УТВЕРЖДЕНО
Заместитель председателя оргкомитета
заключительного этапа Республиканской олимпиады,
заместитель министра образования Республики Беларусь

______________________ К.С. Фарино

«___» марта 2007 г.

Республиканская физическая олимпиада 2007 год.

г. Минск

Теоретический тур

9 класс.

Оргкомитет и Жюри заключительного этапа Республиканской олимпиады школьников 2007 года

- приветствуют вас в городе Минске;

- поздравляют с успешным выступлением на предыдущих этапах олимпиады;

- желают успехов на заключительном этапе.

1. Полный комплект состоит из трех не связанных между собой заданий.

2. При оформлении работы каждую задачу начинайте с новой страницы. Первая половина тетради предназначена для чистовика, вторая - черновика. При недостатке бумаги обращайтесь к оргкомитету, *обеспечим!*

3. Подписывать тетради и отдельные страницы запрещается.

4. В ходе работы можете использовать ручки, карандаши, чертежные принадлежности, калькулятор.

5. Со всеми вопросами, связанными с условиями задач (но не с их решениями), обращайтесь к представителям Жюри.

Во всех задачах ускорение свободного падения считать равным $g = 9{,}81\frac{м}{с^2}$

Задание 1. «Разминка»

1.1 Лампочка.

Сопротивление лампочки накаливания существенно изменяется, в зависимости от яркости свечения, т.е. от величины проходящего через неё тока. На рис.1.1 приведена эта зависимость. Лампочку включают последовательно с нагрузкой, сопротивление которой равно $R = 30 Ом$ и источником напряжения $U = 20 В$. Определите силу тока в цепи.

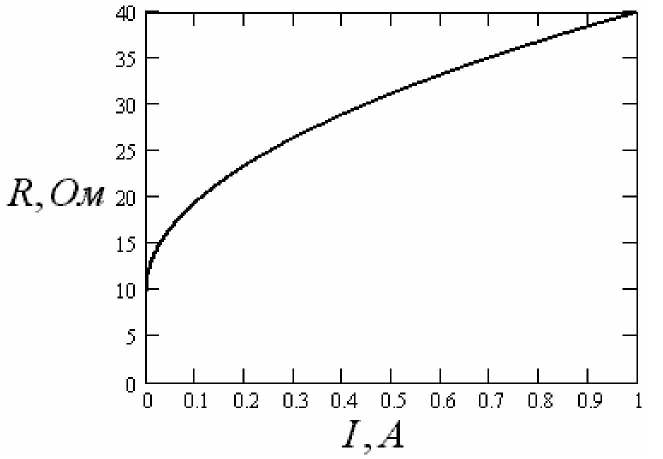
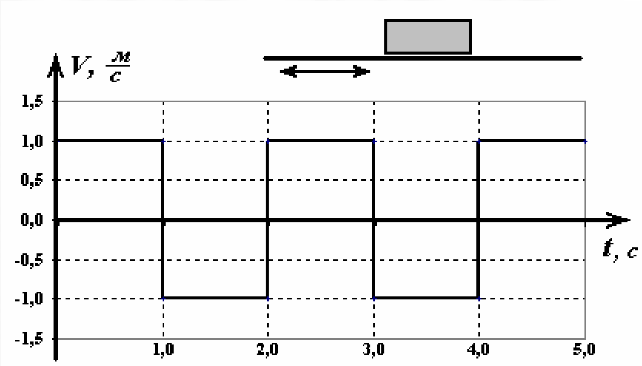
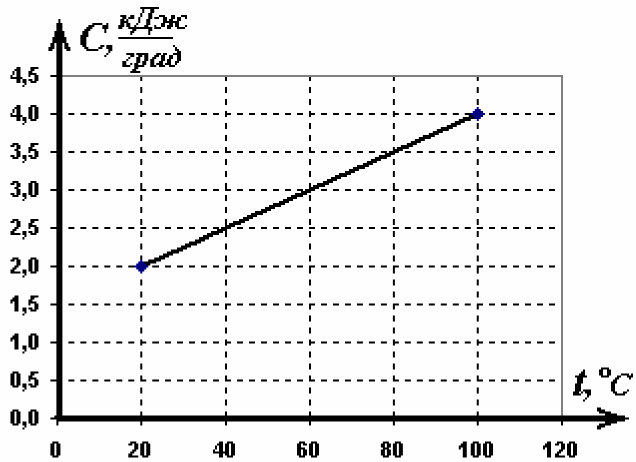


Рис. 1.1

1.2 «Виброход» Горизонтальная лента транспортера движется так, что каждую секунду ($\tau = 1{,}0 с$) ее скорость практически мгновенно[1] изменяет свое направление на противоположное, при движении ленты в каждом направлении модуль скорости равен $V = 1{,}0\frac{м}{с}$. График зависимости скорости ленты от времени показан на рисунке. На ленту положили брусок. Поверхности бруска и ленты таковы, что коэффициент трения между ними зависит от направления относительного движения («по шерсти и против шерсти»). При движении бруска влево относительно ленты, коэффициент трения равен $\mu_1 = 0{,}30$, при движении вправо относительно ленты коэффициент трения равен $\mu_2 = 0{,}40$. Найдите среднюю скорость движения бруска относительно поверхности земли за промежуток времени, значительно превышающий период колебаний ленты транспортера.



1.3 «Переменная теплоемкость»
Теплоемкость некоторого тела линейно изменяется[2] от $C_1 = 2{,}0\frac{кДж}{град}$ до $C_2 = 4{,}0\frac{кДж}{град}$ при изменении его температуры от $t_1 = 20°C$ до $t_1 = 100°C$. Тело, находящееся при температуре $t_1 = 20°C$, поместили в нагреватель постоянной мощности $P = 1{,}0 кВт$ (вся эта теплота идет на нагревание бруска). Найдите зависимость температуры тела от времени.



[1] Мгновенно изменить скорость движения тела невозможно, однако в данном случае считается, что время изменения скорости значительно меньше одной секунды.
[2] Не удивляйтесь: теплоемкость может изменяться по разным причинам, например, из-за плавления, протекания химических реакций и т.д.

Задание 2 «Вверх – вниз»

2.1 Плоский диск большого радиуса жестко закреплен на расстоянии $h = 5{,}0\ мм$ от гладкой горизонтальной поверхности (рис. 01). В центре диска расположено отверстие, в которое вставлена вертикальная труба радиуса $r = 3{,}0\ мм$, по которой в пространство между диском и плоскостью подается идеальная (несжимаемая и невязкая) жидкость, которая в дальнейшем растекается в зазоре между диском и плоскостью, полностью заполняя его. Массовый расход жидкости в вертикальной части струи $q = 0{,}15\frac{кг}{с}$. Плотность жидкости $\rho = 0{,}95 \cdot 10^3\ \frac{кг}{м^3}$.

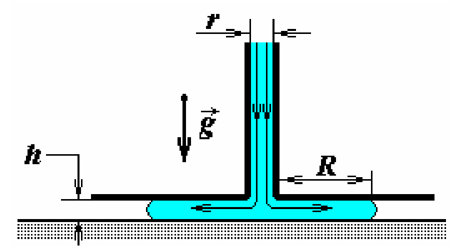


Рис. 01

В начальный момент времени жидкости на поверхности не было. Найдите:

2.1.1 Скорость υ_0 жидкости в нижнем сечении струи.

2.1.2 Зависимость радиуса $R(t)$ пятна «растекания» жидкости по поверхности от времени.

2.1.3 Зависимость скорости $\upsilon(t)$ движения границы жидкости по плоскости от времени;

2.2 «Водяной купол» Струя воды подается в Т - образную конструкцию, состоящую из двух одинаковых горизонтальных дисков и при дальнейшем движении образует водяной купол (рис. 02). Расход воды в трубе AB - $q = 5{,}5\frac{кг}{с}$. Расстояние $h = 2{,}0\ мм$, $r = 15\,см$, $H = 0{,}65\,м$. Определите радиус R водяного купола на земле. Как он изменится при уменьшении расстояния h между дисками в $\eta = 2{,}0$ раза? Поверхностным натяжением и вязкостью жидкости пренебречь.

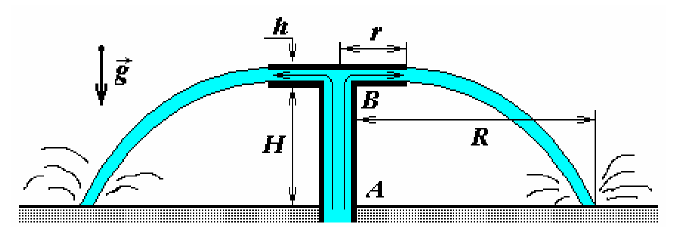


Рис. 02

Задание 3 «Кинематическая диаграмма»

В этой задаче Вам предлагается рассмотреть ***абсолютно упругое*** *соударение двух частиц. Частицы имеют различные массы и скорости, и удар* ***не обязательно*** *является центральным. В общем случае – это довольно сложная задача. Однако существует метод, позволяющий легко получить некоторые закономерности рассеяния частиц – метод кинематических диаграмм. Суть этого метода – рассмотрение процесса столкновения в пространстве скоростей.*

Будем рассматривать двухмерную задачу, т.е. скорости частиц до соударения имели только две проекции $\vec{v}_1 = (v_{1x}, v_{1y})$ и $\vec{v}_2 = (v_{2x}, v_{2y})$. Пространство скоростей подобно обычному координатному пространству, только по осям откладываются скорости, а не координаты частиц. В случае двух частиц, на диаграмме будет всего четыре точки: две точки соответствуют скоростям частиц до столкновения и две – после.

1. Как известно, в обычном координатном пространстве центр масс системы, состоящей из двух материальных точек, находится на соединяющем их отрезке. Покажите, что аналогичная ситуация наблюдается и в пространстве скоростей. Т.е. точка на диаграмме, соответствующая скорости движения центра масс принадлежит отрезку, соединяющему точки, соответствующие скоростям движения материальных точек.
2. Пусть две частицы с произвольными массами до столкновения обладают скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, которым на диаграмме соответствуют две точки: 1 и 2 (см. рис.1). А после некоторого столкновения – скоростями $\vec{v}_1'$ и $\vec{v}_2'$ (соответствующие точки $1'$ и $2'$). Обозначьте на диаграмме точку, соответствующую скорости движения центра масс системы.
3. Т.к. мы рассматриваем произвольные столкновения, то существует бесконечное множество вариантов рассеяния. Докажите, что модули скоростей частиц относительно их центра масс не изменяются при упругом столкновении. Найдите геометрическое место всех возможных точек $1'$ и $2'$.

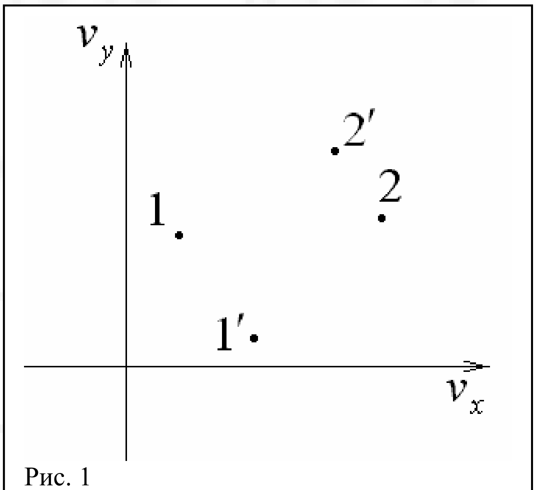


Рис. 1

4. Пусть на покоящуюся тяжёлую частицу с массой m_1 налетает лёгкая частица с массой m_2 и со скоростью $\vec{v}_2$. Используя метод кинематических диаграмм, определите, на какой максимальный угол может рассеяться лёгкая частица. Угол рассеяния – это угол между направлением вектора скорости до соударения и направлением вектора скорости после соударения.
5. Рассмотрите также и обратный случай. Пусть на покоящуюся лёгкую частицу с массой m_2 налетает тяжёлая частица с массой m_1 и со скоростью $\vec{v}_1$. На какой максимальный угол может рассеяться тяжёлая частица?

10 класс.

Задание 1. Разминка

1.1 Варистор.

Для защиты приборов от скачков напряжения, используют варисторы – полупроводниковые приборы, вольтамперная характеристика которых изображена на рис. 1.1 . Электрическая цепь изображена на рис. 1.2 ($U_0 = 12B$, $R = 20 Ом$). Варистор присоединяется параллельно нагрузке с сопротивлением $R_H = 10 Ом$. Неожиданно, напряжение U_0 возрастает в четыре раза (до $U_1 = 48B$). Во сколько раз изменится напряжение на нагрузке?

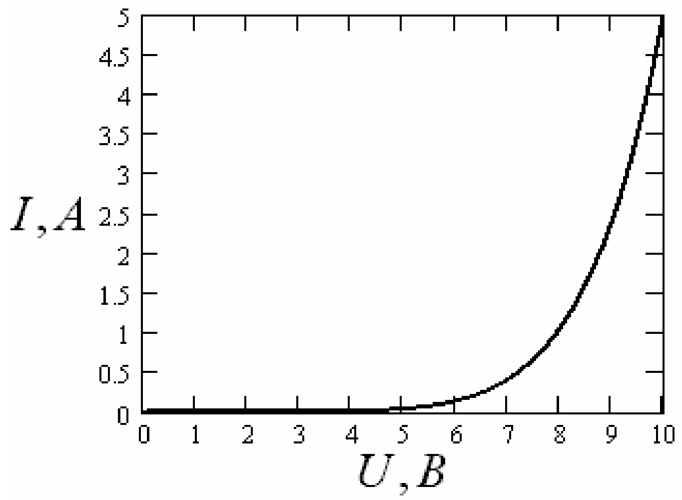


Рис. 1.1

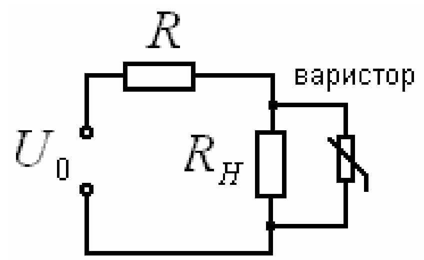


Рис. 1.2

1.2 «Гидроподушка».

Если брусок массы $m = 0{,}35 кг$ аккуратно опустить на бьющие вертикально вверх из отверстий струи со скоростью $\upsilon_0 = 4{,}5 \frac{м}{с}$, то на некоторой высоте h брусок «зависнет», оставаясь в покое (рис. 2). Оцените h, если радиус каждого отверстия $r = 2{,}0 мм$, и брусок опирается на $N = 20$ струй воды. Плотность воды $\rho = 1{,}0 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$. При оценке считайте, что струя воды после неупругого соударения с бруском растекается по нему и падает вниз, не меняя форму струй.

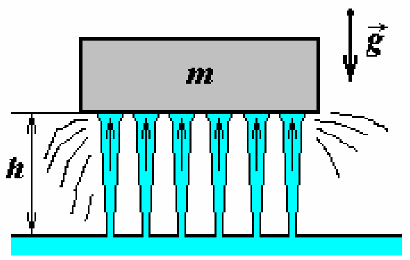


Рис. 2

Задание 2 «Торможение спутника»

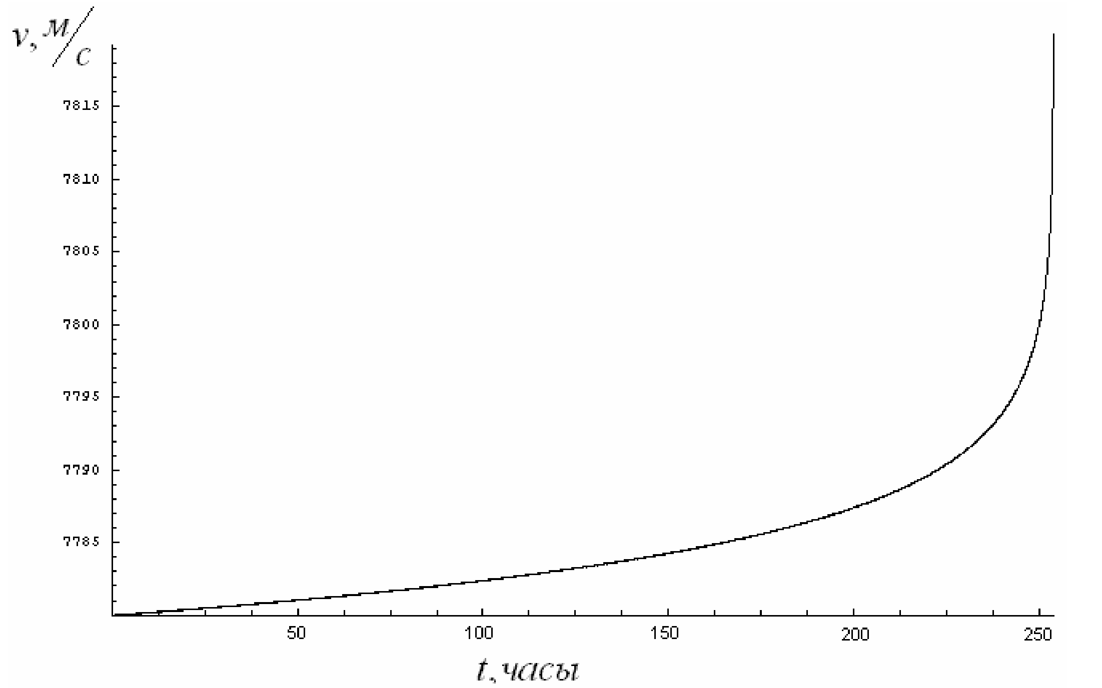


Рис. 1

Рассмотрим движение искусственного спутника Земли в верхних слоях атмосферы. Наличие атмосферного «хвоста» приводит к тому, что на спутник действует тормозящая сила, пропорциональная плотности газа, площади поперечного сечения спутника и квадрату его скорости:

$$F_C = C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 .$$

Безразмерный коэффициент C в данной задаче можно принять равным единице.

Сила эта невелика, и спутник может годами вращаться вокруг Земли. Однако радиус его орбиты будет постепенно уменьшаться, соответственно будет изменяться и скорость движения спутника. Предлагаем рассмотреть динамику спутника подробнее:

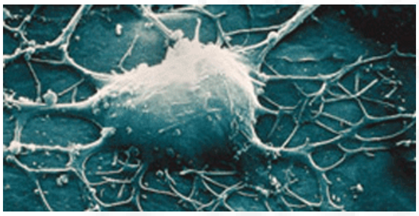
1. Спутник с массой m и площадью поперечного сечения S находится на орбите радиуса R_0. Определите скорость его движения v_0 и период обращения вокруг Земли T_0.
2. Чему равна полная механическая энергия спутника E_0?
3. Теперь учтём силу сопротивления. Плотность атмосферы на данной высоте – ρ_0. За один «виток» радиус орбиты изменяется на относительно маленькую величину ΔR ($\Delta R << R_0$), поэтому силу сопротивления на этом «витке» можно считать постоянной величиной. Определите относительное изменение скорости спутника $\dfrac{\Delta v}{v_0}$ и радиуса орбиты $\dfrac{\Delta R}{R_0}$ за один оборот.
4. Определите тангенциальное a_τ (по касательной к орбите) ускорение спутника на этой орбите.
5. С какой скоростью v_{n0} спутник приближается к центру Земли на этой высоте? Если бы плотность атмосферы изменялась по закону $\rho = AR^\alpha$, то при некотором значении α, эта скорость оставалась бы постоянной величиной. Определите, чему равен этот показатель α.

6. Рассмотренное явление может дать ценную информацию о верхних слоях атмосферы. Сферический зонд с массой $m = 100 кг$ и площадью поперечного сечения $S = 1{,}00 м^2$ выводят на орбиту на высоте $h = 208 км$. Не составляет большого труда измерять изменение скорости спутника. На рисунке 1 приведён график зависимости скорости спутника от времени наблюдения.
Известно, что плотность атмосферы экспоненциально уменьшается с высотой, т.е. $\rho \sim e^{-\beta h}$. Используя приведенный график, определите постоянную β.

Некоторые постоянные:

Радиус Земли $R_З = 6{,}40 \cdot 10^6 м$.

Масса Земли $M = 6{,}00 \cdot 10^{24} кг$.

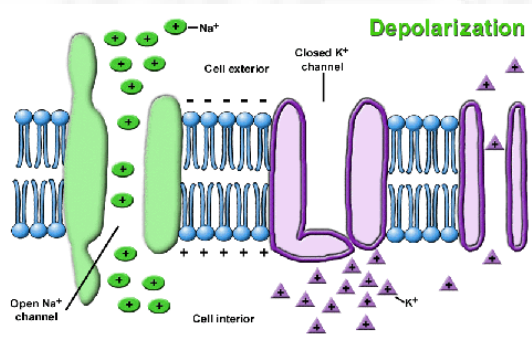


Задание 3. «Нервное возбуждение»

А. Ходжкин. и Э. Хаксли получили Нобелевскую премию по физиологии и медицине 1963 г. «за открытия, касающиеся ионных механизмов, участвующих в возбуждении и торможении в периферическом и центральном участках мембраны нервной клетки».

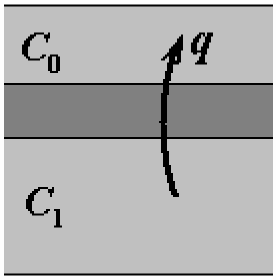
Основой жизнедеятельности живых организмов, во многом, являются процессы, протекающие в мембранах клеток. В данной задаче вам необходимо рассмотреть некоторые подходы к описанию процесса возбуждения нервных клеток в рамках примитивной модели.

Основная идея теории возбуждения клетки заключается описании процессов переноса ионов через мембрану. Проницаемость мембраны различна для различных ионов, кроме того в мембрану встроены большие белковые молекулы, играющие роль насосов, способных переносить ионы определенного типа с одной стороны мембраны на другую (затрачивая на это энергию). Благодаря наличию этих насосов – каналов, концентрации ионов различны с разных сторон от мембраны, и как следствие появляется разность электрических потенциалов между противоположными стенками мембраны.



Еще более упростим модель. Будем считать, что мембрана является плоскопараллельной пластинкой толщиной a. Снаружи клетки находится слой жидкости (воды) толщиной h_0, а внутриклеточное пространство моделируется слоем жидкости толщиной h_1. Диэлектрические проницаемости всех сред будем считать равными единице. Концентрации частиц вне клетки будем обозначать C_0, а внутри - C_1 (при необходимости будем добавлять индексы, указывающие тип частиц).

1. Диффузия.



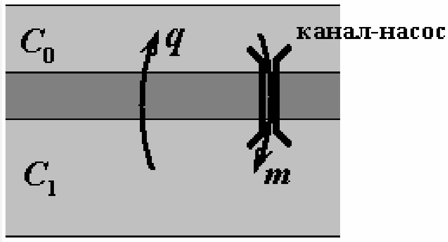
Рассмотрим движение незаряженных молекул через мембрану без «насосов» (считаем, что электрических зарядов в природе не существует). Плотность диффузионного потока частиц q (число частиц пересекающих единицу площади мембраны в единицу времени) пропорциональна разности концентраций этих частиц с противоположных сторон мембраны

$$q = g\Delta C \qquad (1)$$

где g - коэффициент пропорциональности, который назовем проницаемостью мембраны для данных частиц.

Пусть в начальный момент времени концентрации рассматриваемых частиц с разных сторон мембраны различны. Оцените время, в течение которого концентрации частиц выровняются.

2. Вынужденный перенос и диффузия.



Рассмотрим теперь мембраны в которую встроены каналы-насосы принудительно переносящие рассматриваемые молекулы внутрь клетки. Пусть эти каналы равномерно распределены по поверхности мембраны, причем на единицу площади приходится n каналов, каждый из которых переносит в единицу времени m молекул из внеклеточного пространства внутрь клетки.

Определите установившуюся разность концентраций $\Delta\overline{C} = C_0 - C_1$ между разными сторонами мембраны.

3. Электрическое поле.

Далее будем считать, что рассматриваемые частицы являются ионами калия K^+. Пусть концентрация ионов вне клетки равна C_0, а внутри нее C_1. Найдите разность потенциалов [3]между стенками мембраны $\Delta\varphi$, пренебрегая наличием ионов внутри мембраны.

4. Перенос ионов.

При наличии электрического поля помимо потока ионов через мембрану, обусловленного разностью концентрации, появляется поток ионов, обусловленный наличием электрического поля. В этом случае суммарная плотность потока ионов через мембрану определяется формулой

$$q = g\Delta C + bC_i\Delta\varphi\,, \qquad (2)$$

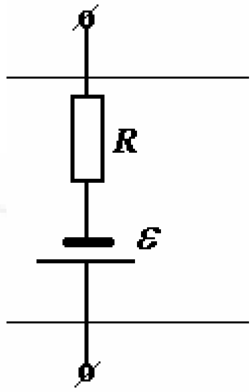
где $\Delta\varphi$ - разность потенциалом между стенками мембраны, C_i - концентрация ионов с той стороны мембраны, от которой начинается движение ионов через мембрану под действием электрического поля (для положительных ионов со стороны большего потенциала).

Найдите установившуюся разность потенциалов между стенками мембраны.

[3] В реальности внутри и вне клетки присутствуют ионы и других типов, которые также вносят свой вклад в создание поля. Однако их концентрации практически не изменяются поэтому основную роль играют потенциалы изменяющихся полей, создаваемых теми ионами, концентрации которых изменяются. Поэтому здесь и в дальнейшем принимаем во внимание только их и поля создаваемые ими.

Используйте все характеристики мембраны, введенные в предыдущих пунктах. При равенстве концентраций с разных сторон от мембраны, эти концентрации равны C_e.

5. Эквивалентная схема.
Процессы протекания тока через мембрану могут быть описаны с помощью эквивалентной электрической схемы. Свяжите параметры этой схемы ЭДС источника и сопротивление цепи с параметрами реальной мембраны и характеристиками ионных потоков.



6. Как показали *А. Ходжкин. и Э. Хаксли* для объяснения возникновения нервных импульсов необходимо принимать во внимание, как минимум два типа ионов. Вторым основным типов ионов являются ионы натрия Na^+. В мембране также присутствуют натриевые каналы – насосы, принудительно переносящие ионы натрия **<u>из клетки наружу</u>**. Будем считать, что для обоих типов ионов известны параметры эквивалентных схем R_K, ε_K и R_{Na}, ε_{Na} ($\varepsilon_{Na} > \varepsilon_K$). Пусть изначально все натриевые каналы закрыты, а затем в некоторый момент времени открываются на небольшой промежуток времени τ. Опишите, как будет изменяться разность потенциалов между стенками мембраны с течением времени. Постройте примерный график этой зависимости.

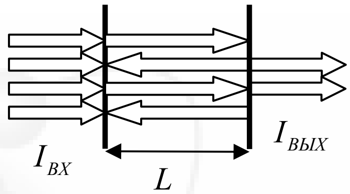
Если вы все решили правильно, то полученный график и будет моделировать временной ход нервного импульса!

11 класс.

Задание 1. Разминка.

1.1 «Оптическая бистабильность»

Интерферометр Фабри-Перо (ИФП) представляет собой два тонких плоских зеркала с коэффициентом отражения по интенсивности $R = 0,50$ каждое, расположенных параллельно на расстоянии $L = 3,00 см$. На интерферометр направляют параллельный монохроматический пучок лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 500 нм$. В результате многократного отражения и интерференции света коэффициент пропускания (т.е. отношение интенсивности выходящего излучения $I_{ВЫХ}$ к интенсивности входящего $I_{ВХ}$) описывается формулой



$$T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2}\sin^2\psi},$$

где $\psi -$ набег фазы световой волны при **однократном** прохождении от левого зеркала до правого.

Пространство между зеркалами заполняют прозрачным диэлектриком, средний показатель преломления которого зависит от **интенсивности света**, **выходящего**[4] из интерферометра

$$n = n_0 + \gamma I_{ВЫХ},$$

где $n_0 = 2,30$, $\gamma = 1,80 \cdot 10^{-8} см^2 / Вт$.

Изобразите график зависимости выходной интенсивности света от входной интенсивности при плавном изменении $I_{ВХ}$ от 0 до $1 кВт / см^2$ и обратно до 0. Поглощением света в диэлектрике пренебречь.

1.2 «Грязный космос»

Ракета массой m, летящая в космическом пространстве с выключенными двигателями со скоростью υ_0, попадает в облако пыли (Рис.2) со средней плотностью ρ, имеющее протяженность L в направлении движения ракеты. Пылинки неподвижны и прилипают к ракете при столкновениях с ней. Площадь поперечного сечения ракеты S. Какую скорость υ будет иметь ракета при вылете из облака пыли? Сколько времени t займет пролет ракеты через облако?

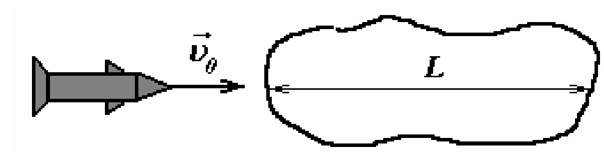


Рис. 2

[4] Логичней, конечно задавать зависимость показателя преломления диэлектрика от интенсивности света в нем, но мы решили упростить вам жизнь.

Задание 2. «У природы нет плохой погоды»

Достоверные прогнозы погоды до сих пор остаются проблемой для синоптиков – слишком уж много факторов на нее может повлиять. Но мы с вами не будем пытаться предсказать погоду на завтра – в этой задаче вам предстоит исследовать наиболее характерные закономерности климата планеты.

2.1. «Средняя температура»

Рассмотрим некую планету (условимся называть её Землёй), радиусом $R_З = 6370 км$, вращающуюся по круговой орбите радиусом $L = 150 млн.км$ вокруг звезды (условно Солнца) радиусом $R_C = 696 тыс.км$ и температурой поверхности $T_C = 5800 K$.

Определите поток излучения Солнца (солнечную постоянную) Φ_0 (т.е. энергию, проходящую за единицу времени через площадку единичной площади, перпендикулярную световым лучам) вблизи поверхности Земли.

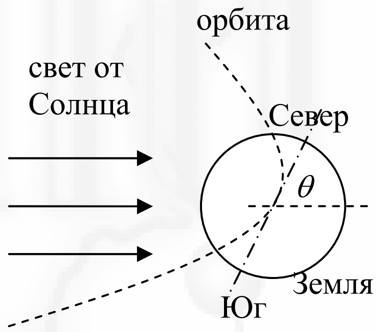
Земля представляет собой твердый шар с очень большой теплопроводностью. Определите среднюю температуру Земли $T_З$.

И Солнце, и Землю считайте абсолютно черными телами.

По закону Стефана-Больцмана, энергия, излучаемая с единицы площади абсолютно черного тела за единицу времени равна σT^4, где постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} Вт/м^2К^4$.

2.2. «Весна, лето, осень, зима и снова весна»

На Земле наблюдается смена времен года. Для объяснения этого явления рассмотрим другую модель Земли: будем считать (как это есть на самом деле), что земной шар не успевает ни прогреваться, ни промерзать из-за низкой теплопроводности. Поэтому его теплоемкость определяется только тем слоем, температура которого успевает измениться при смене времен года. Для оценки теплоемкости считайте, что вода прогревается однородно до глубины $h = 5,00 м$, а более глубокие слои не греются. Ось вращения Земли наклонена к плоскости её орбиты под углом $\theta = 66,5^\circ$. Воображаемая линия «экватор» делит Землю на северное и южное полушарие. Переносом тепла через экватор можно пренебречь.



Среднесуточная мощность солнечного излучения, падающая на северное полушарие зависит от времени года (если отсчет вести от самого длинного дня), приблизительно как $P = 2\pi R_З^2 (A + B\cos\Omega t)$, где $2\pi R_З^2$ – площадь северного полушария.

2.2.1 Определите постоянную Ω. Оцените постоянные A и B.

2.2.2 Найдите зависимость среднесуточной температуры T северного полушария от времени года t.

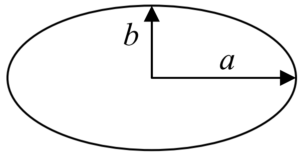
2.2.4 Найдите задержку во времени τ между самым длинным и самым теплым днем года.

Плотность воды равна $\rho = 1000 кг/м^3$, удельная теплоемкость $c = 4200 Дж/(кг \cdot K)$. Считайте, что вода полностью поглощает все излучение, падающее на неё. Период движения Земли вокруг Солнца равен $t_З = 365,25 суток$.

Примечания.

1) Площадь круга равна πR^2. *Площадь поверхности сферы равна* $4\pi R^2$.

2) Если смотреть на круг сбоку, то он виден как эллипс.



3) Площадь эллипса равна πab, *где* a *и* $b-$ *большая и малая полуоси эллипса.*

4) Справедливы следующие тождества

$$\sin(\alpha+\beta)=\sin\alpha\cos\beta+\cos\alpha\sin\beta$$

$$\cos(\alpha+\beta)=\cos\alpha\cos\beta-\sin\alpha\sin\beta$$

5) При $|\xi|<0,1$ *справедливо выражение* $(1+\xi)^n \approx 1+n\xi$.

6) $2+2\approx 4$.

2.3. «Парниковый эффект»

Согласно формуле Планка, интенсивность излучения абсолютно черного тела, приходящаяся на интервал длин волн от $\lambda-\Delta\lambda/2$ до $\lambda+\Delta\lambda/2$ равна

$$\Delta I=\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}}-1}\Delta\lambda \quad ,$$

где $e-$ экспонента ($e\approx 2,7183$), $c=3,00\cdot 10^8\,м/с-$ скорость света в вакууме, $h=6,63\cdot 10^{-34}\,Дж\cdot с-$ постоянная Планка, $k=1,38\cdot 10^{-23}\,Дж/К-$ постоянная Больцмана, $T-$ температура абсолютно черного тела.

В данном пункте вернемся к модели Земли, как шара с очень большой теплопроводностью. Кроме того, у Земли есть газовая атмосфера, полностью поглощающая излучение с длиной волны от $\lambda_{\min}=8,0мкм$ до $\lambda_{\max}=12,0мкм$. Считайте, что теплообмен между поверхностью Земли и ее атмосферой осуществляется только посредством излучения. Температуру атмосферы считайте постоянной, не зависящей от ее высоты.

Из-за того, что температуры Солнца и Земли различны, их спектры излучения лежат в разных диапазонах длин волн, и атмосфера поглощает излучение Солнца и Земли по-разному.

2.3.1 Оцените суммарный коэффициент поглощения атмосферой излучения Солнца A_0 и излучения Земли A_1.

2.3.2 Определите среднюю температуру земной поверхности $T_З$ в рамках данного приближения.

2.4. «Ядерная зима или почему вымерли динозавры»

В результате извержения крупного вулкана атмосфера Земли наполнилась дымом (мелкими частицами пыли и сажи) и стала частично непрозрачна для любого излучения (степень зачернённости атмосферы $\eta=0,6$), помимо полного поглощения излучения с длинами волн от $\lambda_{\min}=8,0мкм$ до $\lambda_{\max}=12,0мкм$.

2.4.1 Определите среднюю температуру земной поверхности в этом случае.

Задание 3. «Охлаждение светом»

В 1997 году профессору Стивену Чу (Steven Chu), доктору Вильему Д. Филлипсу (William D. Phillips) и профессору Клоди Кохен-Танноуджи (Claude Cohen-Tannoudji) была присуждена Нобелевская премия «за разработку методов охлаждения и удержания атомов при помощи лазерного луча». Реализация такого эксперимента – очень непростая техническая задача. Однако основные теоретические принципы не так уж и сложны. Суть происходящих явлений можно легко понять, если хорошо знать школьную физику. В этой задаче Вам предстоит рассмотреть физические явления, приводящие к торможению (а значит и охлаждению) атомов, а также привести численные оценки основных величин.

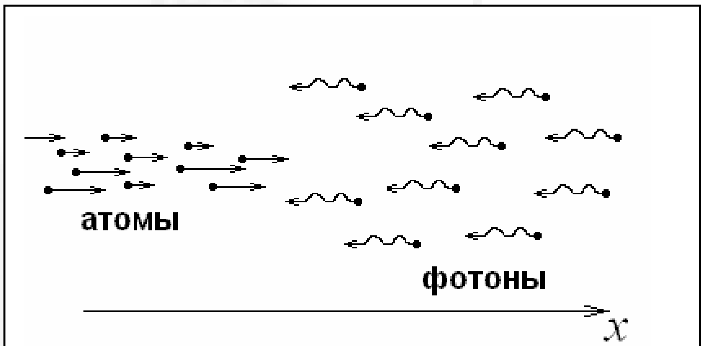


Рис. 1

Для проведения эксперимента необходима вакуумная камера, пучок атомов и лазер, способный излучать фотоны строго определённой энергии. Тонкий пучок атомов натрия ($m = 23\,а.е.м.$) запускается вдоль оси камеры (ось Ox), а навстречу ему направляют лазерный луч (см. рис. 1). Скорости атомов в пучке первоначально направлены вдоль оси камеры. В пучке существует некоторое распределение по скоростям, т.е. скорость некоторых атомов может значительно отличаться от средней скорости в пучке. Кроме того, будем считать пучок достаточно разреженным (т.е. можно пренебречь столкновениями атомов между собой), а интенсивность лазерного луча достаточно большой.

Как известно, атомы могут поглощать фотоны определённой энергии и переходить в возбуждённое состояние. У атомов натрия первому возбуждённому состоянию соответствует энергия $E_1 = 2{,}1 эВ$.

1. Какой энергией $E_Ф$ должны обладать фотоны в пучке, чтобы происходило их поглощение атомами, движущимися со скоростью $v_0 = 500\,{}^{м}\!/_{с}$?

2. Оцените, на сколько в среднем изменяется скорость движения этих атомов вдоль оси Ox после излучения фотона.

3. Определите также максимальный угол отклонения этих атомов от направления Ox.

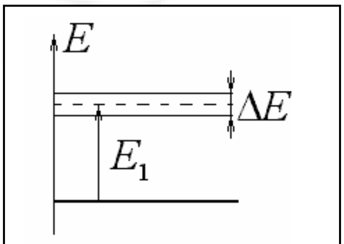


Рис. 2

4. Известно, что энергетический уровень возбуждённого состояния натрия обладает некоторой шириной $\Delta E = 4{,}4 \cdot 10^{-8}\, эВ$ (см. рис.2). Поэтому в поглощении фотонов с энергией $E_Ф$ будут участвовать атомы, скорости которых лежат в некотором промежутке $(v_0 - \Delta v_0, v_0 + \Delta v_0)$. Определите Δv_0.

Из решения предыдущих пунктов становится ясно, что через некоторый, довольно маленький, промежуток времени диапазон $(v_0 - \Delta v_0, v_0 + \Delta v_0)$ опустеет. Для дальнейшего охлаждения необходимо слегка изменить частоту лазерного излучения.

5. Начнём охлаждение пучка с практически самых «горячих» атомов, движущихся со скоростью $v_{max} = 1000\,{}^{м}\!/_{с}$. После их незначительного охлаждения будем слегка изменять частоту, тем самым захватывая в процесс охлаждения и более медленные атомы. Оцените

время необходимое для практически полной остановки всего пучка. Оцените также расстояние вдоль оси Ox, которое пролетят «горячие» атомы.

При малых скоростях, отклонения от направления движения становятся значительными и пучок быстро рассеивается. Для дальнейшего охлаждения атомы помещают в своеобразную ловушку, образованную шестью встречными лазерными лучами с энергией фотонов равной $E'_Ф = E_1 - \Delta E/2$ (см. рис. 3).

6. Оцените минимальную температуру атомов в такой ловушке.

Указание. В последнем пункте необходимо учитывать упругое рассеяние фотонов на атомах. Кроме этого, нужно знать, что процесс поглощения фотонов происходит с определённой вероятностью. Можно считать, что вероятность поглощения практически равна единице в случае, когда частота налетающего фотона соответствует переходу ровно в центр возбуждённого состояния, т.е. переходу с энергией E_1. *И эта вероятность уменьшается до нуля для переходов с энергиями* $E_1 + \Delta E/2$ *и* $E_1 - \Delta E/2$.

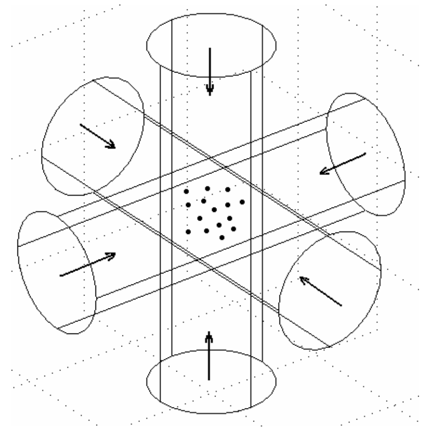


Рис. 3

<u>Некоторые физические постоянные:</u>

Заряд электрона $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ Кл$.

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

Число Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ моль^{-1}$.

Постоянная Планка $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ Дж \cdot с$.