Слой меди какой толщины выделится на одном из электродов, опущенных в водный раствор хлорной меди  $\text{CuCl}_2$ , за время  $t = 1$  ч, если мощность электролитической установки  $P = 20$  кВт, подводимое напряжение  $U = 500$  В? Площадь электродов  $S = 0,5 \text{ м}^2$ . 10,7 мкм
2. Какова средняя скорость движения ионов в растворе медного купороса, если концентрация их в растворе  $n = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , площадь каждого электрода  $S = 50 \text{ см}^2$ , а сила тока  $I = 1,0$  А? 0,625 см/с
3. Какое количество  $m$  серебра выделится на катоде электрохимической ванны, соединенной последовательно с конденсатором емкостью  $C = 1000$  мкФ, если в процессе протекания тока напряжение на конденсаторе изменяется на величину  $\Delta U = 100$  В? Электрохимический эквивалент серебра  $k = 1,12$  мг/Кл. 0,112 мг

4. Какой заряд нужно пропустить через электролитическую ванну с подкисленной водой, чтобы получить  $1 \text{ дм}^3$  гремучего газа при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении  $10^5 \text{ Па}$ ? (На аноде  $4 \text{ OH} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ ). 5128 Кл

#### V. Олимпиада.

1. В электролитической ванне, подключенной к источнику с ЭДС  $\varepsilon = 3,35 \text{ В}$ , производят покрытие деталей никелем. Для получения на одной из деталей слоя никеля толщиной  $h = 2 \text{ мкм}$  источником была совершена работа  $A = 0,054 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Какова площадь поверхности  $S$  этой детали? Плотность никеля  $\rho = 8,8 \text{ г/см}^3$ , молярная масса  $M = 59 \text{ г/моль}$ , валентность  $n = 2$ , постоянная Фарадея  $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$ . Ответ.  $S \approx 1 \text{ м}^2$ .

2. К источнику с ЭДС  $\varepsilon$  и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением подключают параллельно резистор сопротивлением  $R$  и нелинейный элемент  $X$ , вольтамперная характеристика которого имеет вид:  $I_x = \frac{U_x}{\alpha} + \beta$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - постоянные коэффициенты. Затем этот же резистор и нелинейный элемент подключают последовательно к тому же источнику. Вычислить для обоих случаев силу тока, протекающую через источник, и мощность, выделяемую на нелинейном элементе.  $I_2 = \frac{\varepsilon + \alpha\beta}{R + \alpha}$ .  $P_2 = \alpha \frac{(\varepsilon - R\beta)(\varepsilon + \alpha\beta)}{(R + \alpha)^2}$ .

3. Электролиз воды – это процесс получения водорода и кислорода при пропускании через некоторые водные растворы электрического тока. Можно пытаться получать электролизом водород и таким способом накапливать электроэнергию как топливо. При пропускании через раствор примерно  $Q = 96 \text{ Кл}$  электрического заряда получается  $m = 1 \text{ мг}$  водорода. Удельная теплота сгорания водорода приблизительно  $q = 120 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ .

1) Каков КПД накопления энергии с помощью устройства для электролиза, работающего при напряжении  $U = 5 \text{ В}$ ? 25%.

2) Оцените, при каком наименьшем напряжении электролиз в принципе может идти. 1,25 В.

#### Вопросы (блиц):

1. Выделяется ли тепло при прохождении электрического тока через электролит?

2. Почему электрохимические предприятия являются самыми крупными потребителями электроэнергии?

3. Сталь во влажном морском воздухе ржавеет очень быстро, а в сухом воздухе пустынь может сохраняться веками. Почему?

4. Почему дуга на раскаленный уголь, мы увеличиваем скорость его сгорания?

5. Почему, когда зимой тротуары и мостовые покрываются льдом, их посыпают солью?

6. Какое количество  $m$  серебра выделится на катоде электрохимической ванны, соединенной последовательно с конденсатором емкостью  $C = 1000 \text{ мкФ}$ , если в процессе протекания тока напряжение на конденсаторе изменилось на  $\Delta U = 100 \text{ В}$ ? Электрохимический эквивалент серебра  $k = 1,12 \text{ мг/Кл}$ .  $m = kC\Delta U$ . 0,112 мг

7. Электролиты проводят электрический ток. Почему же электролитические конденсаторы не проводят ток?

8. Говорят, что аккумулятор, как и человек, «любит» комнатную температуру. Почему?
9. Почему ионные кристаллы обладают отличной электропроводностью?
10. Почему электролитические конденсаторы должны подключаться к источнику тока с учетом строгой полярности?
11. Как происходит электролиз раствора соляной кислоты и раствора поваренной соли? В чем их отличие?
12. Изменится ли ток в электрической цепи, если заменить один гальванический элемент другим того же типа, но с большим размером пластин?
13. Для защиты поверхности металла или в эстетических целях в технике широко используется гальванизация. Как это понимать?
14. Для защиты стальных изделий от атмосферной коррозии применяют цинк; от действия морской воды - кадмий и хром; от действия серной кислоты и её солей - свинец; для защитно-декоративной отделки - никель и хром. Чем обуславливается выбор металла для покрытия изделий?
15. Зависит ли скорость осаждения металла при электролитическом покрытии от расстояния между электродами?
16. Для продления срока службы батарейки ее можно аккуратно помять или нагреть. Почему после этих процедур батарейка на некоторое время восстанавливает свои свойства?
17. Почему пластины в аккумуляторах располагают близко друг к другу?
18. Почему безводная серная кислота может храниться даже в железной посуде, а разведенная - только в стеклянной посуде?
19. Почему опасно выкручивать из патрона лампочку накаливания мокрыми руками?
20. До каких пор будет продолжаться электролиз медного купороса, если взять угольные электроды; медные электроды?
21. Почему повышение температуры и влажности воздуха уменьшает электрическое сопротивление тела человека?
22. Вследствие короткого замыкания загорелись провода. Почему их нельзя гасить водой, пока загоревшийся участок не будет отключен от сети?
23. Горящий магний способен успешно извлекать необходимый для горения кислород из воды или углекислого газа. Как ему это удается?
24. Чтобы избавиться от анемии, необходимо класть кусок железа в кастрюлю при варке супа или в чайник. Зачем?

### Разное

1. Какое потребуется количество электричества и сколько потребуется для этого энергии, чтобы выделить 1 кг хлора, если напряжение источника тока 4 В? 757 А·ч. 3 кВт·ч
2. В раствор соли меди опустили два параллельных электрода площадью  $S = 8 \text{ дм}^2$  и подали на них разность потенциалов  $U = 100 \text{ В}$ . Вследствие электролиза на одном из электродов за время  $\tau = 40 \text{ мин}$  выделилось  $m = 6,4 \text{ г}$  меди. Определить удельное сопротивление раствора  $\rho$ . Валентность меди  $K = 2$ , расстояние между электродами  $h = 2 \text{ см}$ .  $\rho = \mu\tau US / (mehKN_A) = 79 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

### Олимпиада.

## Занятие 31. Электрический ток в газах.

### I. Вопросы (блиц):

1. Для чего в гальванотехнике применяют реверсирование, то есть изменение направления тока?
2. Каким образом явление электролиза можно использовать для создания счетчика расхода электрической энергии в сети постоянного тока?
3. При тушении пожаров в центрах обработки данных или на электростанциях используется газ (обычно углекислый) или порошок. Зачем?
4. Почему растворение сахара или соли в воде замедляет ее испарение?
5. Почему при электролизе раствора медного купороса на положительном электроде остаток  $SO_4$  не обнаруживается?
6. Трамвайная линия питается постоянным током, причем воздушный провод присоединен к положительному полюсу генератора, а рельсы - к отрицательному. Почему не наоборот?
7. Расставьте по порядку повышения проводимости: 1) морская вода; 2) кристаллический кварц; 3) речная вода; 4) железо; 5) медь; 6) дистиллированная вода.
8. Почему в помещении, где заряжают аккумуляторы, запрещено курить?
9. Будут ли выделяться ртуть на катоде при пропускании тока через ртуть, находящуюся в жидком состоянии?
10. Предложите способ разделения золота и серебра в сплаве.

### II. Задачи (блиц):

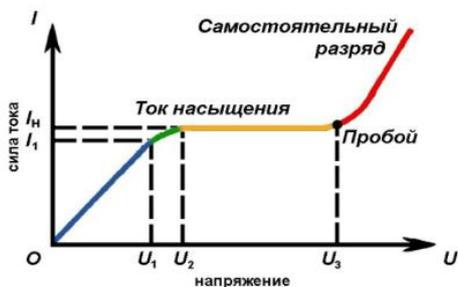
1. При электролитическом получении алюминия используются ванны, работающие при силе тока  $I = 40$  кА под напряжением  $U = 5$  В. Сколько электроэнергии требуется для получения  $m = 1$  кг алюминия? Валентность катиона алюминия  $n = 3$ . 15 кВт·ч

Для получения электрохимическим путем 1 т алюминия требуется 20000 кВт·ч электроэнергии!

2. Ванна с раствором серной кислоты подключена к батарее с ЭДС, равной  $\varepsilon = 5$  В. Изменяя расстояние между электродами, их установили так, чтобы получить от батареи наибольшую мощность. При этом за время  $\tau = 50$  мин в области катода выделилось  $m = 0,3$  г водорода. Какую мощность расходовала батарея во внешней цепи? Поляризацией электродов можно пренебречь.

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon I = \frac{\varepsilon m e N_A}{2 \mu \tau} = 24 \text{ Вт}$$

### III. Энергия ионизации атома ( $E_i$ ) - наименьшая энергия, необходимая для удаления электрона от свободного атома в



основном состоянии на бесконечность. Ионизация

газа:  $E_k = \frac{m v^2}{2} \geq E_i$ . Носители свободного заряда в

газе - ионы и электроны. Установка для исследования разряда в газе (газового разряда).

Самостоятельный разряд в газе продолжается и после прекращения действия ионизатора.

Объяснение природы самостоятельного разряда в

газе. Условия возникновения самостоятельного разряда в газе:  $A' = qEl = \frac{m \bar{v}^2}{2} \geq E_i$ .

Ионизация электронным ударом и вторичная электронная эмиссия поддерживают самостоятельный разряд в газе!

**Типы самостоятельного разряда.** Каким образом можно получить самостоятельный разряд в трубке с двумя электродами? Увеличить напряжение?!

$$A' = qEl = q \frac{U}{d} \ell = \frac{mv^2}{2} = E_i$$

Увеличить длину свободного пробега электрона? Уменьшить давление газа в трубке? **Тлеющий разряд.** Разряд, протекающий при низком напряжении и сильном разрежении газа, называют тлеющим.

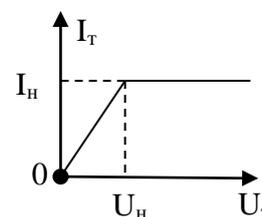
**Коронный разряд** - разряд, происходящий при атмосферном давлении вблизи острия, при напряженности поля меньше пробивной.

**Искровой разряд** - разряд между электродами, приводящий к пробое газа.

**Дуговой разряд** и его особенности (демонстрация с дуговой лампой). Электрическая дуга представляет собой электрический разряд в среде с большим током, низким напряжением, высокой температурой.

#### IV. Задачи:

- В газоразрядной трубке (вольтамперная характеристика приведена на рисунке) напряжение насыщения 1 кВ, ток насыщения 10 мкА. Трубка с последовательно соединенным балластным резистором, имеющим сопротивление 300 МОм, подключена к источнику ЭДС 6 кВ. Какой ток установится через трубку и каково будет напряжение на трубке? Внутренним сопротивлением батареи пренебречь. 10 мкА. 2 кВ
- Космический корабль** разгоняется с помощью ионного реактивного двигателя, выбрасывающего двухвалентные ионы кислорода  $O_2^+$ , ускоренные напряжением  $U = 500$  кВ. Ток ионного пучка  $I = 2$  кА, масса корабля  $M = 200$  кг. Найти ускорение корабля. Дважды ионизированные атомы.  $3 \text{ м/с}^2$

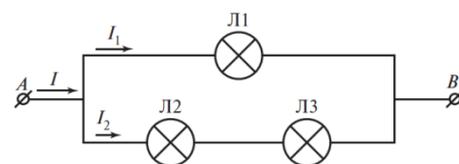


#### V. Олимпиада.

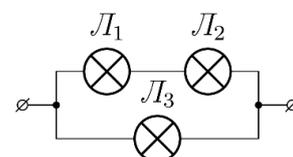
- Оцените, при какой разности потенциалов между плоскими электродами зажигается газовая лампа, если энергия ионизации атомов газа  $3 \cdot 10^{-18}$  Дж. Давление в лампе равно 15 Па, а расстояние между электродами равно 1 см.  $U = 90$  В

- В газовых лампах не выполняется закон Ома — сила тока пропорциональна не напряжению, а корню квадратному из напряжения  $I = \sigma \sqrt{U}$ . Коэффициент  $\sigma$  не зависит от напряжения и известен из опыта. Три одинаковые газовые лампы соединили, как показано на рисунке. Найти зависимость тока  $I$  от напряжения

$U$  на участке цепи АВ. Ответ:  $I = \frac{(2 + \sqrt{2})\sigma U}{2}$



- Вольтамперные характеристики газовых ламп  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  описываются зависимостями:  $U_1 = \alpha I^2$ ,  $U_2 = 3\alpha I^2$ ,  $U_3 = 12\alpha I^2$ , где  $\alpha$  — некоторая известная размерная константа. Лампы соединили так, как показано на рисунке. Какова зависимость напряжения на концах «гирлянды» от силы текущего через нее тока  $U(I)$ ? Выражает токи в ветвях,



потом общий ток. 
$$U = \frac{12\alpha}{(\sqrt{3} + 1)^2} I^2$$

*Вопросы (блиц):*

1. У. Гильберт обнаружил, что пламя уничтожает электрические свойства тел, приобретенные ими при трении. Почему?
2. Чем отличается образование ионов в электролитах от ионизации газа?
3. Почему в пустынях, степных и горных местностях, образуются пыльные вихри?
4. Почему закручивается пламя костра? В какую сторону?
5. Почему иногда происходит самостоятельный разряд при приближении пальца к металлической поверхности?
6. Почему во время грозы в сельской местности не рекомендуется разговаривать по телефону? Заговорившись, можно забрести на пригорок или под высокое дерево!
7. Почему при самостоятельном разряде в газе наибольшую роль играют электроны, а не ионы?
8. В пламени спички разогретые газы и продукты реакции горения, а **плазмы** там меньше 1%. Почему? Температура 800-1200, средняя кинетическая энергия частиц окрло 0,2 эВ, а энергия ионизации газов больше 10 эВ.
9. При охлаждении газа его проводимость уменьшается. Как объяснить это? Куда деваются ионы?
10. Почему электропроводность газа при разрежении вначале увеличивается, а затем при достаточно сильном разрежении уменьшается и становится пренебрежимо малой?
11. На газопроводах отрицательный полюс электрического генератора соединяют с трубой, а положительный - заземляют. Почему такой прием, называемый "катодной защитой", предохраняет трубы от коррозии? Происходит электролиз, при котором на трубопроводе, как на катоде, откладываются металлы, поступающие из грунта, как из электролита.
12. Почему в МГД-генераторе к продуктам сгорания добавляют пары металлов, например калия и цезия, атомы которых легко ионизируются при высокой температуре?
13. Почему при тлеющем разряде вещество катода испаряется?
14. Почему потери электрической энергии на коронный разряд в ЛЭП резко возрастают при плохой погоде (туманах, дождях, снегопадах и т.п.)?
15. Параллельно соединённые неоновая лампочка и лампа накаливания, наполненная водородом, подключаются к источнику питания. При этом горит только неоновая лампочка. При опускании обеих лампочек в жидкий гелий неоновая лампочка гаснет, а лампа накаливания начинает светиться. Почему?
16. К массивной металлической детали нужно приварить тонкостенную деталь. Какую из деталей следует соединить с плюсом, а какую - с минусом дугового электросварочного генератора?
17. Может ли ток достигать насыщения при самостоятельном разряде в газе?
18. При охлаждении газа его проводимость уменьшается. Как объяснить это явление? Куда деваются ионы?
19. Почему газ светится при самостоятельном разряде?

20. Как объяснить, что при выключении люминесцентные лампы, как правило, несколько раз мигают?

### Разное

1. При какой напряженности поля между пластинами воздушного конденсатора начнется самостоятельный разряд, если энергия ионизации молекул равна  $2,4 \cdot 10^{-18}$  Дж, а длина свободного пробега электрона 5 мкм? Какова скорость электронов при ударе о молекулы?
2. Электрон со скоростью  $1,83 \cdot 10^6$  м/с влетает в однородное электрическое поле в направлении, противоположном направлению напряженности поля. Какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы ионизовать атом водорода, если его энергия ионизации  $2,18 \cdot 10^{-18}$  Дж? 13,6 В

### Олимпиада.

## Занятие 32. Ток в вакууме.

### I. Вопросы (блиц):

1. Почему электропроводность газов с уменьшением давления сначала увеличивается, а затем при очень малом давлении становится равной нулю?
2. Почему заряженный электроскоп даже в вакууме всё равно со временем разряжается?
3. Если бы вы проводили этот эксперимент на все большей и большей высоте, то обнаруживали бы, что электроскоп разряжается (а лепестки фольги опадают) всё быстрее.
4. Назовите характерные признаки различных типов самостоятельного разряда.
5. Почему для поддержания электрического тока в горящей дуге достаточно невысокого напряжения?
6. Какого типа газовый разряд возникает: а) при электросварке; б) в лампе дневного света; в) в свече ДВС; г) в неоновой лампе; д) в электрофильтрах?
7. Как будет изменяться пробивное напряжение газового промежутка при уменьшении давления газа?
8. Как изменяется напряжение пробоя при уменьшении давления газа?
9. Почему при дуговом разряде сильно разогревается именно катод, хотя заряженные частицы бомбардируют оба электрода?
10. Почему стержень электроскопа заканчивается шариком, а не острием?
11. Напряжение 50 В поддерживает дуговой разряд в газовом промежутке. Искровой разряд в том же промежутке требует напряжения в несколько тысяч вольт. Объяснить почему.
12. Почему сварочную дугу называют «дугой»?
13. Как при помощи неоновой лампы определить знаки полюсов источника?
14. Возможен ли электролиз в газах?
15. К массивной металлической детали нужно приварить тонкостенную деталь. Какую из деталей следует соединить с плюсом, а какую - с минусом дугового электросварочного генератора?

### II. Задачи (блиц):

1. Сварочный аппарат подключен к генератору постоянного напряжения  $U = 37$  В через сопротивление  $R = 0,08$  Ом. Дуга возникает при  $U_0 = 25$  В. Найдите

мощность дуги. 3,75 кВт

2. На неподвижный невозбужденный атом водорода налетает другой невозбужденный атом водорода. Какова должна быть минимальная кинетическая энергия налетающего атома, чтобы произошла ионизация атома? Энергия ионизации атома водорода 13,6 эВ.  $E_{\text{пор}} = 20,4$  эВ.

### III. Работа выхода электрона из металла.

Составляющие работы выхода: 1) Силы зеркального изображения". 2) Преодоление двойного задерживающего слоя (задерживающего поля). Условие "испарения" электрона (моделирование на магнитной доске):  $\frac{m v^2}{2} \geq A_{\text{вых}}$ .

Электроны могут быть удалены из металла следующими способами: а) термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретым телом; б) вторичная эмиссия – выбивание электронов из катода ионами; в) автоэлектронная эмиссия (электрическое поле большой напряженности); г) фотоэлектрический эффект.

### Вакуумный диод прямого накала.

Односторонняя проводимость диода. Диод косвенного накала. Технические применения вакуумного диода. Вакуумные диоды (кенотроны) способны выдерживать довольно большие токи и напряжения.

**Диод** – электронный элемент, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока.

### Вакуумный триод.

Свойствами электронных пучков и практическими применениями этих свойств.

### Электронно-лучевая трубка.

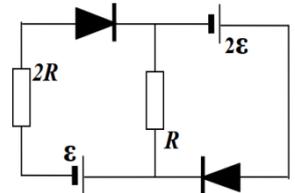
### Осциллограф.

### IV. Задачи:

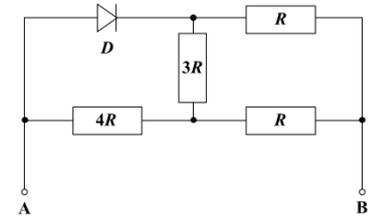
1. Точка на экране осциллографа участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях:  $x = a \sin \omega t$ ,  $y = b \cos \omega t$ . Запишите уравнение траектории движения точки на экране и укажите направление ее движения.  $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ . Точка движется по часовой стрелке.
2. Максимальный анодный ток в ламповом диоде  $I = 50$  мА. Сколько электронов вылетает из катода каждую секунду?  $31,3 \cdot 10^{16}$
3. Напряжение между анодом и катодом вакуумного диода равно  $U$ , анодный ток равен  $I$ . Найти среднее давление электронов на анод площадью  $S$ .  $p = \frac{I}{S} \sqrt{\frac{2mU}{e}}$
4. На аноде электронной лампы выделяется 20 Дж тепла за 20 минут. Определите среднюю скорость движения электрона в лампе, если анодный ток 8 мА. 430 км/с
5. Электронная пушка создает пучок электронов диаметром  $d = 2$  мм. За любое время  $\tau = 1$  с через поперечное сечение пучка проходит  $N = 2 \cdot 10^{18}$  электронов.  
1) Определить направление и силу  $I$  тока, а также плотность  $j$  тока в пучке.  $I = eN/\tau = 0,3$  А,  $j = 4eN/(\pi d^2 \tau) = 0,1$  А/мм<sup>2</sup>. 2) найдите концентрацию  $n$  электронов в пучке, если их кинетическая энергия  $K = 1$  кэВ.  $n = 4N/\pi d^2 \tau \sqrt{\frac{m}{2K}} = 3 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>.

## V. Олимпиада.

1. Найти ток через резистор  $R = 10 \text{ Ом}$  в схеме, изображенной на рисунке. Диоды идеальны, внутренние сопротивления источников одинаковы и равны  $r = 2R$ , ЭДС батареи в «левой» ветви  $\varepsilon = 12 \text{ В}$ , остальные параметры элементов схемы показаны на рисунке. Когда такое возможно?



2. Из четырёх резисторов и идеального диода собрана электрическая цепь (см. рисунок). Сопротивление  $R = 1 \text{ Ом}$ . К клемме В подключают положительный полюс идеальной батарейки с напряжением  $U = 48 \text{ В}$ . Определите значение силы тока, текущего через резистор  $3R$ .

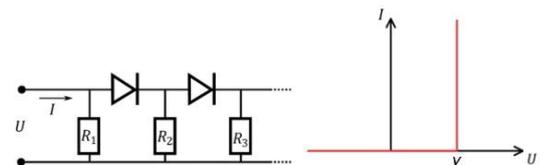


*Вопросы (блиц):*

1. Возможен ли искровой разряд в вакуумной лампе?
2. Почему в дымоходе раскаленные частички угля несут на себе электрический заряд? Каков знак заряда?
3. Какие явления доказывают, что часть атомных электронов сравнительно легко отделяется от нейтральных атомов, превращая их в положительные ионы?
4. Почему, когда горит солома, нагретый воздух поднимается не по прямой линии, а по спирали и начинает кружиться?
5. Можно ли создать абсолютный вакуум? Никакой «абсолютно идеальной структуры» существовать просто не может.
6. Как вычисляется мощность, потребляемая нелинейным элементом цепи постоянного тока (то есть элементом, для которого не выполняется закон Ома)?
7. Максимальный анодный ток в ламповом диоде  $50 \text{ мА}$ . Сколько электронов вылетает из катода каждую секунду?  $3,1 \cdot 10^{17}$
8. Почему катод электронной лампы быстро разрушается, если внутри лампы находится небольшое количество воздуха?
9. При отсутствии внешнего электрического поля электроны, вылетающие из катода вакуумного диода, не рассеиваются в окружающем пространстве, а большей частью возвращаются на поверхность катода? Как это можно объяснить?
10. Как с помощью свечи определить знаки зарядов пластин раздвижного конденсатора, соединенных с полюсами действующей электрофорной машины?

## Олимпиада.

4. Бесконечная линия состоит из идеальных диодов с напряжением открытия, равным  $V$  (вольт-амперная характеристика диода представлена на рисунке), а также резисторов с сопротивлением  $R\{n\} = R/n$ , где  $n$  – номер звена линии, смотри рисунок. Найдите вольт-амперную характеристику всей цепи. Какой приближённой формулой её можно описать при больших напряжениях  $U \gg V$ ?



### Занятие 33. Ток в полупроводниках.

#### I. Вопросы (блиц):

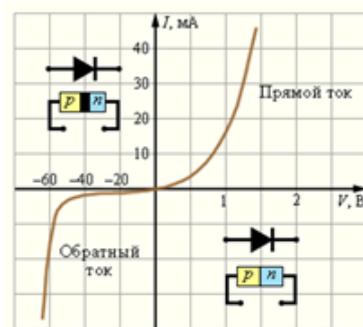
1. Как узнать, отклоняется ли движущийся электрон в определенной области пространства электрическим или магнитным полем?
2. Какую траекторию опишет электрон, пролетая между пластинами плоского конденсатора, на которые подано: а) постоянное напряжение; б) переменное напряжение достаточно высокой частоты?
3. Зачем в электронно-лучевой трубке создается высокий вакуум?
4. Способствует ли нагревание металла автоэлектронной эмиссии?
5. Почему в вакуумном фотодиоде при обрыве внешней цепи после освещения катода электроны через некоторое время перестанут переходить на анод?
6. Во сколько раз увеличится сила давления на анод в вакуумном плоском диоде, если напряжение на диоде увеличить в два раза?
7. Скорость движения электронов между электродами вакуумного диода достигает тысяч километров в секунду, а в металлических проводниках анодной цепи – миллиметров в секунду. Почему же сила тока в диоде и в проводниках одинакова?
8. В электронном микроскопе для фокусировки электронного пучка используется магнитная линза. Простейшая магнитная линза представляет собой катушку с током. Рассеянный пучок электронов фокусируется, проходя через магнитное поле катушки. Как это объяснить?

#### II. Задачи (блиц):

1. Сила тока, характеризующая поток электронов в электронно-лучевой трубке,  $I = 400$  мкА, ускоряющее напряжение  $U = 10$  кВ, отношение заряда к массе электрона  $\gamma = 1,7 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Найти силу давления  $F$  электронного луча на экран трубки, полагая, что все электроны поглощаются экраном.  $F = I \sqrt{\frac{2U}{\gamma}} = 1,4$  мкН.
2. Электрон влетает в область магнитного поля ширины  $\ell$ . Скорость электрона  $\vec{v}$  перпендикулярна как индукции поля  $\vec{B}$ , так и границам области. Под каким углом к границе области электрон вылетит из магнитного поля?  $\sin \alpha = \frac{eB\ell}{mv}$

III. Полупроводники и называют полупроводниками, что при достаточно высоких температурах они являются проводниками, а при низких - диэлектриками. **Энергетическая щель диэлектрика (W)** - минимальная энергия, необходимая для того, чтобы оторвать электрон от атома диэлектрика и превратить его в свободный электрон. Зависимость электропроводности диэлектрика от температуры.  $\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{W_g}{2kT}}$ .

**Полупроводники n-типа и p-типа.** Образование p-n-перехода при контакте двух полупроводников с разными типами проводимости. **Полупроводниковый диод**, его устройство и принцип действия. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода. Основные характеристики диода: допустимое обратное напряжение, максимальный выпрямленный ток.

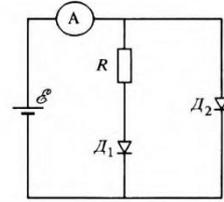
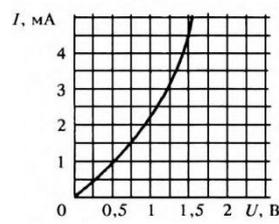


Выпрямление переменного тока с помощью диода.

**IV. Задачи:**

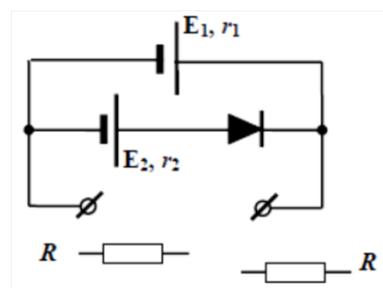
1. Концентрация носителей в кремнии равна  $n = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , подвижность электронов  $b_n = 0,15 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , дырок  $b_p = 0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Определить сопротивление кремниевого стержня длиной  $\ell = 5 \text{ см}$  и сечением  $S = 2 \text{ мм}^2$ . 15,6 Мом
2. Сколько электронов проводимости в 1 грамме германия, легированного мышьяком в пропорции три части мышьяка на миллион частей германия? Плотность германия  $5,324 \text{ г/см}^3$ , плотность мышьяка  $5,727 \text{ г/см}^3$ , молярная масса мышьяка  $74,922 \text{ г/моль}$ .  $9,3 \cdot 10^{15}$ .
3. Германиевый образец нагревают от температуры  $t_1 = 0^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2 = 28^\circ\text{C}$ . Принимая ширину запрещенной зоны  $W_g = 72 \text{ эВ}$ , определить, во сколько раз возрастает его электропроводность. 4,15

4. Вольт-амперная характеристика диода в прямом направлении изображена на рисунке слева. Два таких диода  $D_1$  и  $D_2$  включены в схему, изображённую на правом рисунке. ЭДС батареи  $\varepsilon = 1,5 \text{ В}$ , сопротивление резистора  $R = 500 \text{ Ом}$ . 1) Чему равно напряжение на диоде  $D_1$ ? 2) Что покажет амперметр  $A$ ? Внутренним сопротивлением батареи и амперметра пренебречь. 0,75 В. 6 мА

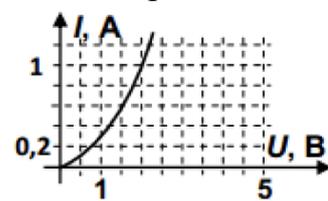
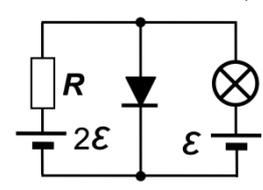


**V. Олимпиада.**

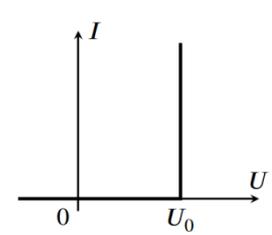
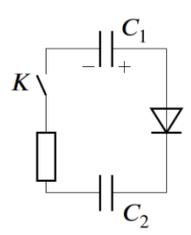
1. Один любознательный школьник собрал из двух аккумуляторов и одного диода источник питания по схеме, показанной на рисунке. Сначала он подключил к источнику в качестве нагрузки один резистор с сопротивлением  $R = 6 \text{ Ом}$ , а затем – два таких резистора последовательно. Во сколько раз отличалась выделяющаяся на нагрузке мощность  $P$  в этих двух случаях? ЭДС аккумуляторов равны  $\varepsilon_1 = 36 \text{ В}$  и  $\varepsilon_2 = 24 \text{ В}$ , их внутренние сопротивления одинаковы равны и  $r_1 = r_2 = r = 4 \text{ Ом}$ . Диод считать идеальным, то есть считать, что его сопротивление в «открытом» состоянии равно нулю, а в обратном направлении он ток не пропускает.



2. Какой будет сила тока, текущего через диод, ВАХ (вольт-амперная характеристика) которого изображена в задаче на рисунке справа, если его подключить к источнику с ЭДС 4 В и внутренним сопротивлением 4 Ом?



3. Цепь, изображённая на рисунке, состоит из двух конденсаторов, диода, резистора и ключа. Сначала ключ разомкнут, конденсатор ёмкостью  $C_1 = 10 \text{ мкФ}$  заряжен зарядом  $q = 34 \text{ мкКл}$ , а на втором конденсаторе заряда нет.

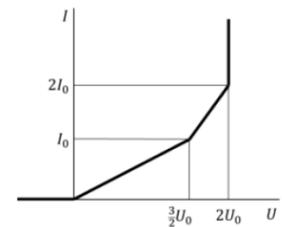
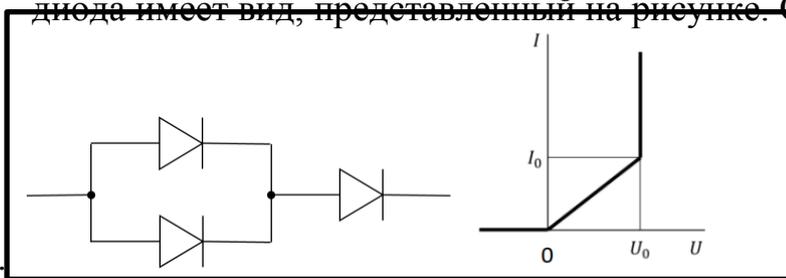
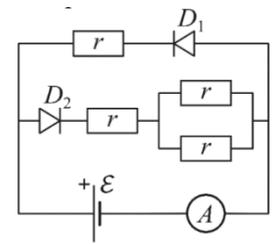


- 1) Определите заряд, который установится на конденсаторе ёмкостью  $C_2 = 5 \text{ мкФ}$ , если ключ замкнуть.

2) Найдите количество теплоты, которое выделится на резисторе в процессе перезарядки.

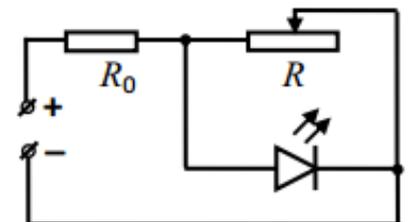
Вопросы (блиц):

1. Почему, несмотря на равенство концентраций электронов и дырок в полупроводнике с собственной проводимостью, электронный ток всё же больше дырочного?
2. Найти сопротивление полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях тока, если при напряжении на диоде 0,5 В сила тока 5 мА, а при напряжении -10 В сила тока 0,1 мА соответственно.
3. Через идеальные диоды  $D_1$  и  $D_2$  ток может протекать только в направлении стрелки. Если ток через диод протекает, то напряжение на идеальном диоде равно нулю. Какой ток пойдет через идеальный амперметр А в схеме, показанной на рисунке? Все сопротивления  $r = 10$  Ом, ЭДС батарейки  $\mathcal{E} = 9$  В. Ответ: 0,6 А.
4. Каков механизм поглощения света в полупроводниках?
5. Во сколько раз возрастет сопротивление цилиндра из чистого германия, если его температуру понизить с 300 К до 30 К?
6. Изобразите вольт-амперную характеристику схемы из трех одинаковых диодов, представленной на рисунке 1, если вольт-амперная характеристика одного диода имеет вид, представленный на рисунке. Объясните свои построения.



Разное

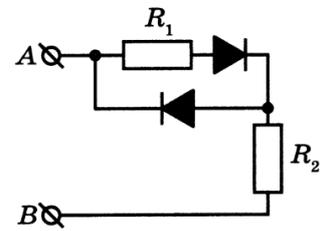
1. Цепь питания светодиода собрана по схеме, показанной на рисунке. Яркость его свечения регулируется с помощью реостата. При сопротивлении реостата  $R_1 = 40$  Ом мощность излучения светодиода равна  $P_1 = 4,2$  Вт, при  $R_2 = 60$  Ом –  $P_2 = 5,4$  Вт. Какой будет мощность излучения светодиода при максимальном сопротивлении реостата, равном  $R_3 = 120$  Ом? Известно, что сила тока через светодиод равна нулю при напряжениях ниже порога открытия  $U_0$ , и может неограниченно возрастать при напряжении, равном этому порогу (выше не бывает), а КПД светодиода одинаков при любой мощности.
2. В электронно-лучевой трубке поток электронов с кинетической энергией 8 кэВ, движется между отклоняющими пластинами плоского конденсатора длиной 4 см. Расстояние между пластинами 2 см. Какое напряжение надо подать на пластины конденсатора, чтобы смещение электронного пучка на выходе из конденсатора было 0,8 см?
3. Укажите значение концентрации дырок в полупроводнике с дырочной проводимостью, если его удельная электропроводность  $\sigma = 2$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, а



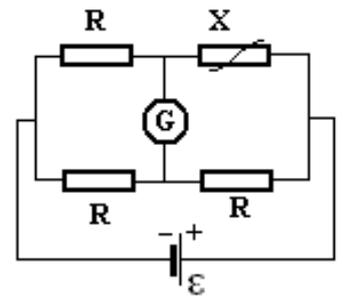
подвижность дырок  $b_p = 0,5 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Заряд дырок  $q_d = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

4. Кристалл германия охлаждается от  $27^\circ\text{C}$  до температуры таяния льда. Как и во сколько раз изменяется сопротивление этого кристалла? Возрастает в 3,96 раза.

5. При подключении к клемме А положительного полюса, а к клемме В отрицательного полюса батареи с ЭДС 12 В и пренебрежимо малым внутреннем сопротивлением потребляемая цепью мощность равна 4,8 Вт. При изменении полярности подключения батареи потребляемая в цепи мощность становится равной 7,2 Вт. Диоды идеальные. Определите сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .  $R_1 = 30 \text{ Ом}$ .  $R_2 = 20 \text{ Ом}$

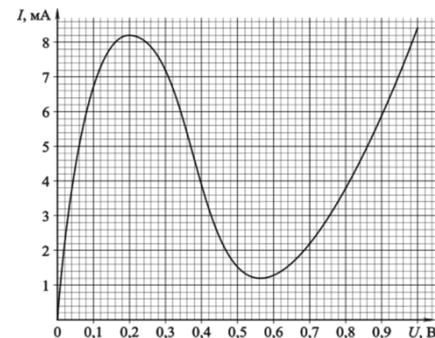


6. В одно из плеч моста Уитстона включено нелинейное сопротивление X, для которого зависимость тока I (в амперах) от приложенного напряжения U (в вольтах) имеет вид  $I = 0,01 \cdot U^3$ . В остальные плечи моста включены одинаковые сопротивления  $R = 4 \text{ Ом}$ . При каком токе через батарею мост окажется сбалансированным?  $I = 2,5 \text{ А}$

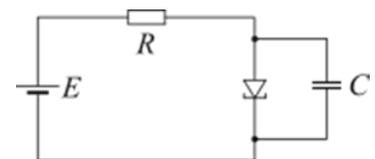


### Олимпиада.

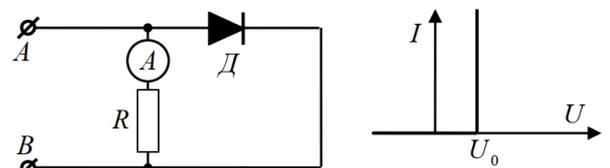
1. На графике изображена вольтамперная характеристика туннельного диода. Этот элемент подключают к источнику напряжения с ЭДС  $\varepsilon = 1,4 \text{ В}$  (его внутренним сопротивлением можно пренебречь) последовательно с резистором  $R = 200 \text{ Ом}$ .



- 1) Какие значения может принимать сила тока в получившейся цепи? Строим в-а характеристику диода.
- 2) Какие из этих значений соответствуют устойчивым состояниям цепи, а какие – неустойчивым? При анализе устойчивости состояний нужно иметь в виду, что туннельный диод обладает довольно заметной емкостью. Учитывающая ее эквивалентная схема цепи показана на рисунке. Индуктивность цепи пренебрежимо мала.
- 3) Какое из устойчивых состояний этой цепи установится при ее включении? Ответ объясните.



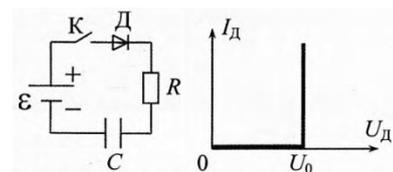
2. В схеме, показанной на рисунке слева, диод Д не является идеальным – его вольтамперная характеристика показана на рисунке справа. При подключении к клеммам А и В одного аккумулятора идеальный амперметр показывает ток  $I_1 = 0,36 \text{ А}$ , при подключении двух таких аккумуляторов, соединенных последовательно – ток  $I_2 = 0,48 \text{ А}$ , трех – ток  $I_3 = 0,50 \text{ А}$ . При последовательном подключении четырех таких аккумуляторов ток в ветви с амперметром остается равным  $I_3 = 0,50 \text{ А}$ . Найти ЭДС и внутреннее сопротивление источника, а также сопротивление резистора R, если пороговое напряжение диода  $U_0 = 4,5 \text{ В}$ .



3. В цепи, состоящей из источника с ЭДС  $\varepsilon$ , полупроводникового диода, вольтамперная характеристика которого изображена на рисунке, резистора,

ключа и конденсатора, который изначально был не заряжен. Какое количество тепла выделится на резисторе и диоде после замыкания ключа?

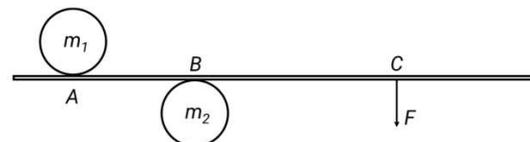
$$Q = \frac{C(\varepsilon - U)^2}{2}$$



### Занятие 34. Олимпиада.

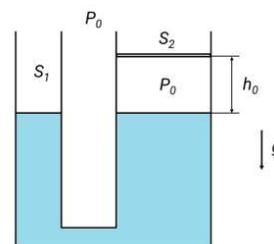
#### ОЛИМПИАДА 10 кл.

1. Два цилиндра массами  $m_1$  и  $m_2$  стоят на шероховатом горизонтальном столе. Коэффициент трения цилиндров о стол  $\mu = 0.2$ . Между цилиндрами вставлена длинная деревянная линейка, касающаяся цилиндров в точках А и В (см. рисунок, вид сверху). К точке С прикладывается сила  $F$  в направлении, указанном на рисунке. Ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .



- 1) Массы цилиндров равны. Какой из цилиндров первым придёт в движение при постепенном увеличении силы  $F$  от нулевого значения? Цилиндр массой  $m_2$
- 2) Массы цилиндров  $m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}$ . Точке А соответствует деление 2 см на шкале линейки, точке В — 22 см, точке С — 52 см. При каком минимальном значении силы  $F$  хотя бы один из цилиндров придёт в движение? Ответ выразите в ньютонах, округлите до десятых. Ответ: 0.8
- 3) Чему равна минимальная масса груза, который необходимо дополнительно поставить на цилиндр, приходящий в движение первым, чтобы при постепенном увеличении силы первым начал двигаться другой цилиндр? Ответ выразите в килограммах, округлите до сотых. Если без дополнительного груза цилиндры приходят в движение одновременно, в ответ запишите 0. Ответ: засчитывается в диапазоне [0.65; 0.68]
- 4) При каком соотношении масс  $m_1/m_2$  цилиндры придут в движение практически одновременно при постепенном увеличении силы  $F$ ? Ответ округлите до десятых. Ответ: 0.6

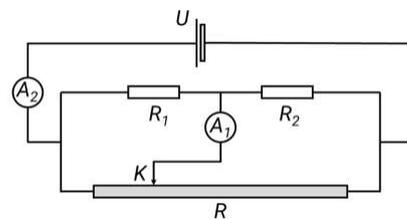
2. Два высоких вертикальных цилиндрических сообщающихся сосуда наполовину заполнены водой. Площади сечений сосудов  $S_1 = 50 \text{ см}^2$  и  $S_2 = 150 \text{ см}^2$ . В сосуд с большей площадью сечения вставлен невесомый тонкий поршень, который герметично перекрывает сосуд и может без трения скользить внутри него. Первоначальное давление воздуха под поршнем равно атмосферному давлению  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ , температура воды и воздуха внутри и снаружи сосудов  $T_0 = 280 \text{ К}$ . Начальное расстояние между поршнем и поверхностью воды  $h_0 = 30 \text{ см}$ . Плотность воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ , ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .



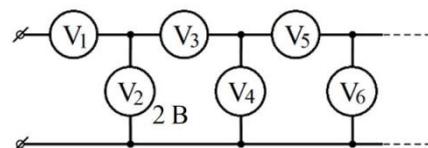
- 1) Заполните пропуски. Если температура воздуха под поршнем увеличится до  $T = 320 \text{ К}$ , а температура воды и воздуха снаружи при этом останется прежней, то уровень жидкости в сосуде с поршнем... Ответ: не изменится
- 2) а сам поршень... Ответ: поднимется

- 3) Определите расстояние между поршнем и поверхностью жидкости после повышения температуры воздуха под поршнем до  $T = 320$  К. Ответ выразите в сантиметрах, округлите до целых. Ответ: 34
- 4) Температура в течение всего процесса равна первоначальной. На поршень аккуратно ставят гирю массой  $m = 3$  кг. На сколько сместится при этом уровень жидкости в сосуде с площадью  $S_1$ ? Ответ выразите в сантиметрах, округлите до целых. Ответ: 15
- 5) Насколько сместится при этом уровень жидкости в сосуде с площадью  $S_2$ ? Ответ выразите в сантиметрах, округлите до целых. Ответ: 5
3. Определить высоту горы, если давление на ее вершине составляет  $2/3$  на уровне моря. Температура считать постоянной и равной  $20^\circ\text{C}$ . 3,47 км
4. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из изобары, адиабаты и изотермы, причем изотермический процесс протекает при минимальной для цикла температуре. Найти КПД цикла, если температура в пределах цикла изменяется в  $n$  раз.  $\eta = (1 - \frac{\lg n}{n-1})100\%$

5. Электрическая цепь, схема которой приведена на рисунке, состоит из двух резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , реостата со скользящим контактом  $K$ , двух идеальных амперметров и источника постоянного напряжения  $U = 5$  В, внутреннее сопротивление которого равно нулю. Полное сопротивление не включённого в схему реостата, измеренное между его крайними точками, равно  $R = 1$  кОм.



- 1) Как соотносятся силы токов, измеренные амперметрами, при крайнем левом положении скользящего контакта реостата? Ответ: Сила тока, измеренная амперметром  $A_1$ , при любых ненулевых значениях  $R_1$  и  $R_2$ , меньше измеренной амперметром  $A_2$
- 2) Сила тока, измеренная амперметром  $A_2$  при крайнем левом положении контакта, равна 7.5 мА, а при крайнем правом положении контакта — 10 мА. Чему равно значение сопротивления  $R_1$ ? Ответ выразите в омах, округлите до целых. Ответ: 1000
- 3) Чему равно значение сопротивления  $R_2$ ? Ответ выразите в омах, округлите до целых. Ответ: 2000
- 4) Чему равна сила тока, измеренная амперметром  $A_1$  при крайнем левом положении контакта? Ответ выразите в миллиамперах, округлите до десятых. Ответ: 2.5
- 5) Чему равна сила тока, измеренная амперметром  $A_1$  при крайнем правом положении контакта? Ответ выразите в миллиамперах, округлите до десятых. Ответ: 5.0
6. Когда цепь, собранную из очень большого числа одинаковых вольтметров, подключили к источнику напряжения, оказалось, что показания второго вольтметра  $V_2$  равны 2 В. Найдите: 1) показания вольтметров  $V_1$  и  $V_3$ ; 2) сумму показаний всех вольтметров. 3,24. 1,24. 5,24



7. Маленькая частица с положительным зарядом  $q$  движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  в вязкой среде. Сила сопротивления среды, действующая на частичку, прямо пропорциональна ее скорости. В начальный момент времени импульс частицы равнялся  $p_0$  и был направлен перпендикулярно линиям индукции. Вектор перемещения частицы к моменту, когда скорость частицы впервые оказалась противоположна начальной скорости, составляет острый угол  $\varphi$  с вектором  $p_0$ .

1) Какой путь прошла частица до остановки?

2) Чему равен модуль перемещения частицы до остановки?

Силой тяжести пренебречь.  $\ell = \frac{p_0}{qB} \operatorname{tg} \varphi$ .  $S = \frac{p_0}{qB} \sin \varphi$

8. Проводник в виде тонкого полукольца радиусом 10 см находится в однородном магнитном поле с индукцией  $5 \cdot 10^{-3}$  Тл. По проводнику течет ток 10 А. Найти силу, действующую на проводник, если плоскость, в которой он находится, перпендикулярна линиям индукции, а подводящие провода находятся вне поля. Ответ:  $F = 10^{-2}$  Н.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Основы методики преподавания физики в средней школе / В.Г. Разумовский и др.; Ред. А.В. Перышкин. – М.: Просвещение, 1984.
2. А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевич. Сборник задач по физике для 8 – 10 классов средней школы. – М.: Просвещение, 1978
3. В.А. Касьянов. Физика. 10, 11 кл. – М.: Дрофа, 2002.
4. М.Е. Тульчинский. Качественные задачи по физике в средней школе.- М.: Просвещение, 1972.
5. В.А. Буров, Б.С. Зворыкин, А.П. Кузьмин и др. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы. - М.: Просвещение, 1972.
6. Д. Джанколи. Физика.- М.: Мир, 1989.
7. А.А. Найдин. Использование обобщающих таблиц при формировании понятий. Физика в школе, 3 (1989).
8. О.Я. Савченко. Задачи по физике. Новосибирский государственный университет, 1999.
9. Н.В. Любимов, С.М. Новиков. Знакомимся с электрическими цепями. – М.: Наука, 1972.
10. Дж. Орир. Физика: Пер. с англ.-М.: Мир, 1981.
11. В.И. Лукашик. Сборник вопросов и задач по физике. – М.: Просвещение, 1981.
12. А.М. Прохоров и др. Физический энциклопедический словарь – М.: Советская энциклопедия, 1983.
13. Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев. Физика: Учебное пособие: В 3 кн.– М; ФИЗМАТЛИТ, 2004.
14. Мякишев Г.Я., Синяков А. З., Слободсков Б. А. Физика: Электродинамика: Учебник для 10-11 классов с углубленным изучением физики. – М.: Дрофа, 2010 г.
15. Кондратьев А. С., Ларченкова Л. А, Ляпцев А. В. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ: – М.: Издательская фирма «Физико-математическая

литература» МАИК «Наука/Интерпериодика», 2012 г.

16. А.А. Найдин. Система задач из одной задачи?! //ИД "Первое сентября", газета "Физика", № 8,2011 г.
17. А.А. Найдин. Как научить школьников открывать и применять законы? ж. «Физика в школе», №7, 2012 г.
18. Исаков А. Я. Физика. Решение задач ЕГЭ, часть 1 - 9. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012.
19. Славов А.В., Щеглова О.А., Абражевич Э.Б., Чудов В.Л., ФИЗИКА, ЗАДАЧИ, КАЧЕСТВЕННЫЕ ВОПРОСЫ, ТЕСТЫ. «Издательский дом МЭИ», 2016
20. Физика. 10—11 кл.: Сборник задач и заданий с ответами и решениями. Пособие для учащихся общеобразоват. учреждений / С.М. Козел, В. А. Коровин, В. А. Орлов. — М.: Мнемозина, 2001. — 254 с.: ил.
21. Кондратьев А.С., Прияткин Н.А. Современные технологии обучения физике: Учеб. пособие. — СПб.: С.-Петерб. ун-т, 2006.
22. Горлач В. В. Методы решения физических задач. – М.:ООО Юрайт, 2024.
23. К о н д р а т ь е в А. С., У з д и н В. М. Физика. Сборник задач. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 392 с. — ISBN 5-9221-0579-5.
24. Личный сайт Найдина Анатолия Анатольевича. <https://naidin.ru>