

**Департамент образования и социально-правовой защиты детства
администрации города Нижнего Новгорода
муниципальное образовательное учреждение Лицей № 40**

603006, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Варварская д. 15 а, тел.: 433-19-
49 факс: 433-21-61,

e-mail: lycee40@sandy.ru <http://www.lic40nn.edusite.ru/>

Методическое объединение учителей физики, основ
физического эксперимента и астрономии

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
И СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ 8-Х И 10-Х КЛАССОВ
ЭЛЕКТРОСТАТИКА**

Автор: А.В. Беликович

Нижний Новгород, 2024г.

Беликович А.В

Методические рекомендации и сборник задач по электродинамике для учащихся 8-х и 10-х классов. Электростатика – Нижний Новгород: ЛИЦЕЙ 40, 2024. 79 с.

В пособии приведены методические рекомендации по разделу физики «Электростатика» в 8-м и 10-м классах для школ с углубленным изучением предмета, приведены примеры решения задач, рассмотрены дополнительные к основной программе методы решения, создана подборка задач для самостоятельной работы и подготовки к олимпиадам.

Автор и издательство приносят свои извинения за неточности, ошибки, опечатки и пр., допущенные при наборе и верстке текста.

©Беликович А.В.

©издательство ЛИЦЕЙ 40

Глава 1. Электростатика.

§1. Основные понятия и законы.

Электромагнитное поле – это поле, существующее вокруг электрических зарядов и воздействующее на электрические заряды.

Электромагнитное поле состоит из двух частей – электрического поля и магнитного поля.

Электрическое поле—это часть электромагнитного поля, создаваемое **любыми** электрическими зарядами (движущимися и неподвижными) и воздействующая на **любые** электрические заряды.

Магнитное поле—это часть электромагнитного поля, создаваемое **движущимися** электрическими зарядами и воздействующая на **движущиеся** электрические заряды.

Электрическое поле, создаваемое неподвижными зарядами, и действующее на неподвижные заряды, называется электростатическим полем.

Электрический заряд – это характеристика тела, определяющая его участие в электромагнитных взаимодействиях.

Единица измерения величины заряда—1 кулон (1 Кл)

Существуют два вида электрических зарядов: положительные и отрицательные

Электризация тел – это способ получения заряженных тел из незаряженных.

Виды электризации:

1) При контакте (при трении увеличивается площадь соприкосновения).

2) При освещении видимым светом или ультрафиолетом.

3) Влиянием. (электростатической индукцией)

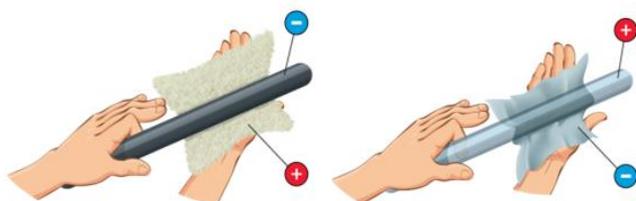


Рис.1

Эбонитовая палочка, потертая о мех, приобретает отрицательный заряд, а **стеклянная** палочка, потертая о бумагу—положительный (рис.1).

Явление электростатической индукции – это возникновение зарядов на поверхности проводника под действием внешнего поля

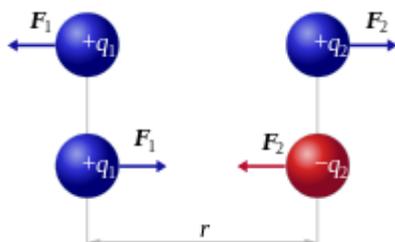


Рис. 2.

Закон взаимодействия электрических зарядов: одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются (рис.2).

Закон Франклина (закон сохранения электрического заряда): суммарный электрический заряд в электрически замкнутой системе не меняется.

Электрически замкнутая система – это система, через границу которой не проникают электрические заряды

Закон сохранения электрического заряда имеет фундаментальное значение. Он выполняется не только при электризации, когда взаимодействующие тела получают заряды равные по величине и противоположные по знаку. В микромире заряженные частицы рождаются парами: отрицательная и положительная.

Закон Кулона.

Два точечных неподвижных заряда взаимодействуют в вакууме с силой прямо пропорциональной произведению их зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

k—коэффициент пропорциональности ($k=9 \times 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$)
 $|q_1|$ и $|q_2|$ —модули зарядов
 r—расстояние между зарядами.

Границы применимости закона Кулона:

1) Заряды должны быть неподвижными, так как вокруг подвижных зарядов возникает магнитное поле, которое не учитывается в силе Кулона.

2) Заряды должны быть в вакууме, так как вещество искажает электрическое поле.

3) Заряды должны быть точечными (их размеры много меньше расстояния между ними)

Сила Кулона—это сила, возникающая между двумя точечными неподвижными заряженными телами в вакууме или воздухе. Как и все силы она измеряется в ньютонах.

Задачи для самостоятельного решения на электризацию.

Задача 1.1. Как с помощью отрицательно заряженного металлического шарика зарядить положительно другой такой же шарик, не изменяя заряда первого шарика?

Задача 1.2. Заряженное тело действием своего поля электризует находящиеся вблизи легкие предметы и вызывает на каждом из них появление зарядов обоих знаков. Почему же предметы всегда притягиваются к заряженному телу, а не отталкиваются от него?

Задача 1.3. Если к заряженной полоске бумаги приблизить руку, то полоска притягивается рукой. Дайте объяснение.

Задача 1.4. Соломинка притянулась к заряженному предмету. Можно ли утверждать, что и соломинка бала предварительно заряжена? Можно ли было бы это

утверждать, если бы соломинка отталкивалась от приближаемого заряженного тела?

Задача 1.5 Как направлена сила, действующая на положительно заряженную пылинку, находящуюся внутри полого отрицательно заряженного шара?

Задача 1.6. Одинаковые ли силы действуют на равные величине заряды q_1 и q_2 со стороны поля заряженного металлического шара (см. рисунок 3)?



Рис.3

Задача 1.7. К легкой металлической гильзе, висящей на шелковой нити, подносят заряженную палочку. При этом можно подобрать такое расстояние, при котором гильза еще находится в состоянии покоя. Но стоит прикоснуться к ней пальцем, как она устремится к палочке. Почему это явление происходит?

Задачи для самостоятельного решения на закон Кулона.

Задача 1.8. Два маленьких одинаковых металлических шарика, заряженные зарядами $5q$ и $-q$, находятся на некотором расстоянии в вакууме. Шарики привели в соприкосновение и раздвинули на прежнее

расстояние. Как изменился модуль силы взаимодействия шариков?

Задача 1.9. Два маленьких одинаковых металлических шарика массой 1 г , заряженные зарядами $5q$ и q , висят на изолирующих нитях в вакууме. Нити длиной 10 см прикреплены в одной точке. Шарики привели в соприкосновение и отпустили? Расстояние между ними стало 10 см . Найти величину q

Задача 1.10. Два маленьких одинаковых шарика подвешены на изолирующих невесомых нитях длиной L , прикрепленных к потолку в одной точке. Заряды шариков равны $+q$ и $+3q$. Расстояние между шариками $2d$. Найти массу одного из шариков.

Задача 1.11. Три маленьких одинаково заряженных шарика массой 4 г каждый подвешены на шелковых нитях длиной 1 м . Верхние концы нитей закреплены в одной точке. Расстояние от каждого шарика до двух других одинаково: 5 см . Каков заряд каждого шарика?

Задача 1.12. Расстояние между находящимися в вакууме неподвижными точечными зарядами $q_1 = 2\text{ нКл}$ и $q_2 = 3,2\text{ нКл}$ равно $L = 30\text{ см}$. Заряд $q_3 = 1\text{ нКл}$ перемещается по прямой от первого заряда ко второму, при этом в определенной точке равнодействующая сил,

действующих на него, становится равной нулю. На каком расстоянии точка находится от заряда q_1 ?

Задача 1.13. На столе закреплён длинный тонкий непроводящий стержень, наклонённый под углом α к горизонту (см. рисунок 4). На стержне закреплена маленькая заряженная бусинка. Выше неё на стержень надета другая такая же заряженная бусинка, которая может скользить по стержню без трения. Заряды бусинок одинаковы и равны q , масса бусинки равна m . Определите расстояние l между бусинками, если они находятся в равновесии. Сделайте рисунок с указанием сил, действующих на верхнюю бусинку. Электростатическим воздействием стола на бусинки пренебречь.

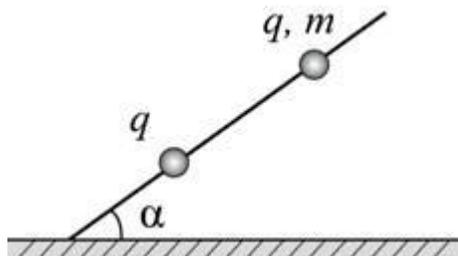


Рис.4

Задача 1.14. Шарик массой m и зарядом $-q$ вращается с линейной скоростью V на нити в горизонтальной плоскости (рис. 5). Нить составляет с вертикалью угол α . В точке прикрепления нити расположен заряд $-3q$. Найти силу натяжения

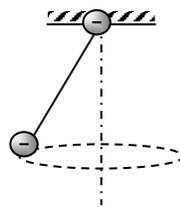


Рис.5

Задача 1.15. Шарик массой m и зарядом $+q$ вращается с линейной скоростью V на нити в горизонтальной плоскости (рис. 6). Нить составляет с вертикалью угол α . В центре вращения закреплён заряд $+3q$. Найти длину нити.

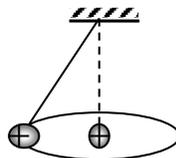


Рис.6

§2. Характеристики электростатического поля.

Электростатическое поле описывается двумя характеристиками: **напряжённостью и потенциалом**.

Чтобы измерить эти характеристики поля, созданного системой зарядов, вносят ещё один заряд, влияние которого на измеряемое поле не учитывается. Такой заряд называют пробным. При измерении поля не учитывается влияние поля пробного заряда на измеряемую систему зарядов.

§2.1. Напряжённость.

Напряжённость электростатического поля – это векторная физическая величина, равная отношению силы, действующей на пробный заряд со стороны электрического поля, к величине этого заряда.

Напряжённость является **силовой** характеристикой электрического поля в выбранной точке пространства. Она используется так же как характеристика электрического поля не являющегося электростатическим (вихревого и быстро меняющегося со временем)

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q},$$

\vec{E} – напряжённость электрического поля,
 \vec{F} — сила, с которой поле действует на пробный заряд,
 q – величина пробного заряда

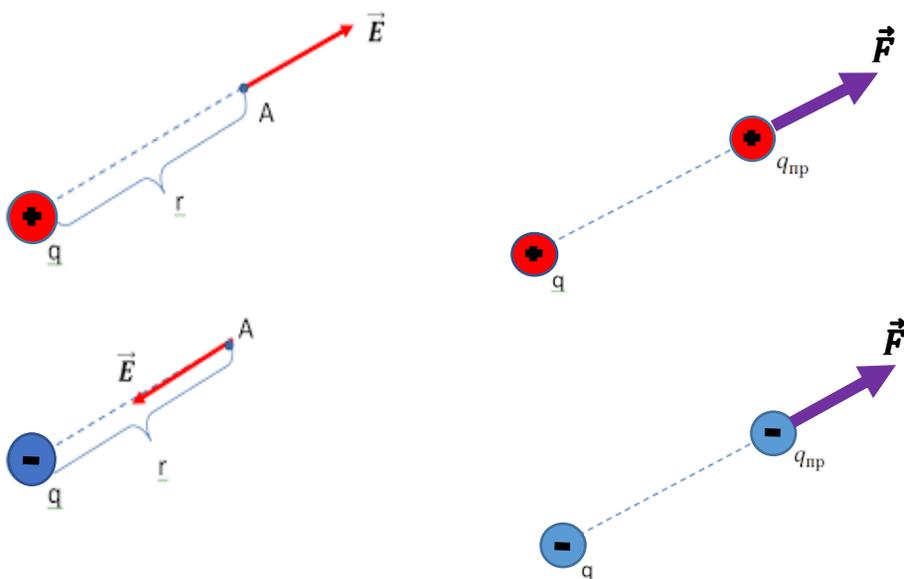


Рис. 7. Направление напряжённостей полей точечных зарядов и сил Кулона.

При обозначении напряжённости на чертеже принято помещать начало стрелки вектора в точку, в которой измерена эта величина (рис.8).

Сила, действующая на пробный заряд всегда со направлена вектору напряжённости, если пробный заряд положителен, и противоположно направлена, если пробный заряд отрицательный.

Направление вектора напряжённости всегда от положительного заряда или к отрицательному.

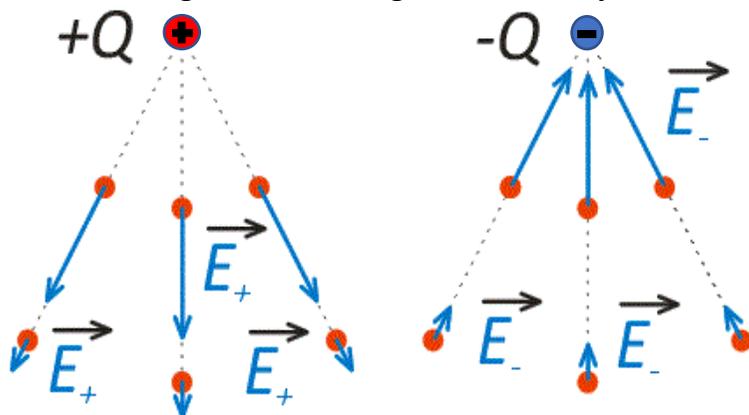


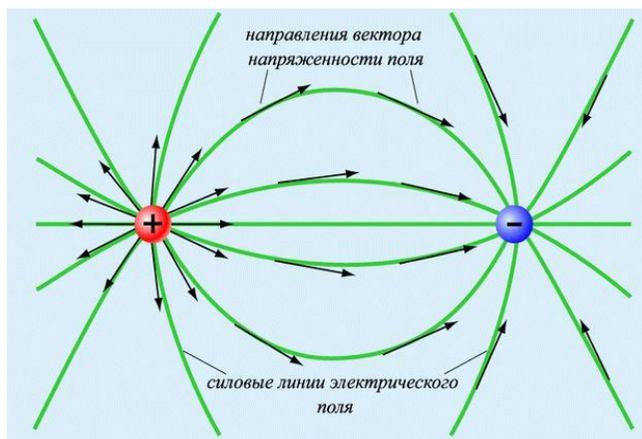
Рис. 8. Направление векторов напряжённости в различных точках пространства.

Для наглядности представления об электростатическом поле вводят понятия силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.

Силловые линии электростатического поля – это воображаемые линии, касательная к которым в любой точке поля совпадает с направлением вектора напряженности.

Свойства силовых линий электростатического поля:

- 1) Начинаются на плюсе, заканчиваются на минусе.
- 2) Никогда не пересекаются.
- 3) Там , где линии гуще, там поле имеет большую напряженность.
- 4) Всегда направлены в сторону наиболее быстрого убывания потенциала
- 5) Линии всегда перпендикулярны поверхности проводника и эквипотенциальным поверхностям



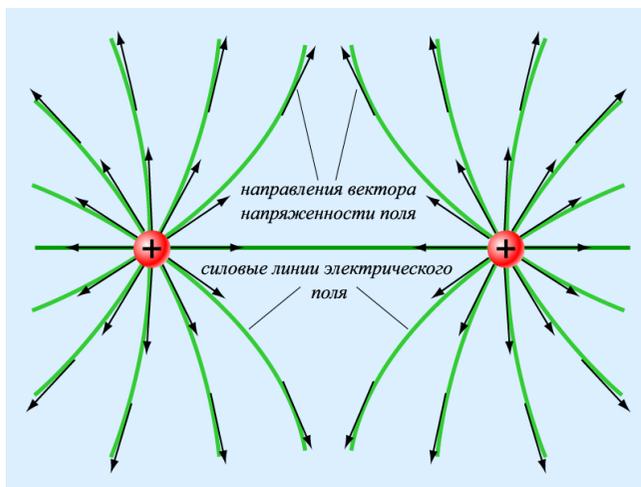


Рис.9. Примеры силовых линий электростатического поля.

В зависимости от взаимного расположения зарядов структура силовых линий меняется.

Монополь – система из одного точечного заряда. Монополь может состоять как из положительного, так и отрицательного заряда, при этом силовые линии отличаются направлением.

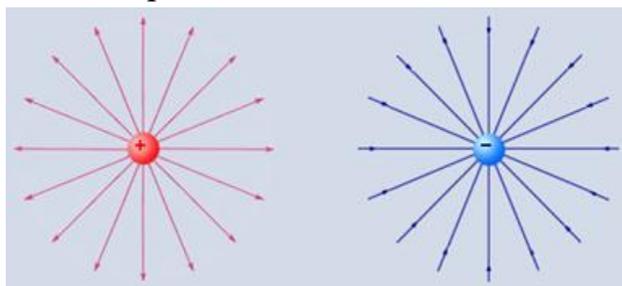


Рис. 10. Структура поля монополя:

Диполь – система из двух точечных зарядов.

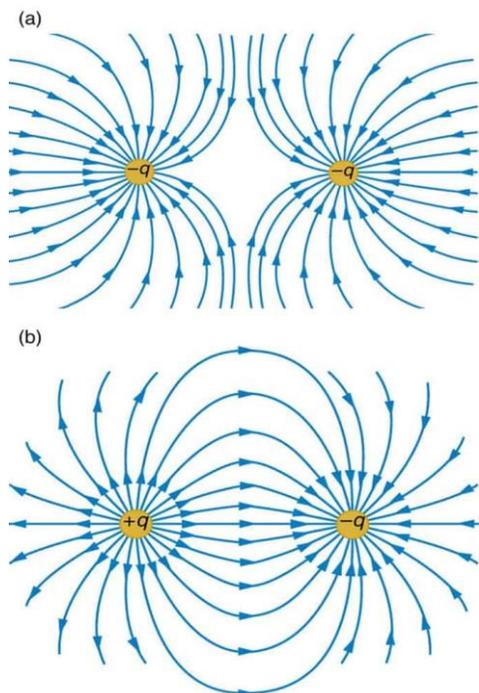


Рис. 11.

Структуры силовых линий полей диполей:

а) для одноимённых отрицательных зарядов.

б) для разноимённых зарядов.

$$E = k \cdot \frac{|q|}{R^2}$$

—модуль напряжённости поля точечного заряда, или заряженной сферы, или однородно заряженного шара на расстоянии R больше их радиуса

Если поле создаётся несколькими заряженными телами, то используют принципы **суперпозиции** и **независимости**.

Принцип независимости: взаимодействие заряженных тел не зависит от действия на эти тела других тел или полей

Принцип суперпозиции для напряжённости: напряжённость электрического поля нескольких зарядов равна векторной сумме напряжённостей каждого заряда.

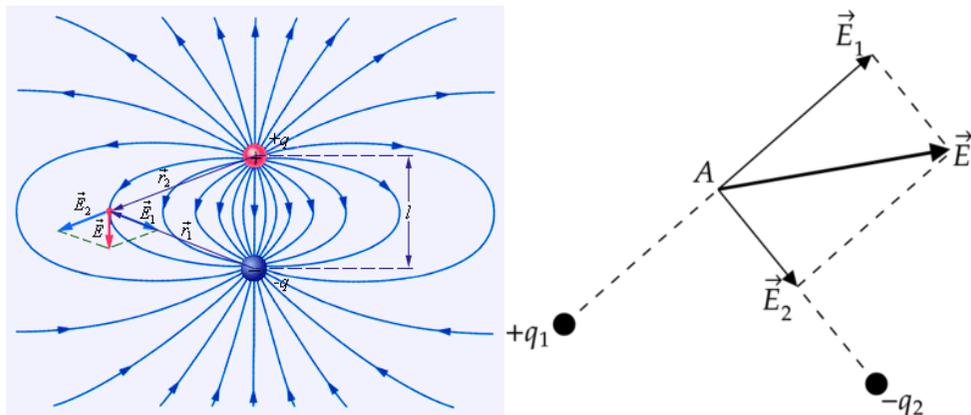


Рис.12. Принцип суперпозиции и его применение при построении силовых линий электростатического поля.

Задачи для самостоятельного решения на напряжённость поля точечных зарядов и заряженных сфер.

Задача 1.16. Два заряда, $q_1 = 16$ нКл и $q_2 = 1$ нКл находятся на расстоянии 50 см. На каком расстоянии от первого заряда будет находиться точка, где напряжённость их общего поля будет равна нулю. Показать на чертеже направление напряжённости каждого заряда в этой точке.

Задача 1.17. Два заряда, $q_1 = 16$ нКл и $q_2 = -1$ нКл находятся на расстоянии 60 см. На каком расстоянии от первого заряда будет находиться точка, где напряжённость их общего поля будет равна нулю. Показать на чертеже направление напряжённости каждого заряда в этой точке.

Задача 1.18. Расстояние между двумя точечными зарядами 64 нКл и -48 нКл равно 10 см. Определите напряжённость поля (в кВ/м) в точке, удаленной на 8 см от первого и на 6 см от второго зарядов. Показать на чертеже направление напряжённости каждого заряда в этой точке.

Задача 1.19. В вершинах острых углов ромба со стороной 1 м помещены положительные заряды по 1 нКл, а в вершине одного из тупых углов — положительный заряд 5 нКл. Определите напряжённость электрического поля в четвертой вершине ромба, если меньшая

диагональ ромба равна его стороне. Показать на чертеже направление напряжённости каждого заряда в этой вершине.

Задача 1.20. На двух проводящих концентрических сферах радиусами 10 и 50 см находятся одинаковые заряды по 0,02 мкКл. Определите напряженность электрического поля на расстоянии 30 см от общего центра сфер.

Задача 1.21. Заряды $q_A = -2q$, $q_B = 3q$ и $q_C = -3q$ расположены в вершинах А, В и С прямоугольника ABCD со сторонами $AB = 2a$, $BC = a$. Найдите напряжённость создаваемого ими поля в вершине D.

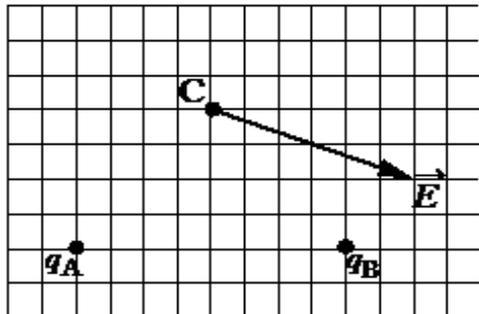


Рис.13

Задача 1.22. На рисунке 13 изображён вектор напряжённости \vec{E} электрического поля в точке С, которое создано двумя точечными зарядами: q_A и q_B . Каков заряд q_B , если заряд q_A равен +2 нКл?

Задача 1.23. На рисунке 13а изображен вектор напряженности \vec{E} электрического поля в точке С, которое создано двумя точечными зарядами q_A и q_B . Каков заряд q_B , если заряд q_A равен -2 мкКл?

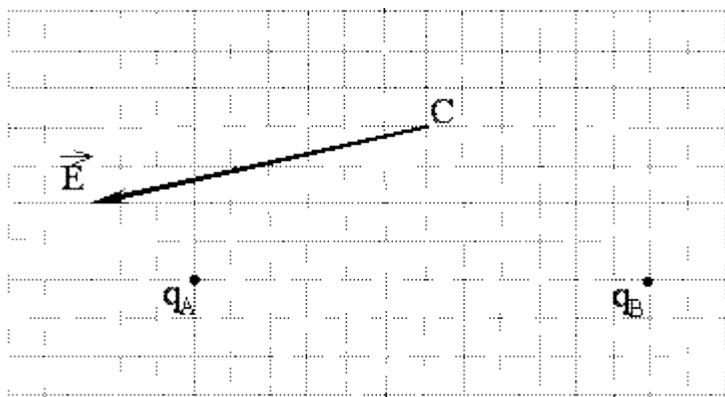


Рис.13а

Задача 1.24. На рисунке 13б изображен вектор напряженности \vec{E} электрического поля в точке С, которое создано двумя точечными зарядами q_A и q_B . Каков заряд q_B , если заряд q_A равен $+1$ мкКл?

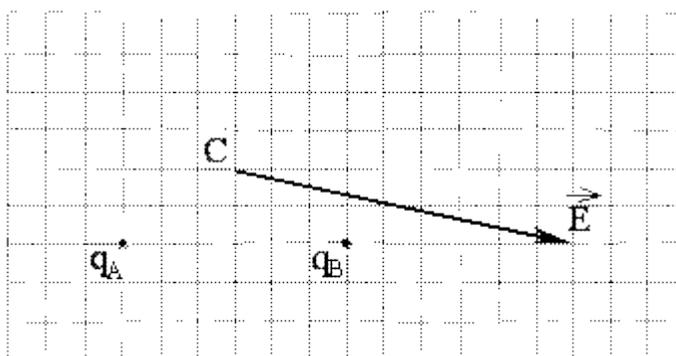


Рис.13б

Задача 1.25. На рисунке 13в изображен вектор напряженности \vec{E} электрического поля в точке С, которое

создано двумя точечными зарядами q_A и q_B . Каков примерно заряд q_B , если заряд q_A равен $+1$ мкКл?

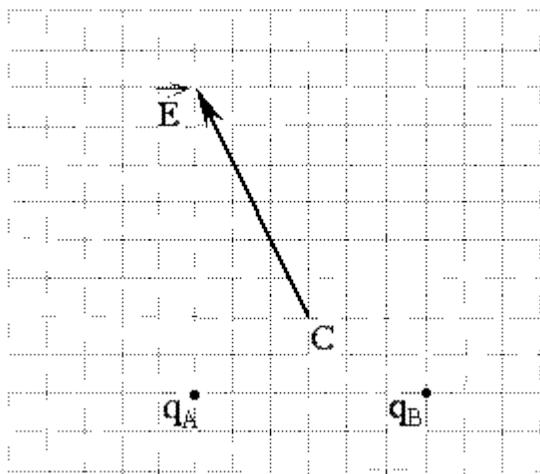


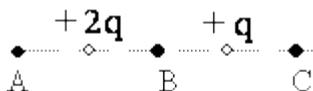
Рис.13.в

Задача 1.26. Два заряда $+4$ мкКл и -9 мкКл находятся на расстоянии $L=10$ см. Найти расстояние от положительного заряда до точки, лежащей на прямой, соединяющей заряды, где напряжённость поля равна нулю.

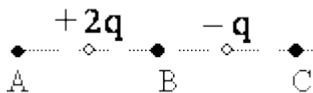
Задача 1.27. Два заряда $+10$ мкКл и $-0,4$ мкКл находятся на расстоянии $L=24$ см. Найти расстояние от положительного заряда до точки, лежащей на прямой, соединяющей заряды, где напряжённость поля равна нулю.

Задача 1.28. В двух противоположных вершинах A и C квадрата $ABCD$ со стороной b см находятся точечные заряды $q_A = -1,2$ нКл и $q_C = 1,6$ нКл. Найти модуль напряженности E_B электрического поля этих зарядов в вершине B .

Задача 1.29. На рисунке изображено расположение двух неподвижных точечных электрических зарядов $+2q$ и $+q$. В какой из трех точек – А, В или С – модуль вектора напряженности суммарного электрического поля этих зарядов имеет наибольшее значение?



Задача 1.30. На рисунке показано расположение двух неподвижных точечных электрических зарядов $+2q$ и $-q$. В какой из трех точек – А, В или С – модуль напряженности суммарного электрического поля этих зарядов минимален?



§2.2 Потенциал.

Энергия, связанная с взаимодействием тел системы или их частей, зависящая от их взаимного расположения, называется потенциальной. Каждому виду потенциальной энергии соответствует свой вид сил. Такие силы называются консервативными.

Энергия взаимодействия электрического поля с зарядом является потенциальной. Она зависит от взаимного расположения зарядов. Силы взаимодействия между электростатическими зарядами являются консервативными, то есть их работа не зависит от траектории, по которой движется заряд под действием сил, и определяется разностью потенциальных энергий в начале и конце пути.

Потенциалом электрического поля называют скалярную величину, равную отношению потенциальной энергии пробного заряда, взаимодействующего с полем, к величине этого заряда.

$$\varphi = \frac{W}{q}$$

φ —потенциал,
 W —потенциальная энергия,
 q —пробный заряд .

Потенциал —это **энергетическая** характеристика электрического поля в выбранной точке пространства.

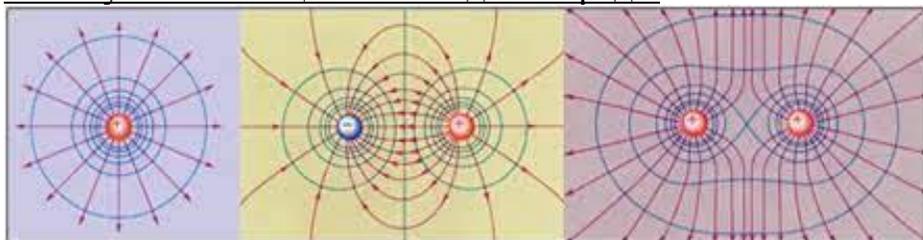
Для наглядности в пространстве строят эквипотенциальные поверхности.

Эквипотенциальная поверхность—это воображаемая поверхность равного потенциала, то есть во всех точках поверхности потенциал одинаковый.

Свойства эквипотенциальных поверхностей:

1. Чем меньше расстояние между поверхностями, тем больше напряжённость .
2. Всегда перпендикулярны силовым линиям.
3. Работа электрического поля по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности всегда равна нулю.
4. Не пересекаются. Одна и та же точка пространства не может иметь разные потенциалы.
5. Поверхность проводника всегда является эквипотенциальной поверхностью.

Принцип суперпозиции для потенциала: потенциал электрического поля нескольких зарядов равен алгебраической сумме потенциалов каждого заряда.



a)

b)

c)

Рис.14 Структуры эквипотенциальных поверхностей полей

a) положительного монополя

b) диполя из разноимённых зарядов

c) диполя из одноимённых положительных зарядов.

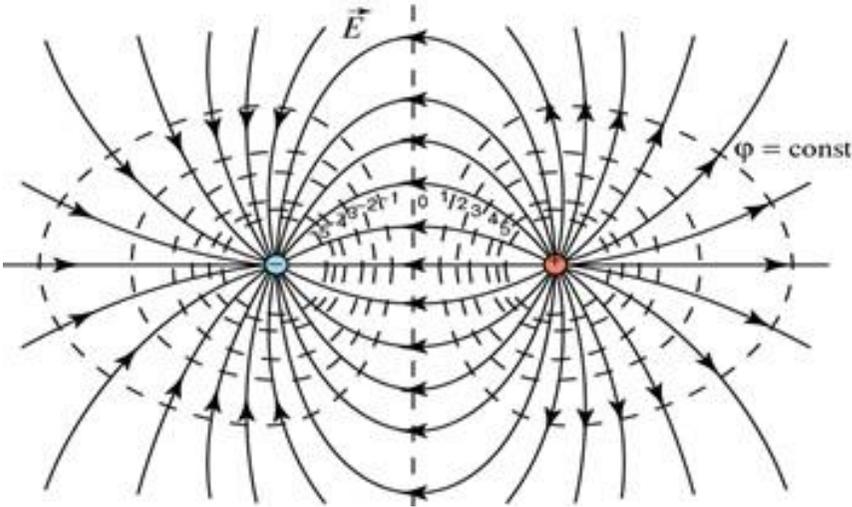


Рис. 15. Потенциал убывает по направлению от положительного заряда к отрицательному.

$\varphi = k \cdot \frac{q}{R}$ —потенциал поля точечного заряда, или заряженной сферы, или однородно заряженного шара на расстоянии R больше их радиуса

$W_{12} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{R}$ —потенциальная энергия двух точечных зарядов, или однородно заряженных сфер, или шаров.

Потенциальная энергия нескольких взаимодействующих зарядов находится как сумма:

$$W_{\text{общ}} = W_{12} + W_{23} + W_{13} + W_{14} + W_{24} + W_{34} \dots$$

Обратите внимание!!! Потенциал поля любого заряда равен нулю на бесконечном удалении от него. Потенциал земли, за исключением астрофизических задач, всегда равен нулю.

1 электронвольт (эВ) — внесистемная единица энергии, используемая в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц и в близких и родственных областях науки (биофизике, физической химии, астрофизике и т. п.).

Один электронвольт равен энергии, необходимой для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов в 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ Дж (точно)}$$

При решении задач берут приближительное значение: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Задачи для самостоятельного решения на потенциал поля точечных зарядов и заряженных сфер.

Задача 1.31. Положительный заряд перемещается в однородном электростатическом поле из точки 1 в точку 2 по разным траекториям (рис.16). На какой траектории работа сил электростатического поля максимальна?

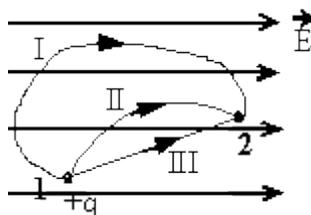


Рис.16.

Задача 1.32 В вершинах правильного треугольника со стороной 2 см находятся точечные заряды 4 нКл и - 2 нКл. Найти потенциал в третьей вершине

Задача 1.33. В однородном электрическом поле с напряженностью 1 кВ/м переместили заряд -25 нКл в направлении силовой линии на 2 см. Найти работу электрического поля.

Задача 1.34. Протон в электрическом поле ускорился с 100м/с до 100км/с. Какую разность потенциалов он прошел? Как изменилась его потенциальная энергия?

Задача 1.35. Электрон в электрическом поле ускорился с 100м/с до 10000км/с. Какую разность потенциалов он прошел? Найти потенциал конечной точки, если в точке старта потенциал равен 10В.

Задача 1.36. Электрон переместился в ускоряющем поле

из точки с потенциалом 200 В в точку с потенциалом 300 В. Найдите кинетическую энергию и скорость электрона, считая начальную скорость равной нулю.

Задача 1.37. Шарик массой m и зарядом $-q$ скатывается по наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом (рис. 17). На расстоянии L от места старта закреплён такой же шарик, так же заряженный. Найти заряд шариков, если минимальное расстояние между ними $L/3$.

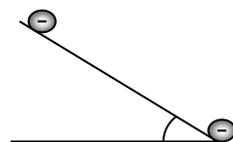


Рис.17.

Задача 1.38. Заряженный шарик массой m скатывается по наклонной плоскости, составляющей угол α с горизонтом (рис. 17). На расстоянии L от места старта закреплён шарик с зарядом равным по величине и противоположным по знаку. Найти заряд шарика, если на середине пути он имел скорость V .

Задача 1.39. Три шарика, заряды которых $q_1 = q_2 = q_3 = 2,0$ мкКл, закреплены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 2,0$ см., Найти максимальную кинетическую энергию E , каждого из них, если шарики одновременно освободить.

Задача 1.40. Четыре шарика, с одинаковыми массами m и зарядами Q , расположены в вершинах квадрата со

стороной а. Какие максимальные скорости приобретут шарики, если позволить им свободно двигаться.

Задача 1.41. Найти потенциальную энергию электростатического взаимодействия системы четырех электронов, расположенных в вакууме вдоль одной прямой на расстоянии $2a$ друг от друга.

Задача 1.42. На двух проводящих концентрических сферах радиусами 10 и 50 см находятся одинаковые заряды по $0,02$ мкКл. Определите потенциал электрического поля на расстоянии 30 см от общего центра сфер.

Задача 1.43. Заряды q_A , q_B , q_C , q_D находятся в вершинах квадрата ABCD со стороной L . Какую работу нужно совершить, чтобы поменять местами заряды:

- a) q_A и q_B
- b) q_A и q_C .
- c) q_B и q_D

Задача 1.44 Заряды q_A , q_B , q_C находятся в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника ABC с гипотенузой $AC=a$. Какую работу нужно совершить, чтобы поменять местами заряды:

- a) q_A и q_B
- b) q_A и q_C .

Задача 1.45. Два шарика с зарядами $2q$ и $3q$, массами $4m$ и $3m$ находятся на расстоянии L и скользят без трения на встречу друг другу со скоростями $2V$ и $3V$. Найти наименьшее расстояние между ними.

Задача 1.46. Два металлических шара, радиусом R_1 и R_2 , несущие заряды Q_1 и Q_2 , заставили соприкоснуться. Какие заряды будут у шаров?

Задача 1.47. Металлический шар, радиусом R_1 , несущий заряд Q , соединили проводом с проводящим незаряженным шаром, радиусом R_2 . Расстояние между центрами шаров L ($L \gg R_1$, $L \gg R_2$). Какой заряд пройдет по проводу?

Задача 1.48. Металлический шар, радиусом R_1 , заряженный до потенциала φ , соединили проводом с проводящим незаряженным шаром, радиусом R_2 . Расстояние между центрами шаров L ($L \gg R_1$, $L \gg R_2$). На сколько изменится потенциал?

Задача 1.49. На шарик радиусом 2 см помещен заряд 4×10^{-12} Кл. С какой скоростью к нему подлетает электрон, начавший движение из точки, бесконечно удаленной от шарика?

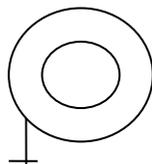


Рис. 18.

Задача 1.50. Металлический шар радиусом R_1 и зарядом Q_1 , окружают концентрической тонкой сферой радиусом R_2 и заземляют её (рис. 18). Найти заряд на внешней сфере.

Задача 1.51. Внутри толстостенной проводящей сферы с внешним радиусом R_3 и внутренним R_2 помещён шар радиусом R_1 (рис. 19). На шаре помещён заряд Q_1 . Найти заряд на внешней поверхности сферы.

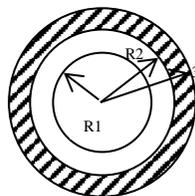


Рис.19.

Задача 1.52. Два шарика с зарядами $2q$ и $3q$, массами $4m$ и $3m$ находятся на расстоянии L и скользят без трения на встречу друг другу со скоростями $2V$ и $3V$. Найти наименьшее расстояние между ними.

§2.3. Однородное электростатическое поле

Однородное электростатическое поле — поле, напряжённость которого одинакова по величине и направлению во всех точках пространства.

Однородное электрическое поле возникает около бесконечной заряженной плоскости или между двумя разноимённо заряженными параллельными плоскостями (рис.20, 21, 22, 23). Заряженную плоскость можно считать бесконечной, если рассматривать поле в точках, удалённых от плоскости на расстояния значительно меньше её длины и ширины.

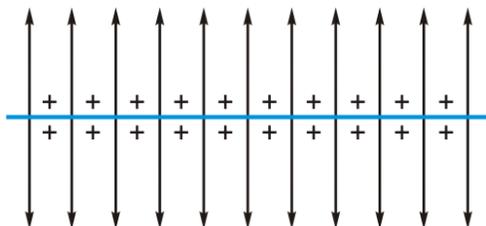


Рис 20. Схема силовых линий положительно заряженной бесконечной плоскости

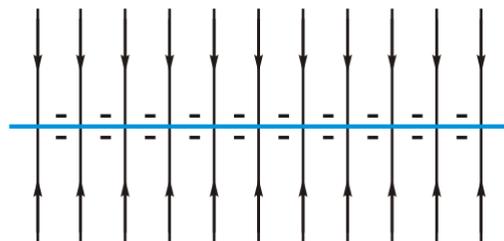


Рис 21. Схема силовых линий отрицательно заряженной бесконечной плоскости

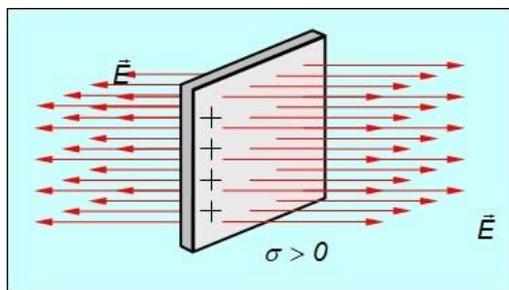


Рис 22. Трёхмерная картина силовых линий положительно заряженной бесконечной плоскости.

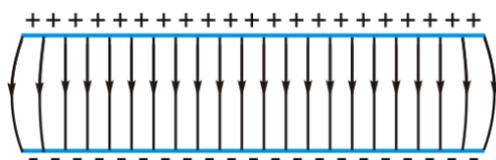


Рис 23. Схема силовых линий двух разноимённо заряженных бесконечных параллельных плоскостей.

Для однородно заряженной плоскости вводят понятие плотности заряда— это скалярная величина, равная отношению заряда плоскости к её площади

$$\sigma = \frac{q}{S} \text{—двумерная плотность заряда (Кл/м}^2\text{)}$$

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0} \text{—модуль напряжённости поля одно-}$$

родно заряженной плоскости (В/м)

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ —электрическая постоянная

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

—связь значений электрической по-

стоянной и коэффициента из закона Кулона.

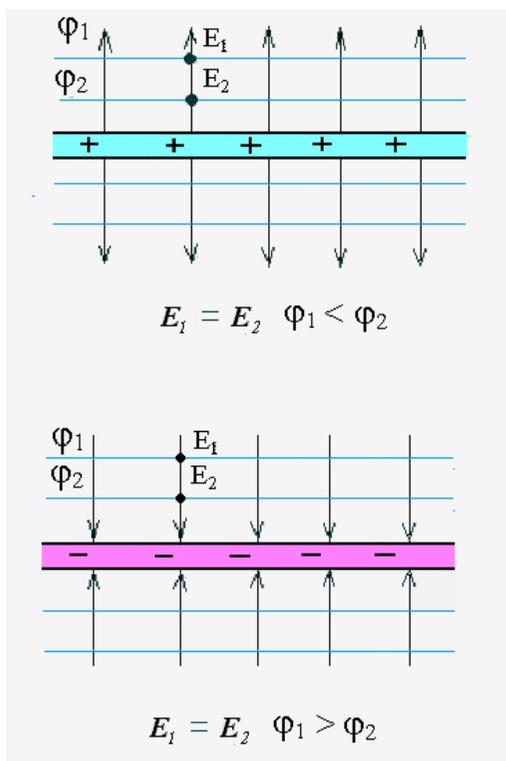


Рис.24.

Схемы силовых линий и эквипотенциальных поверхностей полей положительно и отрицательно заряженных бесконечных плоскостей.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля являются плоскостями, параллельными заряженной плоскости, находящимися на одинаковых расстояниях друг от друга (рис. 24).

Силовые линии направлены в сторону убывания потенциала. Потенциал на положительно заряженной

плоскости положителен и максимален, на отрицательно заряженной—отрицателен и минимален. В бесконечности потенциал считается равным нулю.

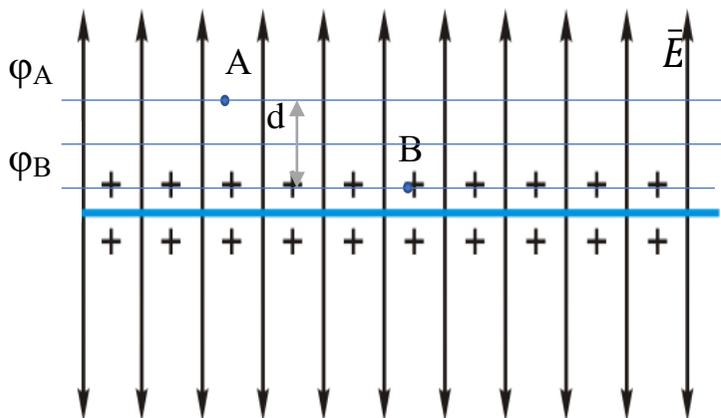


Рис.25.

Разность потенциалов однородного поля по модулю равна произведению модуля напряжённости на расстояние между соответствующими эквипотенциальными поверхностями (рис.25).

$$|\varphi_B - \varphi_A| = E \cdot d$$

Применение формул для зарядов разных форм.

	Любые электростатические поля	Поля точечных зарядов и поля за пределами однородно заряженных сфер и шаров.	Поле однородно заряженной плоскости.
Напряжённость	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$,	$E = k \cdot \frac{ q }{R^2}$	$E = \frac{q}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot S}$ $E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0}$
Потенциал	$\varphi = \frac{W}{q}$	$\varphi = k \cdot \frac{q}{R}$	$ \varphi_B - \varphi_A = E \cdot d$

Задачи для самостоятельного решения на однородное электростатическое поле.

Задача 1.53. В однородном электрическом поле, вектор напряженности которого направлен вертикально вверх, находится в равновесии пылинка массой 0,03 мкг с зарядом 3 пКл. Определите напряженность поля.

Задача 1.54. Маленький шарик, подвешенный на

шелковой нити, имеет заряд 50 нКл . В горизонтальном электрическом поле с напряженностью 100 кВ/м нить отклонилась от вертикали на угол, тангенс которого $0,125$. Найдите массу (в г) шарика.

Задача 1.55. Найдите ускорение, с которым падает шарик массой $0,01 \text{ кг}$ с зарядом 1 мкКл в однородном электрическом поле с напряженностью 20 кВ/м . Вектор напряженности направлен вертикально вверх. Трение не учитывать.

Задача 1.56. Протон, движущийся со скоростью 100 км/с , влетает в электрическое поле с напряженностью 50 В/м в направлении, противоположном направлению силовых линий поля. Через сколько микросекунд скорость протона станет равной нулю? Отношение заряда протона к его массе 10^8 Кл/кг .

Задача 1.57. Маленький шарик массой $0,01 \text{ мг}$, несущий заряд 10 нКл , помещен в однородное электрическое поле, направленное горизонтально. Шарик начинает двигаться и через 4 с приобретает скорость 50 м/с . Найдите напряженность электрического поля (в мВ/м).

Задача 1.58. Между двумя параллельными, вертикально расположенными диэлектрическими пластинами создано однородное электрическое поле

напряженностью $E = 2,5 \times 10^5$ В/м. Между пластинами помещен шарик на расстоянии $d = 0,5$ см от правой пластины и $b = 2,5$ см от левой. Заряд шарика $q = -20$ пКл, масса $m = 10$ мг. Шарик освобождают, и он начинает двигаться. На сколько успеет сместиться шарик по вертикали до удара об одну из пластин? Пластины имеют достаточно большой размер и находятся в поле силы тяжести Земли.

Задача 1.59. Три параллельных пластины, с зарядами Q , $-2Q$ и $3Q$, расположены параллельно друг другу. Расстояния между ними d_1 и d_2 значительно меньше их длины L и ширины b . Найти напряжённость поля в промежутках и разность потенциалов между пластинами.

Задача 1.60. Поле создается тремя параллельными бесконечными равномерно заряженными плоскостями с плотностью заряда σ , 2σ и -3σ соответственно. Найти напряженность между второй и третьей плоскостями.

Задача 1.61. Протон влетает в конденсатор под углом α_1 посередине между пластинами, заряд конденсатора Q длина пластин L , расстояние между ними d , площадь каждой пластины S . Найти кинетическую энергию протона перед влётом, если он вылетает параллельно пластинам. Массу и заряд протона считать известными.

Задача 1.62. Положительно заряженная $+q$ пылинка, массой m , влетает со скоростью V_0 в однородное электростатическое поле с напряжённостью E перпендикулярно линиям поля. Найти время, за которое её скорость увеличится в 5 раз.

Задача 1.63. Маленький шарик массой m с зарядом $q=10\text{нКл}$, подвешенный к потолку невесомой нерастяжимой шёлковой нитью длиной $l=120\text{см}$, находится в однородном горизонтальном электростатическом поле \vec{E} , где $E=6\cdot 10^5\text{ В/м}$ (рис. 26). Шарик удерживают в положении, когда нить вертикальна, а потом отпускают без начальной скорости. Найти массу шарика, если известно, что он имел скорость $0,3\text{ м/с}$ в момент, когда нить составляла угол $\alpha=30^\circ$ с вертикалью.

Задача 1.64. Шарик массой m и зарядом Q прикреплен на нити на горизонтальной заряженной стенке. На шарик действует горизонтальная сила F . Угол между стенкой и шариком α . Найти поверхностную плотность заряда на стене.

Задача 1.65. Маленький шарик массой m с зарядом $q=10\text{нКл}$, подвешенный к потолку невесомой нерастяжимой шёлковой нитью длиной $l=90\text{см}$, находится в однородном горизонтальном электростатическом поле \vec{E} , где $E=6\cdot 10^5\text{ В/м}$ (Рис. 26). Шарик удерживают в положении, когда нить вертикальна, а потом отпускают без начальной скорости. Найти массу шарика, если максимальный угол, который нить составляла с вертикалью $\alpha=60^\circ$

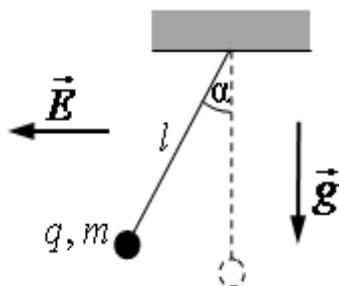


Рис.26

Задача 1.66. Положительно заряженный шар массой m и зарядом q подвешен на тонкой нерастяжимой нити длиной L в однородном электрическом поле с напряженностью E , направленной вниз. Шар совершает круговые движения в горизонтальной плоскости, при этом нить составляет угол α с вертикалью. Нарисуйте все силы, действующие на шар, и найдите частоту его обращения.

Задача 1.67. Заряженный шар с зарядом $+q$ и массой m вращается на нити в вертикальной плоскости в однородном поле с модулем E , направленном вертикально вверх. Верхнюю точку шар проходит с минимально

возможной скоростью. В нижней точке траектории шар имеет скорость v_0 . Найти длину нити.

Задача 1.68. Пылинка, имеющая

массу $m=10^{-10}$ кг и заряд

$q=5 \cdot 10^{-9}$ Кл, влетает в элек-

трическое поле конденсатора

параллельно его пластинам в

точке, находящейся посередине

между пластинами (см. рисунок

27). Минимальная скорость, с которой пылинка

должна влететь в конденсатор, чтобы затем вылететь

из него, $v=250$ м/с. Расстояние между пластинами

конденсатора $d=1$ см; напряжённость электрического

поля конденсатора $E=5000$ В/м. Чему равна длина l

пластин конденсатора? Поле внутри конденсатора

считать однородным, силой тяжести пренебречь.

Считать, что конденсатор находится в вакууме.

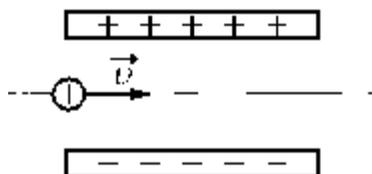


Рис.27

§3. Элементарные сведения о строении атомов.

Атом—наименьшая часть химического элемента, сохраняющая его свойства

Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженной электронной оболочки.

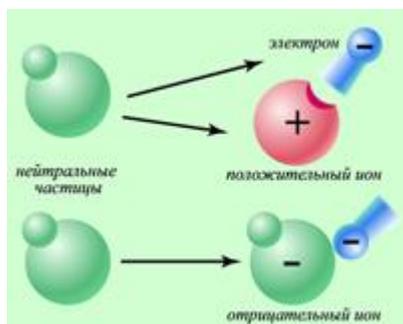
Электронная оболочка атома состоит из электронов, быстро движущихся вокруг ядра.

Ядро состоит из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов.

Атом электрически нейтрален, поэтому число протонов в ядре равно числу электронов в оболочке. Это число называют зарядовым числом, и определяет **номер** химического элемента в таблице Менделеева.

Суммарное количество протонов и нейтронов равно массовому числу или массе атома в атомных единицах массы. Масса атома примерно равна массе его ядра, ввиду того , что масса электронов очень мала.

Атомы, которые имеют ядра с одинаковым количеством протонов, но разным количеством нейтронов, называются изотопами. Существуют устойчивые изотопы и неустойчивые (радиоактивные) изотопы. Ядра неустойчивых изотопов спонтанно распадаются.



Атом может терять один или несколько электронов из электронной оболочки. В этом случае его электрическая нейтральность нарушается, он имеет положительный заряд и называется положительным ионом. В случае присоединения

лишнего электрона к атому он приобретает отрицательный заряд и называется отрицательным ионом.

Квантование (делимость) электрического заряда – это значит, что любой электрический заряд может измениться на величину кратную элементарному заряду.

Элементарный заряд – это заряд электрона или протона. Наименьший неделимый электрический заряд.

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — величина элементарного заряда.

В микромире энергию измеряют в электрон-вольтах:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

1 электрон-вольт (1 эВ) это величина, на которую увеличится энергия электрона, если он пройдёт ускоряющую разность потенциалов 1 вольт.

§3.1. Модели атома.

Атом невозможно увидеть, так как он меньше длины световой волны видимого спектра. Первую попытку создать модель сделал Томсон. Но после эксперимента, проведённого Резерфордом от неё отказались.

Модель атома Томсона—модель кекс: атом состоит из положительного заряда (тесто) и как изюмины включены электроны.

Опыт Резерфорда состоит в том, что поток альфа-частиц проходит через золотую фольгу и попадает на экран, светящийся под ударами частиц. Причём поток почти не рассеивается, но некоторые частицы отклонялись под большим углом. Альфа-частицы—положительные маленькие, тяжёлые частицы, спонтанно вылетающие из радиоактивного вещества. (2 нейтрона+ 2 протона). пролетая сквозь атом-кекс, они не могли отскакивать и резко менять траекторию. Этим было доказано, что модель Томсона неверна.

Эксперимент назвали методом сцилляций (вспышек)

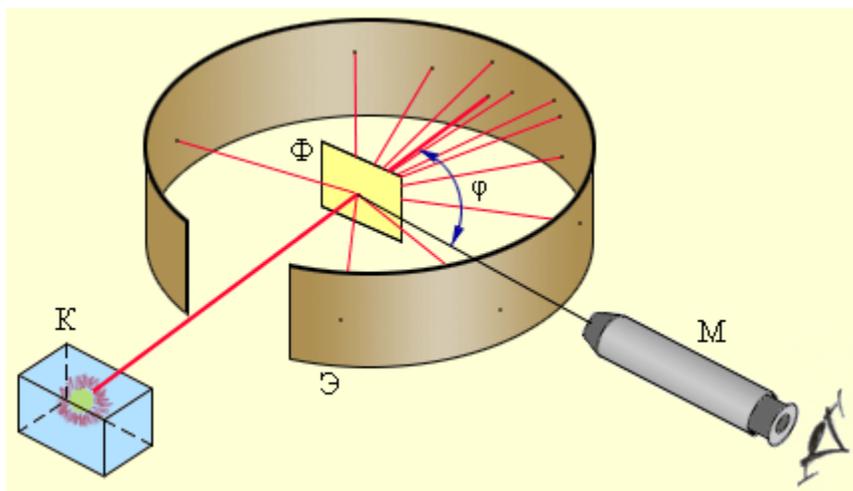


Рис 28. Схема опыта Резерфорда:

К —контейнер с радиоактивным веществом, испускающим альфа-частицы;

Ф —золотая фольга толщиной в несколько микрон;

Э —экран, вспыхивающий в месте удара альфа-частицы;

М —микроскоп для наблюдения вспышек на экране.

После эксперимента Резерфорд предложил новую модель, названную **планетарной**: в центре атома находится положительное тяжелое маленькое ядро, вокруг которого вращаются , как планеты вокруг солнца электроны.

На основе модели атома Резерфорда можно объяснить электризацию тел: при контакте часть электронов переходит в одного тела на другое , то, с которого ушла

часть электронов становится положительно заряженным, а второе — отрицательно заряженным

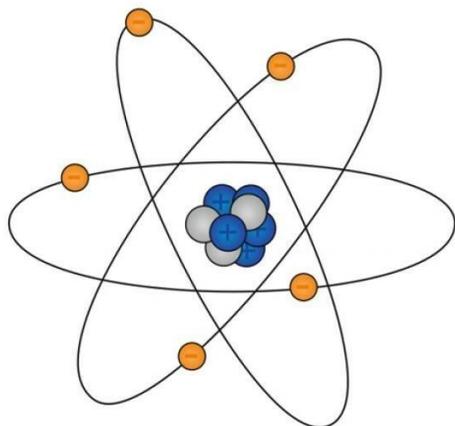


Рис.29. Планетарная модель атома.

§3.2. Квантование заряда. Опыт Иоффе и Милликена.

Опыты Милликена и Иоффе показали, что заряды капель и пылинок всегда изменяются скачкообразно. Минимальная «порция» электрического заряда — элементарный электрический заряд, равный $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Однако заряд пылинки уходит не сам по себе, а вместе с электроном.

На рисунке 30 изображена схема установки, использованной в опыте А. Ф. Иоффе. В закрытом сосуде, воздух из которого откачан до высокого вакуума, находились две металлические пластины Π , расположенные горизонтально. Из камеры A через отверстие O в пространство между пластинами попадали мелкие заряженные пылинки цинка. Эти пылинки наблюдали в микроскоп.

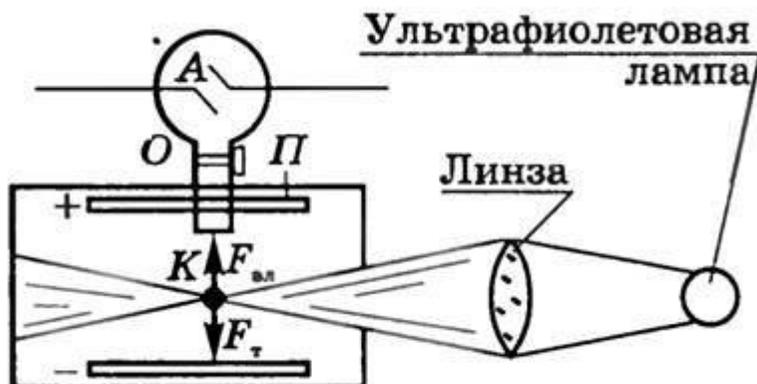


Рис.30

Предположим, что пылинка заряжена отрицательно. Под действием силы тяжести она начинает падать вниз. Но ее падение можно задержать, если нижнюю пластину зарядить отрицательным зарядом, а верхнюю — положительным. В электростатическом поле между пластинами на пылинку станет действовать сила $\vec{F}_{эл}$, которая пропорциональна заряду пылинки. Если $mg = F_{эл}$, то пылинка будет находиться в равновесии сколь угодно долго. Затем отрицательный заряд пылинки уменьшали, действуя на нее ультрафиолетовым светом. Пылинка начала падать, так как сила $\vec{F}_{эл}$, действовавшая на нее, уменьшалась. Сообщая пластинам дополнительный заряд и этим усиливая электрическое поле между пластинами, пылинку снова останавливали. Так поступали несколько раз.

Опыты показали, что заряд пылинки изменялся всегда скачкообразно, кратно заряду электрона. Из этого опыта А. Ф. Иоффе сделал следующий вывод: заряд пылинки всегда выражается целыми кратными значениями элементарного заряда e . Меньших "порций" электрического заряда, способных переходить от одного тела к другому, в природе нет. Но заряд пылинки уходит вместе с частицей вещества. Следовательно, в природе существует такая частица вещества, которая имеет самый маленький заряд, далее уже неделимый. Эту частицу назвали **электроном**.

Значение заряда электрона впервые определил американский физик Р. Милликен. В своих опытах он пользовался мелкими капельками масла, наблюдая за их движением в электростатическом поле между двумя металлическими пластинками. (рис. 31). Капля масла, не имеющая электрического заряда, из-за сопротивления воздуха \vec{F}_C и силы Архимеда \vec{F}_A падает с некоторой постоянной скоростью, так как $\vec{m}\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C = 0$.

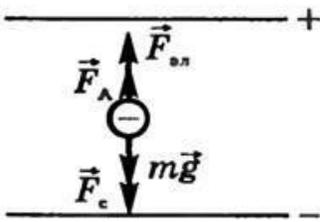


Рис. 31

Если на своем пути капля встречается с ионом воздуха или её облучают рентгеновскими лучами, она приобретает электрический заряд q и на нее, кроме силы тяжести $\vec{m}\vec{g}$,

\vec{F}_C и \vec{F}_A , действует со стороны электростатического поля сила $\vec{F}_{Эл}$. Тогда при установившемся движении:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_C + \vec{F}_{Эл} = 0.$$

Изменение заряда, меняет $\vec{F}_{Эл}$ меняет скорость движения капли.

Сила сопротивления зависит от скорости, с ростом скорости растёт и \vec{F}_C . Измеряя изменения скорость капли, Милликен смог определить ее заряд. Статистически обработав результаты, он получил минимальную фиксированную величину, на которую менялся заряд—заряд электрона.

Обратите внимание!!! В установке Милликена воздух не откачивали. Он использовался для создания силы сопротивления и силы Архимеда.

Задачи для самостоятельного решения на строение атома.

(для решения некоторых задач воспользуйтесь таблицей Менделеева)

Задача 1.69. Во сколько раз масса атома углерода больше массы атома водорода (массой электронов пренебречь)?

Задача 1.70. Сколько нейтронов и протонов содержится в альфа-частице – ядре атома гелия?

Задача 1.71. В ядре атома фтора находится 10 нейтронов. В электронной оболочке атома находится 9 электронов. Сколько протонов находится в ядре фтора?

Задача 1.72. У какой элементарной частицы заряд равен $+4 \cdot 10^{-20}$ Кл ?

Задача 1.73. Определите скорость электрона в атоме водорода, если атом находится в основном состоянии. Радиус орбиты электрона в основном состоянии $0,5 \cdot 10^{-10}$ м.

Задача 1.74 Скольким кулонам равен заряд миллиарда электронов?

2	II	Li литий 7 ₃ 6 ₃	3	Be бериллий 9 ₄	4	B бор 11 ₅ 10 ₅	5
3	III	Na натрий 23 ₁₁	11	Mg магний 24 ₁₂ 26 ₁₂ 25 ₁₂	12	Al алюминий 27 ₁₃	13
4	IV	K калий 39 ₁₉ 41 ₁₉	19	Ca кальций 40 ₂₀ 44 ₂₀	20	Sc скандий 45 ₂₁	21
	V	Cu медь 63 ₂₉ 65 ₂₉	29	Zn цинк 64 ₃₀ 66 ₃₀ 68 ₃₀	30	Ga галлий 69 ₃₁ 71 ₃₁	31

Рис.32.

Задача 1.75. На рисунке 32 представлен фрагмент Периодической системы элементов Д.И.Менделеева. Под названием каждого элемента приведены

массовые числа его основных стабильных изотопов. При этом нижний индекс около массового числа указывает (в процентах) распространённость изотопа в природе. Укажите число нейтронов в ядре самого распространённого стабильного изотопа калия.

Задача 1.76. В атоме дейтерия электрон движется вокруг ядра с угловой скоростью $\omega = 10^{16} \text{ с}^{-1}$. Найдите радиус орбиты.

§4. Проводники и диэлектрики.

§4.1. Проводники. Электростатическая индукция.

Проводниками называются вещества, которые имеют в своей структуре свободные электрические заряды, т.е. заряды, которые могут перемещаться внутри вещества. Проводниками являются металлы, водные растворы солей, щелочей, кислот и ионизированные газы.

В металлических проводниках носителями свободных электрических зарядов являются валентные электроны (электроны проводимости).

У проводящего заряженного шара весь заряд собирается на поверхности, образуя слой не толще диаметра атома. Внутри шара напряжённость равна нулю, следовательно потенциал, убывающий в направлении вектора напряжённости, одинаков во всех точках шара. Точно также будет выглядеть распределение заряда, графики напряжённости и потенциала поля полой заряженной проводящей сферы

Если поместить металлический проводник в электростатическое поле, электроны проводимости перераспределятся так, что суммарное электрическое поле внутри проводника станет равным нулю.

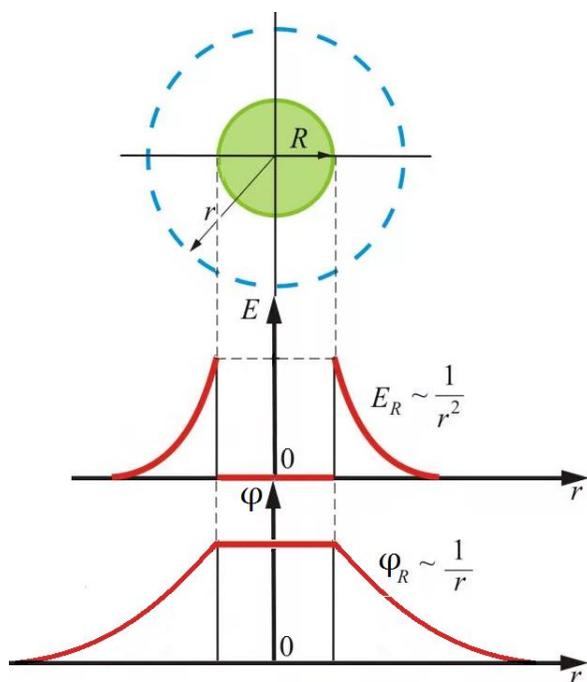


Рис . 33.

Графики модуля напряжённости и потенциала поля заряженного проводящего шара или заряженной проводящей сферы.

Обратите внимание!!! Внутри проводника напряжённость всегда равна нулю и потенциал одинаковый во всех точках тела только в электростатическом поле, когда положение всех зарядов не меняется и когда внутри проводника нет обособленных изолированных зарядов.

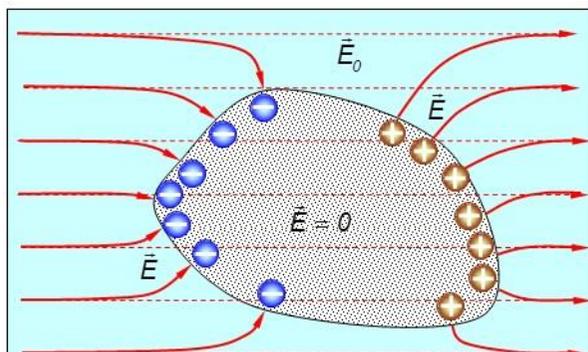


Рис.34.
Проводник в
электростатическом
поле.

Явление электростатической индукции – перераспределение зарядов на поверхности проводника под действием внешнего электростатического поля.

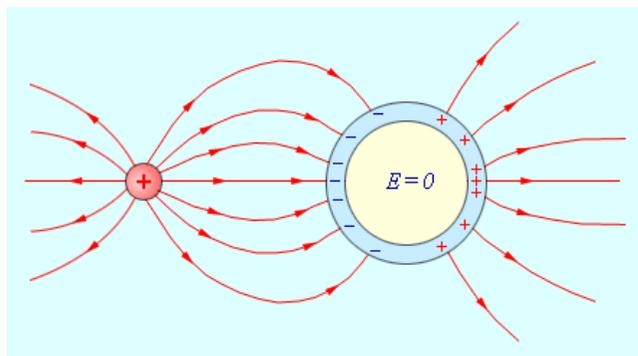


Рис.35.
Проводящий полый шар в поле точечного положительного заряда

Необходимо отличать перераспределение зарядов при контакте двух проводников, когда часть заряда переходит с одного проводника на другой, и электризацию влиянием (при электростатической индукции)

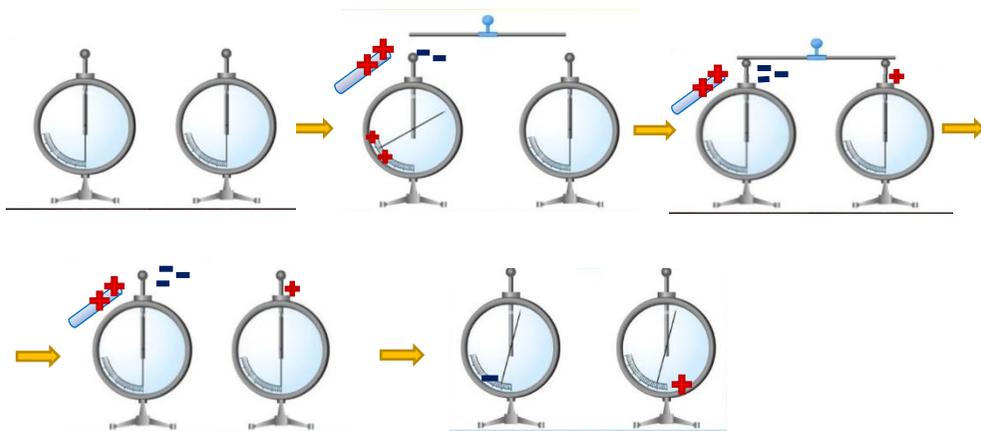


Рис.36. Электризация влиянием

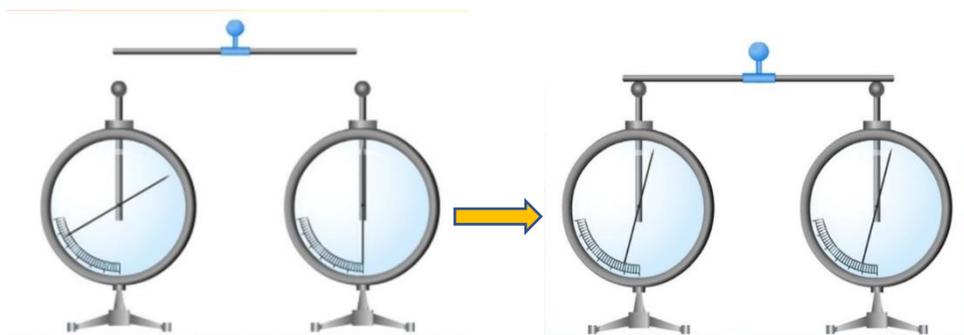


Рис.37. Перераспределение заряда одного знака.

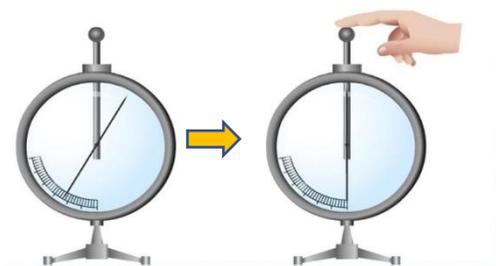


Рис.38. Заземление (заряд электроскопа перераспределяется между ним и всей планетой Земля).

При контакте двух проводников заряды между ними распределяются так, что потенциалы на поверхности и внутри обоих проводников становятся одинаковыми и суммарный заряд сохраняется.

При заземлении потенциал проводника становится равен потенциалу Земли, который всегда считается равным нулю.

§4.2. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков.

Диэлектриками называются вещества, в которых отсутствуют свободные электрические заряды. Диэлектриками являются: дерево, фарфор, каучук, стекло.

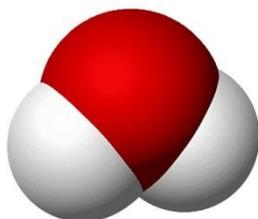
Если поместить диэлектрик в электростатическое поле, то внутри диэлектрика поле будет существовать, однако будет ослабленным. Внутри диэлектрика напряжённость и потенциал уменьшаются по величине.

Диэлектрическая проницаемость — скалярная безразмерная физическая величина равная отношению модулю

напряжённости поля в вакууме к модулю напряжённости

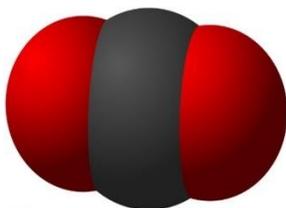
в веществе:
$$\varepsilon = \frac{E_{\text{в вакууме}}}{E_{\text{в веществе}}}$$

Диэлектрики делятся на полярные и неполярные. Это зависит от особенностей атомов или молекул, из которых они состоят.



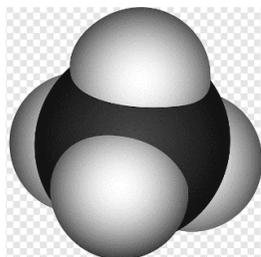
Полярная молекула

Вода H_2O



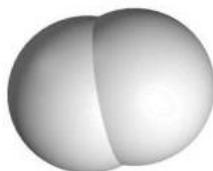
Неполярная молекула

Диоксид углерода CO_2

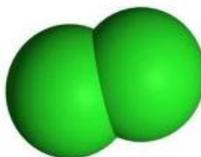


Метан CH_4

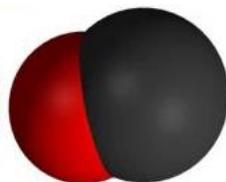
Неполярные молекулы



Водород H_2



Хлор Cl_2



Оксид углерода CO

Полярная молекула

Рис.39.. Примеры полярных и неполярных молекул

У неполярных молекул и атомов центры положительного и отрицательного зарядов совпадают. Диэлектрики, состоящие из таких частиц, принято называть неполярными диэлектриками (рис.39). Молекулы метана CH_4 ,

триоксида серы SO_3 , диоксида углерода CO_2 , фторида серы(VI) SF_6 , (кислорода O_2 , водорода H_2 , азота N_2 , фтора F_2 , гелия He , неона Ne) являются неполярными.

Полярные молекулы — несимметричные молекулы, у которых не совпадают центры положительного и отрицательного зарядов. Такие молекулы имеют положительный и отрицательные полюса и являются **диполями**. Диэлектрики, состоящие из таких молекул, принято называть полярными диэлектриками (рис. 39).

Поляризация диэлектриков — явление, связанное с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей, под воздействием внешнего электрического поля.

Молекулы **полярных** диэлектриков в отсутствие внешнего поля ориентированы и движутся хаотично. При включении поля они поворачиваются вдоль направлений силовых линий. Тепловое движение не позволяет точно выдерживать направление, но общая тенденция сохраняется (рис.40).

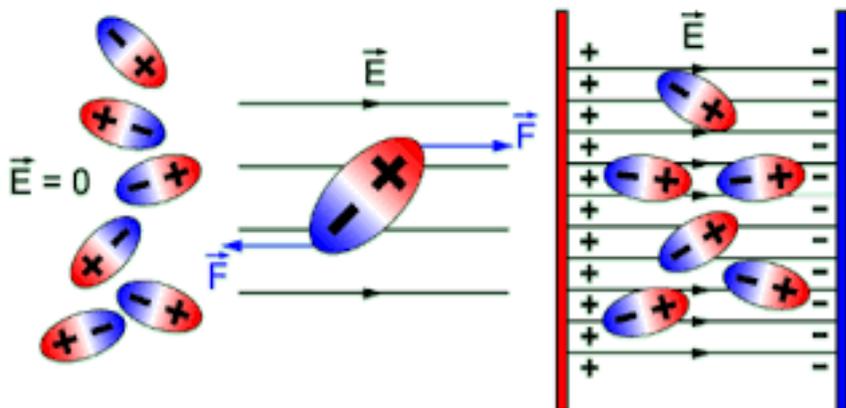


Рис. 40.

Поляризация полярного диэлектрика

У неполярных молекул и атомов при включении внешнего поля центры положительного и отрицательного зарядов смещаются в противоположные стороны: Электроны смещаются против поля, а ядра смещаются по полю. У частиц появляются положительные и отрицательные полюса (рис.42).

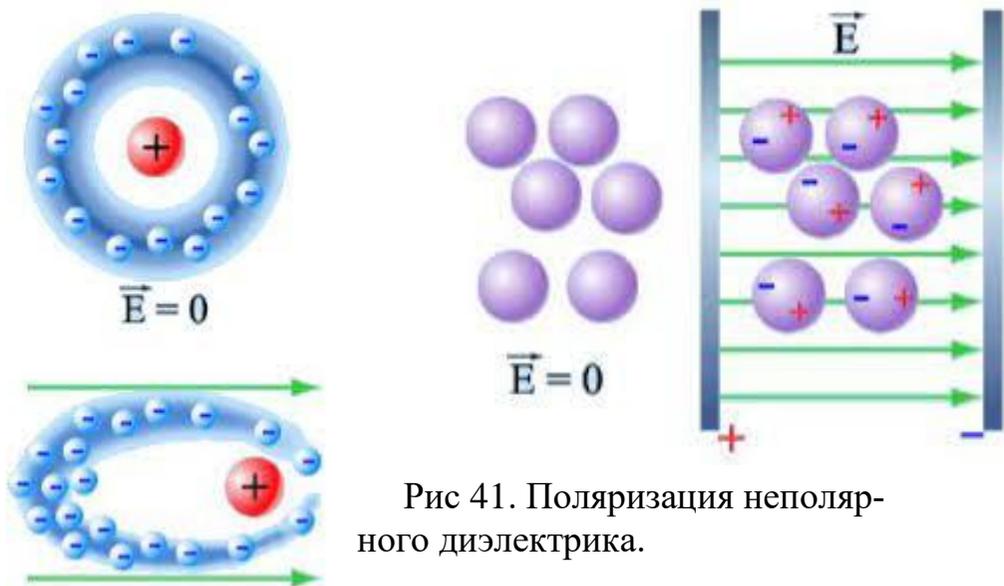


Рис 41. Поляризация неполярного диэлектрика.

Рис. 42. Деформация электронных орбит под действием внешнего поля

В результате поворота диполей или деформации электронных оболочек на поверхности диэлектрика возникают **связанные поверхностные заряды**. На грани диэлектрика, в которую входят силовые линии будет избыток **отрицательных** зарядов, так как на ней располагаются отрицательные полюса молекул и атомов (рис.43). Парные им положительные полюса находятся в глубине диэлектрика и нейтрализуются отрицательными полюсами соседних частиц. Аналогично на грани, из которой выходят силовые линии, возникает избыток **положительных** зарядов, то есть возникает **связанный положительный поверхностный заряд**.

Заряды называют **связанными**, потому что они не могут свободно перемещаться и связаны со своими частицами.

Связанные поверхностные заряды создают электрическое поле, направленное против внешнего поля, вызвавшего поляризацию, и частично компенсирующее его. Поэтому поле внутри диэлектрика меньше по величине внешнего поля.

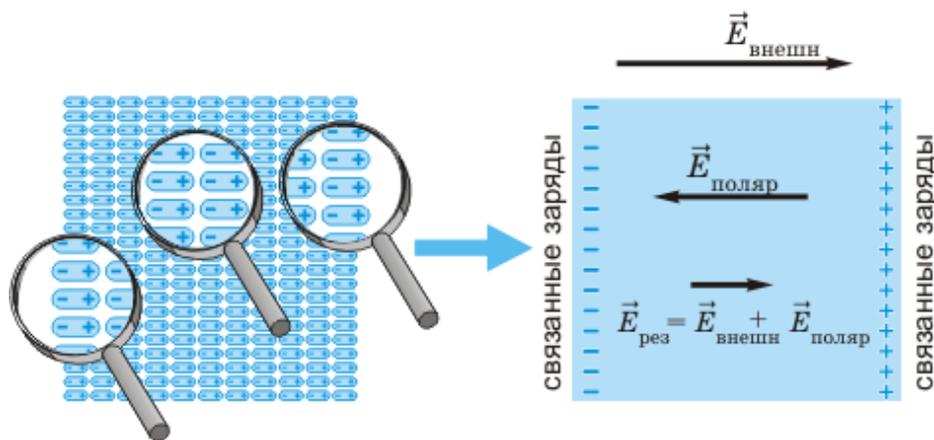


Рис 43. Связанные поверхностные заряды создают поле, частично компенсирующее внешнее поле.

Задачи для самостоятельного решения диэлектрическую проницаемость вещества.

Задача 1.77. На сколько изменится заряд шарика, опущенного в жидкое стекло, если на воздухе он составлял 49нКл ?

Задача 1.78. Как изменится напряжённость поля шарика на расстоянии 5см от его поверхности, если шарик покрыть парафином толщиной 3мм ?

Задача 1.79. Маленький полый заряженный шарик плавает в дистиллированной воде, погруженный на $2/3$. На какой глубине напряжённость его поля будет такой же, как на высоте 90см над уровнем воды.

Задача 1.80. Два одинаковых заряженных шарика висят на длинных изолирующих нитях, прикрепленных к потолку в одной точке. Если шарики опустить в керосин, расстояние между ними не изменится. Найти плотность шариков.

Задача 1.81. В высокой мензурке диаметром 5,6см налито 500мл масла. На поверхности плавает шар, погруженный в масло на $3/4$, и несущий заряд $+100$ нКл. Если на дно мензурки погрузить стальной шар такого же объёма с зарядом -200 нКл, то верхний шар будет плавать, погрузившись на $7/8$. Найти объём шара. Изменения уровня масла из-за погружения шаров не учитывать.

Задача 1.82. Два одинаковых воздушных конденсатора ёмкостью 5 мкФ заряжены до напряжения 100 В и соединены параллельно. Какой заряд пройдёт по проводу, если один из конденсаторов залить жидким парафином?

§.5 Метод изображений в электростатике.

Суть метода: распределение зарядов вдоль выбранной поверхности можно заменить набором точечных зарядов в области, ограниченной этой поверхностью. Поле внутри области не рассматривают. За пределами области точечные заряды создают такое же поле, как и распределённый заряд, если сохраняется распределение потенциалов, величина и направление векторов напряжённости вдоль выбранной границы.

Метод изображений для проводников: любую эквипотенциальную поверхность можно заменить такой же из проводника. Поле за пределами области, ограниченной этой поверхностью не изменится.

§5.1. Поле точечного заряда около проводящей плоскости.

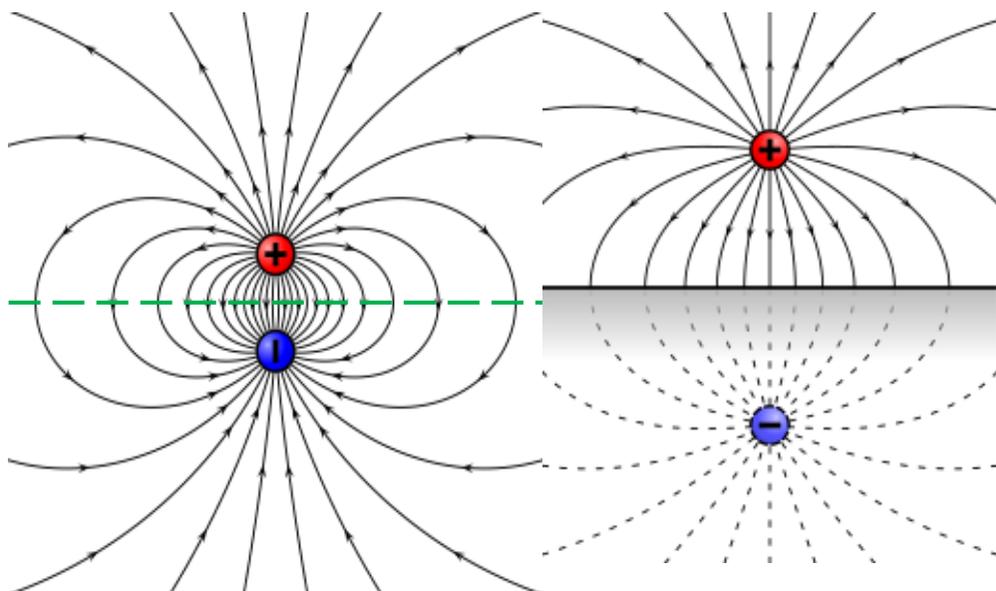


Рис.44. Поле диполя и поле точечного проводника около заземлённой плоскости.

Рассмотрим поле диполя. Оно симметрично относительно плоскости, являющейся эквипотенциальной. Если её заменить проводящей плоскостью (металлическим листом), то поле не изменится. Точечный заряд притягивается к металлической плоскости так же, как он притягивался бы к отрицательному заряду, расположенному симметрично относительно плоскости.

Чтобы решить задачу о силе притяжения точечного источника к незаряженной проводящей бесконечной плоскости, достаточно ввести **фиктивный**

отрицательный точечный заряд, симметричный реальному, и рассчитать притяжение к нему.

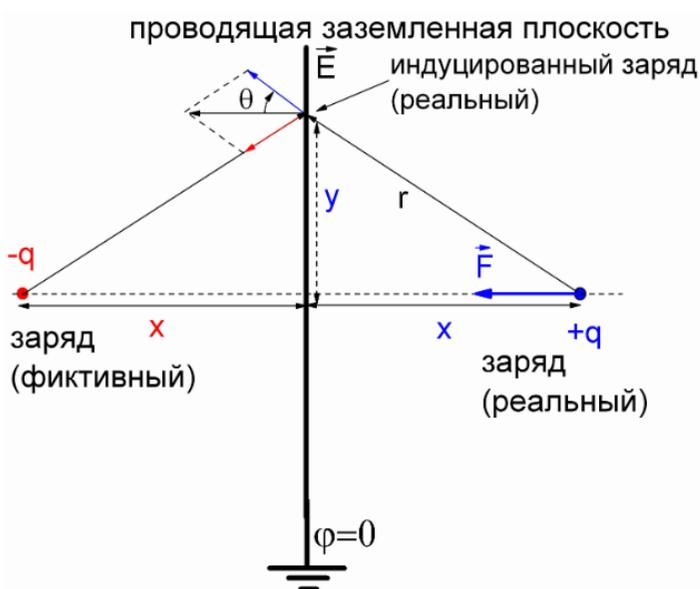


Рис.45.

В реальности точечный положительный заряд индуцирует на плоскости отрицательные распределённые заряды. Это и вызывает притяжение. Бесконечной проводящей плоскостью можно считать любой плоский проводящий заземлённый предмет, имеющий размеры значительно больше расстояния между зарядом и плоскостью.

Аналогично точечный заряд в прямом угле можно рассматривать как взаимодействие заряда с его фиктивными «изображениями» (Рис.46).

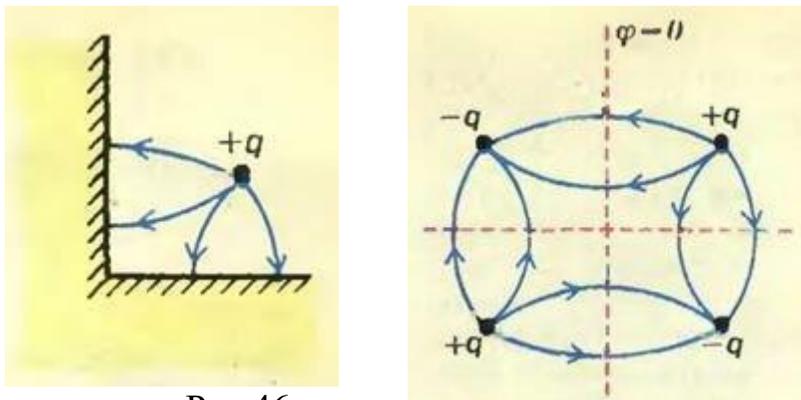
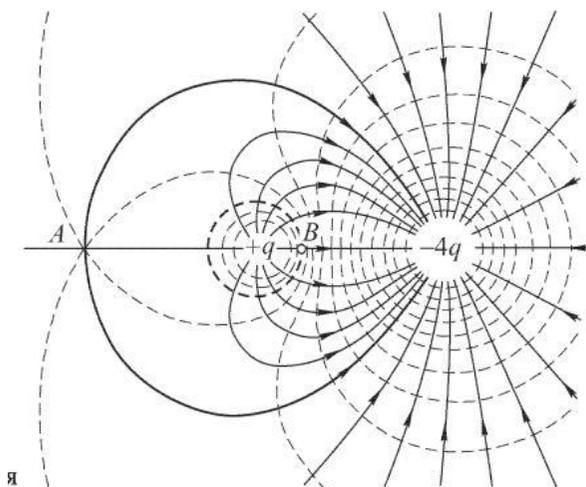


Рис.46.

Этот метод эквивалентен построению мнимых источников в плоских зеркалах.

§.5.2. Поверхность нулевого потенциала для двух разноимённых зарядов.

Поле двух точечных разноимённых зарядов, разных по величине имеет сферическую эквипотенциальную поверхность с потенциалом $\varphi=0$.



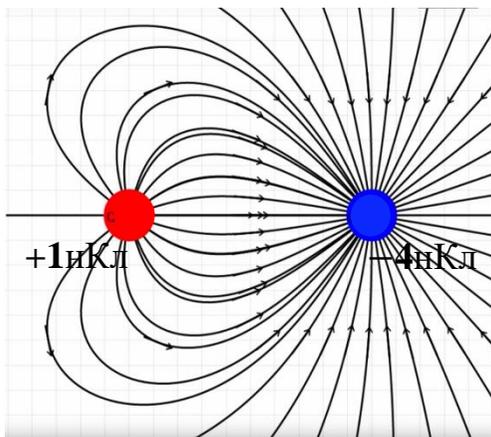
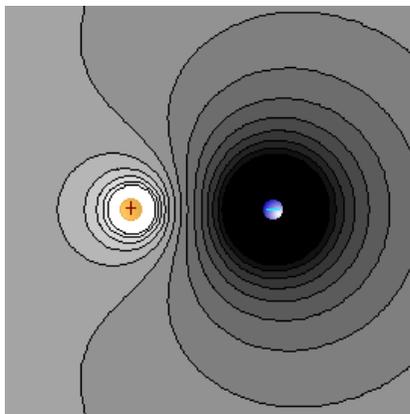


Рис.47. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии поля разноимённых зарядов отличных по модулю.

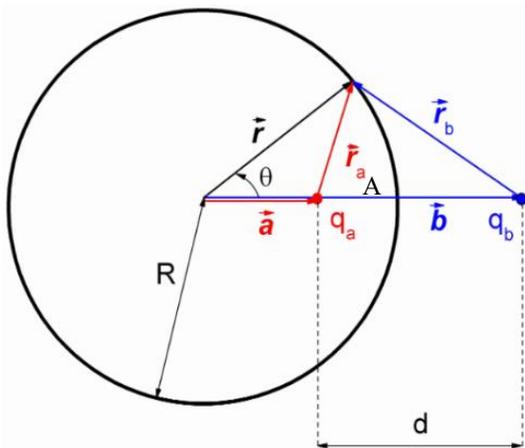


Рис.48.

Обозначения:
 $q_a = +q$ — малый положительный заряд,
 $q_b = -pq$ — большой отрицательный заряд,
 A — произвольная точка на эквипотен-

циальной сфере с потенциалом $\varphi = 0$,

$|\vec{r}| = R$ — радиус эквипотенциальной сферы

$|\vec{b}| = b$ — расстояние от центра сферы до отрицательного заряда,

$|\vec{a}|=a$ —смещение положительного заряда относительно центра сферы,

d —расстояние между зарядами.

$$\vec{r}_a = \vec{r} - \vec{a}$$

$$\vec{r}_b = \vec{r} - \vec{b}$$

$$r_a^2 = (\vec{r} - \vec{a})^2 = R^2 + a^2 - 2Ra \cdot \cos\theta$$

$$r_b^2 = (\vec{r} - \vec{b})^2 = R^2 + b^2 - 2Rb \cdot \cos\theta$$

$$\Phi_a + \Phi_b = \frac{kq}{r_a} + \frac{-knq}{r_b} = 0 \text{—условие нулевого потенциала.}$$

$$nr_a = r_b \rightarrow n^2 r_a^2 = r_b^2$$

$$n^2(R^2 + a^2 - 2Ra \cdot \cos\theta) = R^2 + b^2 - 2Rb \cdot \cos\theta$$

$$(n^2 - 1)R^2 + n^2a^2 - b^2 = 2R \cdot \cos\theta(n^2a - b)$$

Решение не будет зависеть от угла θ (т.е. поверхность является сферой), если правая часть будет равна 0 и любых θ :

$$n^2a = b \rightarrow \frac{b}{a} = n^2 \text{ подставим в верхнее:}$$

$$(n^2 - 1)R^2 + n^2a^2 - b^2 = (n^2 - 1)R^2 + n^2a^2 - n^4a^2 =$$

$$= (n^2 - 1)(R^2 - n^2a^2) = 0$$

Получаем:

$$\frac{b}{R} = n \text{ и } \frac{R}{a} = n, \quad d = b - a = \frac{n^2 - 1}{n^2} R$$

§.5.3. Проводящая заземлённая сфера и точечный заряд вне сферы.

Как найти поле точечного заряда q_b , находящегося на расстоянии b от центра заземлённой проводящей сферы? Чему равен заряд сферы? Какое поле будет внутри сферы?

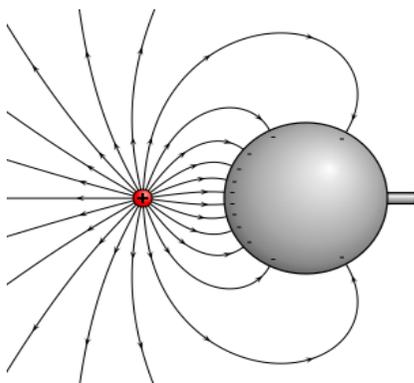


Рис.49

Если заменить эквипотенциальную сферу в §.5.2 с потенциалом $\varphi=0$ на металлическую и заземлить, то поле не изменится. Заряд q_b будет притягиваться к заземлённой сфере с радиусом R так же, как притягивался бы к заряду q_a . Для вычислений вводим **фиктивный** заряд q_a на рас-

стоянии a от центра сферы. Реальный точечный заряд q_b находится на расстоянии b от центра сферы.

Обратите внимание!!! Заземление сферы не означает, что суммарный реальный заряд на сфере равен нулю. Для создания нулевого потенциала по сфере неравномерно распределяется реальный заряд равный q_a , противоположный по знаку заряду q_b .

Напоминаем величины:

проводящая заземленная сфера

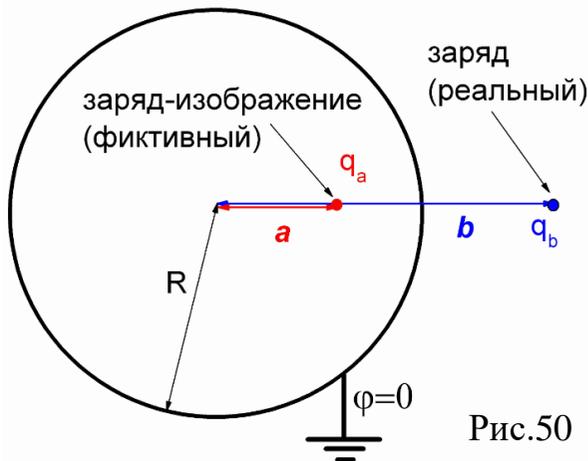


Рис.50

$$n = \frac{b}{R},$$

$$q_a = -\frac{q_b}{n} =$$

$$-\frac{R}{b} q_b$$

$$a = \frac{b}{n^2} = \frac{R^2}{b}$$

Значение силы находим по формуле:

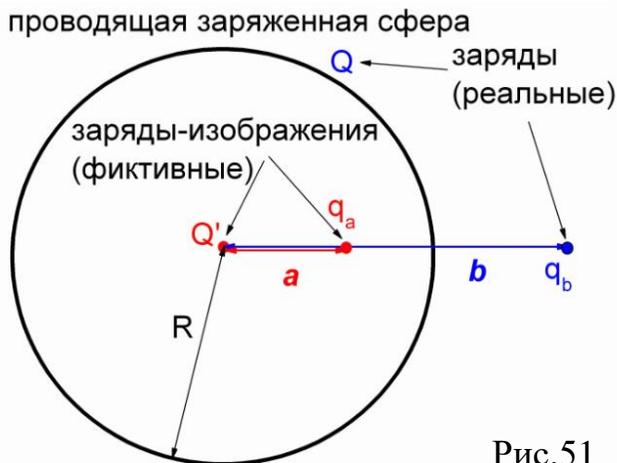
$$F = k \frac{\frac{R \cdot q_b}{b} \cdot q_b}{(b - a)^2} = k \frac{R \cdot b \cdot q_b^2}{(b^2 - R^2)^2}$$

При воздействии точечного заряда q_b на сфере индуцируется заряд $-\frac{R}{b} q_b$. Внутри сферы нет изолированных зарядов, следовательно напряжённость равна нулю и потенциал внутри, как и на поверхности равен нулю.

§.5.4. Проводящая незаземлённая сфера и точечный заряд вне сферы.

Как рассчитать поле точечного заряда, находящегося на расстоянии b от центра произвольно заряженной проводящей сферы? Можно мысленно поместить в центр сферы в §.5.3 заряд Q' . Поверхность сферы, согласно принципу суперпозиции для потенциалов, останется эквипотенциальной, следовательно её можно заменить проводящей сферой с потенциалом:

$$\varphi_1 = k \frac{Q'}{R}$$



В реальности, вместе с неравномерно распределённым зарядом q_a , на поверхности сферы равномерно

распределится заряд Q' . Суммарный заряд на сфере будет :

$$Q = Q' + q_a = Q' - \frac{R \cdot q_b}{b}$$

Если сфера была не заряжена, то $Q=0$, и в центр помещают фиктивный заряд $Q' = \frac{R \cdot q_b}{b}$. Заряд Q' имеет одинаковый знак с реальным точечным зарядом q_b , но находится дальше, чем q_a , заряженным противоположно. Поэтому незаряженная сфера притягивает точечный заряд, но слабее, чем заземлённая:

$$F = k \frac{\frac{R \cdot q_b}{b} \cdot q_b}{(b-a)^2} - k \frac{\frac{R \cdot q_b}{b} \cdot q_b}{b^2} = k \cdot q_b^2 \cdot \frac{(2 - \frac{R^2}{b^2}) \cdot R^3}{b \cdot (b^2 - R^2)^2},$$

Потенциал сферы будет :

$$\varphi_1 = k \frac{q_b}{b}.$$

В случае, когда на сфере был заряд Q , сила притяжения:

$$F = k \frac{R \cdot b \cdot q_b^2}{(b^2 - R^2)^2} - k \frac{(Q + \frac{R \cdot q_b}{b}) \cdot q_b}{b^2}.$$

Если значение F отрицательное, то точечный заряд отталкивается.

Потенциал внутри и на поверхности заряженной сферы : $\varphi_2 = k \frac{q_b}{b} + k \frac{Q}{R}$

Обратите внимание!!!

$$F = k \frac{R \cdot b \cdot q_b^2}{(b^2 - R^2)^2} - k \frac{R \cdot q_b^2}{b^3} - k \frac{Q \cdot q_b}{b^2}$$

Первое слагаемое отвечает за притяжение заряда q_b с противоположным по знаку зарядом, возникающем на стенках заземлённой сферы. Второе—за отталкивание от совпадающего по знаку заряда, возникающего при разделении зарядов на незаряженной сфере. Третье—за отталкивание (или притяжение, в зависимости от знака заряда Q) от суммарного заряда Q на сфере.

§.5.5. Проводящая сфера и точечный заряд внутри сферы.

- **Сфера заземлена.**

Рассмотрим поле изолированного заряда Q_a , находящегося внутри проводящей **заземлённой** сферы с радиусом R на расстоянии a от центра.

Все силовые линии начинаются на изолированном положительном точечном заряде и заканчиваются на отрицательно заряженных участках внутренней поверхности сферы. Уходящих в бесконечность линий нет, следовательно заряд на сфере равен по величине и противоположен по знаку точечному заряду. Потенциал сферы равен потенциалу в бесконечности, т.е. нулю. Поле за пределами сферы отсутствует.

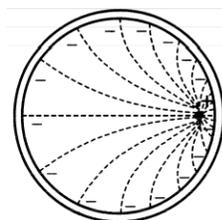
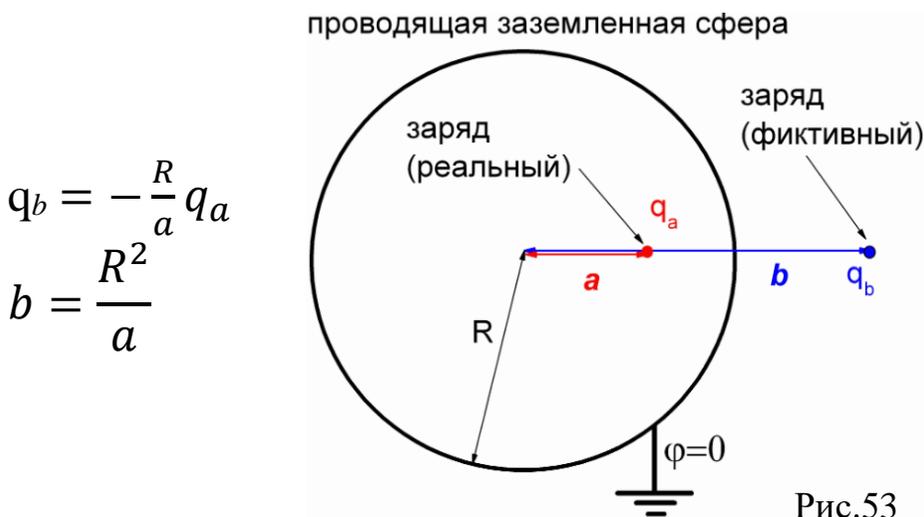


Рис.52

Для вычисления поля внутри сферы введём фиктивный заряд q_b , находящийся на расстоянии b от центра сферы притяжение к которому будет равно притяжению к стенкам сферы. Согласно §.5.3 величины равны:



Сила притяжения такая же как в §.5.2, согласно 2-ому закону Ньютона:

$$F = k \frac{\frac{R \cdot q_b}{b} \cdot q_b}{(b - a)^2} = k \frac{R \cdot a \cdot q_a^2}{(R^2 - a^2)^2}$$

- **Сфера не заземлена и заряжена.**

Линии и величина напряжённости внутри сферы, имеющей заряд Q , будут точно такими же, как внутри заземлённой сферы. На внутренней поверхности

неравномерно распределён напряжённость равна нулю. Нормально распределяется по поверхности и влияет на напряжённость в центре:

$$\varphi = k \frac{Q+q_a}{R}$$

За пределами сферы будут полностью совпадать с полем радиусом R и зарядом $Q+q_a$.

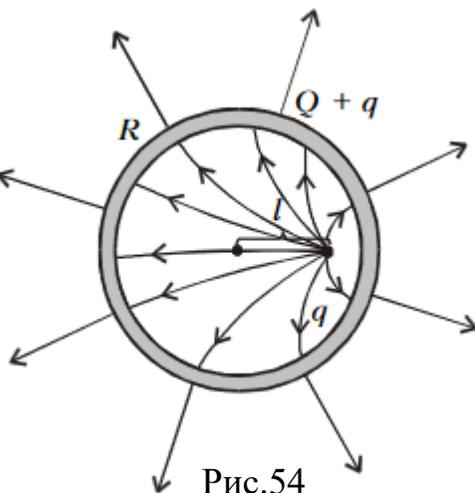


Рис.54

§.5.6. Две проводящие заряженные сферы.

Для нахождения поля двух заряженных сфер радиусами R_1 и R_2 , зарядами Q_1 и Q_2 , находящимися на расстоянии b , пользуются методом последовательных приближений.

Метод последовательных приближений используется, когда точное решение очень громоздко или кажется невозможным. Метод применяют при условии, что небольшие изменения в условиях не вызовут больших скачков в результатах. Он позволяет оценить искомые значения.

В нулевом приближении будем считать оба заряда точечными. Их сила взаимодействия:

$$F = k \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{b^2}$$

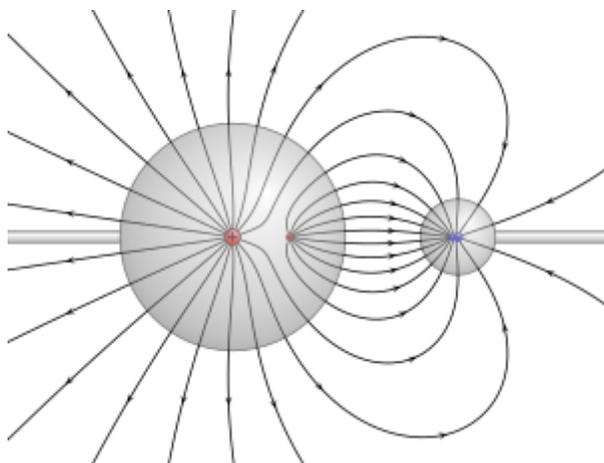


Рис.55

В первом приближении будем считать сначала второй заряд точечным, взаимодействующим с первой заряженной сферой. Согласно §.5.4 сферу заменяем двумя фиктивными точечными зарядами:

$q_1 = -\frac{R_1}{b} \cdot Q_2$ — заряд на расстоянии a_1 от центра первой сферы,

$Q'_1 = Q_1 - \frac{R_1}{b} \cdot Q_2$ — заряд в центре первой сферы,

$a_1 = \frac{R_1^2}{b}$ — расстояние от центра первой сферы до q_1 .

Если считать первый заряд точечным, то вторую сферу заменяем на фиктивные заряды:

$q_2 = -\frac{R_2}{b} \cdot Q_1$ — заряд на расстоянии a_2 от центра второй сферы,

$Q'_2 = Q_2 - \frac{R_2}{b} \cdot Q_1$ — заряд в центре второй сферы,
 $a_2 = \frac{R_2^2}{b}$ — расстояние от центра второй сферы до q_2 .

Сила взаимодействия между сферами в первом приближении:

$$F = -k \frac{(bQ_1 - R_1Q_2) \cdot (bQ_2 - R_2Q_1)}{b^4} +$$

$$+ k \frac{(bQ_1 - R_1Q_2) \cdot R_2Q_1}{(b^2 - R_1^2)^2} + k \frac{(bQ_2 - R_2Q_1) \cdot R_1Q_2}{(b^2 - R_2^2)^2} -$$

$$- k \frac{R_1Q_2 \cdot R_2Q_1}{(b^2 - R_1^2 - R_2^2)^2}$$

Для второго приближения будем считать каждую сферу взаимодействующей с двумя фиктивными зарядами вместо другой сферы. В следующих приближениях получим две бесконечные цепочки точечных зарядов, взаимодействующих между собой.

Таблицы

Таблица. Плотность и диэлектрическая проницаемость

Вещество	Плотность кг/м³	Диэлектрическая про- ницаемость
Воздух	1,29	1,00058
Вода	1000	81
Керосин	800	2
Масло	900	2,5
Парафин	900	2
Слюда	2770	6
Стекло	2500	7

		Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																											
Период	Ряд	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII													
		Li Литий 6,939	Be Бериллий 9,0122	B Бор 10,811	C Углерод 12,01115	N Азот 14,0067	O Кислород 15,9994	F Фтор 18,9984	Ne Неон 20,179	Na Натрий 22,9898	Mg Магний 24,305	Al Алюминий 26,9815	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,9738	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453	Ar Аргон 39,948	Обозначение элемента	Атомный номер										
I	1	(H)																											
II	2	Li Литий 6,939	Be Бериллий 9,0122	B Бор 10,811	C Углерод 12,01115	N Азот 14,0067	O Кислород 15,9994	F Фтор 18,9984	Ne Неон 20,179	Na Натрий 22,9898	Mg Магний 24,305	Al Алюминий 26,9815	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,9738	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453	Ar Аргон 39,948	Li Литий 6,939											
III	3	Na Натрий 22,9898	Mg Магний 24,305	Al Алюминий 26,9815	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,9738	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453	Ar Аргон 39,948	Ca Кальций 40,08	Zn Цинк 65,37	Sr Стронций 87,62	Rb Рубидий 85,47	Ag Серебро 107,868	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	Hg Ртуть 200,59	Au Золото 196,967	Fr Франций 223										
IV	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,956	Ti Титан 47,90	V Ванадий 50,942	Cr Хром 51,996	Mn Марганец 54,9380	Fe Железо 55,847	Co Кобальт 58,9330	Ni Никель 58,71	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,9216	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904	Kr Криптон 83,80	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4							
V	5	Rb Рубидий 85,47	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,905	Zr Цирконий 91,22	Nb Ниобий 92,906	Mo Молибден 95,94	Tc Технеций [99]	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,9216	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904	Kr Криптон 83,80	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4							
VI	6	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	La* Лантан 138,91	Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,948	W Вольфрам 183,85	Re Рений 186,2	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,2	Pt Платина 195,09	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,9216	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904	Kr Криптон 83,80	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4							
VII	7	Ag Серебро 107,868	Cd Кадмий 112,40	In Индий 114,82	Sn Сурьма 118,69	Sb Сурьма 121,76	Te Теллур 127,60	I Иод 126,9044	Xe Ксенон 131,30	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,2	Pt Платина 195,09	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,9216	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904	Kr Криптон 83,80	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4						
VIII	8	Fr Франций 223	Ra Радий 226	Ac** Актиний [227]	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,980	Po Полоний [210]*	At Астат [210]	Rn Радон [222]	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,2	Pt Платина 195,09	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,9216	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904	Kr Криптон 83,80	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,905	Pd Палладий 106,4						
IX	9	Pr Прозеодим 140,907	Nd Неодим 144,24	Pm Прометий [147]*	Sm Самарий 150,35	Eu Европий 151,96	Gd Гадолиний 157,25	Tb Тербий 158,925	Dy Диспрозий 162,50	Ho Гольмий 164,930	Er Эрбий 167,26	Yb Иттербий 173,04	Lu Лютеций 174,97	Pr Прозеодим 140,907	Nd Неодим 144,24	Pm Прометий [147]*	Sm Самарий 150,35	Eu Европий 151,96	Gd Гадолиний 157,25	Tb Тербий 158,925	Dy Диспрозий 162,50	Ho Гольмий 164,930	Er Эрбий 167,26	Yb Иттербий 173,04	Lu Лютеций 174,97				
X	10	Th Торий 232,038	Pa Протактиний 231	U Уран 238,03	Np Нептуний [237]	Pu Плутоний [244]	Am Америций [243]	Cm Кюрий [247]	Bk Берклий [247]	Cf Калифорний [251]*	Es Эйнштейний [252]	Fm Фермий [257]	Md Менделеев [258]	No Нобелий [259]	Lr Лоуренсий [260]	Th Торий 232,038	Pa Протактиний 231	U Уран 238,03	Np Нептуний [237]	Pu Плутоний [244]	Am Америций [243]	Cm Кюрий [247]	Bk Берклий [247]	Cf Калифорний [251]*	Es Эйнштейний [252]	Fm Фермий [257]	Md Менделеев [258]	No Нобелий [259]	Lr Лоуренсий [260]

Вид излучения и энергия (МэВ)	Ядро	Период полураспада
	Уран -238	4,47 млрд лет
альфа (4,15 -4,2)	↓	
	Торий -234	24,1 суток
бета	↓	
	Протактиний -234	1,17 минуты
бета	↓	
	Уран -234	245 000 лет
альфа (4,72 -4,78)	↓	
	Торий -230	8 000 лет
альфа (4,62 -4,69)	↓	
	Радий -226	1 600 лет
альфа (4,60 -4,78)	↓	
	Радон -222	3,823 суток
альфа (5,49)	↓	
	Полоний -218	3,05 минуты
альфа (6,0)	↓	
	Свинец -214	26,8 минуты
бета	↓	
	Висмут -214	19,7 минуты
бета	↓	
	Полоний -214	0,000164 секунды
альфа (7,69)	↓	
	Свинец -210	22,3 года
бета	↓	
	Висмут -210	5,01 суток
бета	↓	
	Полоний -210	138,4 суток
альфа (5,305)	↓	
	Свинец -206	Стабильный

Оглавление

Глава 1. Электростатика.....	2
§1. Основные понятия и законы.....	2
§2. Характеристики электростатического поля.....	9
§2.1. Напряжённость.....	9
§2.2. Потенциал.....	21
§2.3. Однородное электростатическое поле.....	30
§3. Элементарные сведения о строении атомов.....	40
§3.1. Модели атома.....	41
§3.2. Квантование заряда. Опыт Иоффе и Милликена.....	44
§4. Проводники и диэлектрики.....	50
§4.1. Проводники. Электростатическая индукция.....	50
§4.2. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков.....	54
§5. Метод изображений в электростатике.....	61
§5.1. Поле точечного заряда около проводящей плоскости.....	62
§5.2. Поверхность нулевого потенциала для двух разноимённых зарядов.....	64
§5.3. Проводящая заземлённая сфера и точечный заряд вне сферы.....	67
§5.4. Проводящая незаземлённая сфера и точечный заряд вне сферы.....	69
§5.5. Проводящая сфера и точечный заряд внутри сферы.....	71
§5.6. Две проводящие заряженные сферы.....	73
Таблицы.....	76