Министерство образования и науки Российской Федерации

**Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Е.В. Яковлева**

**ФИЗИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Нижнекамск**

**2017**

**УДК 537**

**Я 47**

Печатается по решению редакционно-издательского совета НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ».

**Рецензенты:**

**Биктагиров В.В.,** кандидат химических наук, доцент,

**Кондратьев В.В.,** доктор педагогических наук, профессор.

**Яковлева, Е.В.**

**Я 47** Физика. Электричество : учебное пособие / Е.В. Яковлева. − Нижнекамск : НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ». − 2017. – 47 с.

В данном учебном пособии по дисциплине физика по разделу «Электричество» приведены лекции и задания для организации самостоятельной работы студентов очно-заочной и заочной формы обучения, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 27.03.04 «Управление в технических системах», а также для специалистов в области автоматизации производства.

Пособие не исключает работу студентов с учебниками и задачниками по физике для вузов, но позволяет в связи с дефицитом аудиторного времени при очно-заочной и заочной форме обучения использовать приведенный теоретический материал в качестве кратких конспектов при подготовке к лабораторным и практическим занятиям, к коллоквиумам, зачетам и экзаменам.

**УДК 537**

© Яковлева Е.В., 2017

© НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ», 2017

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| **ВВЕДЕНИЕ** | 4 |
| **Курс лекций:** |  |
| **Тема 1. Электростатика** |  |
| 1.1. Электрический заряд. Закон Кулона | 5 |
| 1.2. Напряженность электростатического поля | 10 |
| 1.3. Поле диполя | 10 |
| 1.4. Потенциал электростатического поля | 12 |
| 1.5. Связь между напряженностью и потенциалом | 13 |
| 1.6. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса | 15 |
| 1.7. Электроемкость уединенного проводника | 16 |
| 1.8. Взаимная электроемкость. Конденсаторы | 18 |
| 1.9. Соединение конденсаторов | 20 |
| 1.10. Энергия электростатического поля | 21 |
| **Тема 2. Электродинамика** |  |
| 2.1. Электрический ток. Сила и плотность тока | 23 |
| 2.2. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряженность | 24 |
| 2.3. Закон Ома в классической электронной теории проводимости металлов | 26 |
| 2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца | 28 |
| 2.5. Соединение проводников | 29 |
| 2.6. Правило Кирхгофа для разветвленных цепей | 30 |
| **Тема 3. Электрический ток в металлах, вакууме и газах** |  |
| 3.1. Вывод основных законов электрического тока в классической теории электропроводности металлов | 32 |
| 3.2. Работа выхода электронов из металла | 33 |
| 3.3. Эмиссионные явления и их применения | 34 |
| 3.4. Ионизация газов. Несамостоятельный газовый разряд | 35 |
| 3.5. Самостоятельный газовый разряд и его типы | 37 |
| **Задания для самостоятельной работы студентов** |  |
| Комплект заданий для выполнения расчетной работы № 1 | 40 |
| Комплект заданий для выполнения расчетной работы № 2 | 43 |
| Вопросы для подготовки к коллоквиуму | 45 |
| **Список использованной литературы** | 46 |

**ВВЕДЕНИЕ**

Предлагаемое учебное пособие написано для организации самостоятельной и аудиторной работы на лекционных, практических и лабораторных занятиях по дисциплине физика со студентами очно-заочного и заочного отделения, обучающимися по программам бакалавриата «Управление в технических системах», «Информатика и вычислительная техника», «Автоматизация технологических процессов и производств» с целью оказания им методической помощи. Пособие написано по разделу «Электричество», в котором теоретический материал частично подобран на основе базового учебного пособия для вузов автора Д.Б. Вафина и распределен по трем темам: «Электростатика», «Электродинамика», «Электрический ток в металлах, вакууме и газах». По двум темам «Электростатика» и «Электродинамика» представлен набор задач для самостоятельного решения на практических занятиях и выполнения контрольных работ. В конце пособия приведены вопросы для подготовки к коллоквиуму.

Данное пособие не исключает работу с учебниками и задачниками для вузов, кроме того, некоторые теоретические вопросы в нем не рассматриваются или представлены в сжатом объеме в связи с ограниченным числом аудиторных часов по физике для очно-заочной и заочной формы обучения.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Тема 1. Электростатика**

**§ 1.1. Электрический заряд. Закон Кулона**

*Электростатикой* называется раздел физики об электричестве, в котором изучаются взаимодействия и свойства систем электрических зарядов, неподвижных относительно выбранной инерциальной системы отсчета (ИСО).

С древних времен было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы. Английский врач Джильберт в конце XVI в. назвал тела, способные после натирания притягивать легкие предметы, *наэлектризованными.*

Существует два рода электрических зарядов – положительные и отрицательные. Если стекло потереть о кожу, то на нем возникают заряды, которые назвали положительными. Заряды, подобные возникающим на эбоните, потертом о мех назвали отрицательными. При взаимодействии одноименные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные – притягиваются.

+

ядро

модель атома

Рис. 1.1

Опытным путем Р.Э. Милликен в 1909г. впервые показал, что электрический заряд дискретен, т.е. заряд может меняться скачкообразно. Наименьшая порция электрического заряда называется элементарным зарядом 

Носителями элементарных зарядов являются некоторые элементарные частицы. Носителями отрицательных зарядов являются электроны, носителями положительных – протоны.



Атом состоит из положительно заряженного ядра и электронов, которые вращаются вокруг него (рис. 1.1).

В состав ядра атома входят протоны. *Количество протонов в ядре равно количеству электронов в атоме*, следовательно, атом электрически нейтрален.

Если атом присоединяет один или несколько электронов, то он превращается в отрицательный ион и тело в целом приобретает отрицательный заряд. Если атом теряет электроны, то превращается в положительный ион.

Состав ядра атома не меняется, за исключением взаимодействий происходящих при ядерных реакциях.

Таким образом, если у тела избыточное число электронов, то оно обладает отрицательным зарядом. При недостатке электронов тело обладает положительным зарядом.

Единица электрического заряда *кулон (Кл).*

1*Кл* – это такой электрический заряд, который проходит через поперечное сечение проводника при силе тока в 1*А* за 1*с*.

1*Кл* = 1*А* · 1*с*.

Английский физик М.Фарадей в 1843г. опытным путем установил *закон сохранения заряда*: в замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов остается постоянной при любых физико-химических превращениях внутри данной системы.

. (1.1.1)

Взаимодействие между двумя неподвижными точечными зарядами определяется *законом Кулона*.

Пусть и одноименные заряды, тогда  сила, действующая со стороны заряда  на заряд ,радиус-вектор, соединяющий первый заряд со вторым, сила, действующая со стороны заряда  на заряд , (рис. 1.2).









Рис. 1.2



Закон был экспериментально установлен французским физиком Ш.О.Кулоном в 1785г.: *два точечных заряда взаимодействуют между собой в вакууме с силами, прямо пропорциональными произведению этих зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния между ними.*

 (1.1.2)

где  коэффициент пропорциональности.

 электрическая постоянная.

 единичный вектор.

Так как для электрических сил взаимодействия справедлив III закон Ньютона, то 

Обозначим 

Тогда закон Кулона в алгебраической форме имеет вид:

. (1.1.3)

Обозначим  силу взаимодействия зарядов в вакууме, а

силу взаимодействия зарядов в среде.

*В любой среде сила взаимодействия между зарядами меньше, чем в вакууме.*

 (1.1.4)

диэлектрическая проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая во сколько раз в данной среде силы взаимодействия между точечными зарядами меньше, чем в вакууме, при одинаковых расстояниях между зарядами.

Для вакуума диэлектрическая проницаемость εвак.=1.

*Закон Кулона с учетом диэлектрической проницаемости среды* (в алгебраической форме) имеет следующий вид:

 (1.1.5)

Любое заряженное тело можно представить как совокупность зарядов. Поэтому сила с которой одно заряженное тело действует на другое, будет равна геометрической сумме всех сил, приложенных ко всем точечным зарядам второго тела со стороны всех точечных зарядов первого тела.

При решении физических задач иногда удобнее рассматривать непрерывное распределение зарядов вдоль линии, поверхности или объема. В этих случаях используют понятия линейной плотности электрических зарядов, поверхностной и объемной плотности электрических зарядов.

Линейная плотность электрических зарядов рассчитывается по формуле:

 (1.1.6)

где – элементарный заряд малого участка заряженной линии 

Поверхностная плотность электрических зарядов показывает распределение элементарного заряда по заряженной поверхности площадью 

 (1.1.7)

Объемная плотность электрических зарядов численно равна отношению элементарного заряда к элементарному объему заряженного тела:

 (1.1.8)

**§ 1.2. Напряженность электростатического поля**

Вокруг заряженных тел существует электрическое поле. В отличие от других полей, электрическое поле действует на электрический заряд с силой, которая не зависит от скорости движения заряда.

Электрическое поле не изменяющихся с течением времени пространственных зарядов называется *электростатическим*.

Для исследования электрического поля используется заряд. Измерив силу, действующую на пробный заряд, можно судить о характере поля.

В качестве пробного заряда обычно берут положительный пробный точечный заряд, который должен быть настолько малым, чтобы его внесение в поле не вызывало перераспределения в пространстве электрических зарядов, создающих это поле.











Пусть пробный заряд  находится в поле точечного положительного заряда *q*. Тогда на пробный заряд со стороны поля заряда *q* действует сила

Рис. 2.1

 (1.2.1)

где  радиус-вектор, соединяющий заряд *q* с точкой, где вычисляется напряженность поля (т.е. помещается пробный заряд), расстояние междуи(рис. 2.1).

*Напряженностью электрического поля* называется основная количественная характеристика электрического поля, т.е. силовая характеристика поля, которая равна отношению силы, действующей со стороны электрического поля на точечный пробный заряд, помещенный в рассматриваемую точку поля, к величине этого заряда.

 (1.2.2)

Напряженность электростатического поля не зависит от величины пробного заряда. Подставляя (1.2.1) в (1.2.2), получим:

 (1.2.3)

Графически электростатическое поле изображают силовыми линиями напряженности.

касательная





Рис.2.2

Силовые линии – это кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности. По густоте силовых линий можно судить о величине напряженности (рис. 2.2).

Для точечных зарядов считается справедливым, что силовые линии выходят от положительного заряда и входят в отрицательный заряд, т.е. направлены от положительного заряда к отрицательному (рис. 2.3).

Для однородного поля (когда вектор напряженности в любой точке поля постоянен по величине и направлению) линии напряженности параллельны вектору напряженности.

Рис. 2.3

*q*





–*q*

-

+

Например: электрическое поле заряженной плоскости. Линии напряженности начинаются и заканчиваются на зарядах, либо уходят в бесконечность.

Основная задача электростатики: по заданному распределению в пространстве электрических зарядов найти значения вектора напряженности *E* во всех точках поля. Эта задача может быть решена на основе принципа суперпозиции электрических полей (принципа независимости действия электрических полей): напряженность электрического поля системы электрических зарядов равна геометрической сумме напряженности полей каждого из зарядов в отдельности.

(1.2.4).



Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы, действующей на пробный положительный заряд. Если поле создается положительным зарядом, то вектор напряженности направлен вдоль радиус-вектора от заряда во внешнее пространство (рис. 2.4). Если поле создается отрицательным зарядом, то вектор напряженности направлен к заряду (рис. 2.5).

*q*

+

*A*



Рис. 2.4

*q*

-

*A*



Рис. 2.5

**§ 1.3. Поле диполя**

Электрическим диполем называется система, состоящая из двух равных по модулю разноименных зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля. *Осью диполя* называется отрезок прямой, соединяющий оба заряда.











-

+

Рис. 3.1

*Плечом диполя называется* вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и численно равный расстоянию между ними.

Вектор  называется *электрическим моментом диполя* (дипольный электрический момент), совпадает по направлению с плечом диполя и равен произведению модуля заряда на плечо диполя

 (1.3.1)

Единица измерения электрического момента диполя – *кулон-метр* (Кл∙м).

Если поле создается системой точечных зарядов, то напряженность результирующего поля определяется как векторная сумма напряженности отдельных зарядов, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности

 (1.3.2)

В качестве первого примера рассчитаем напряженность поля на продолжении оси диполя в точке *А* (см. рис. 3.2). Результирующая напряженность в точке А направлена по оси диполя и в проекции на Ox равна 

–

+

0

*q*

*l*

*q*



*r*

**

*A*

**

**

Рис. 3.2

 (1.3.3)

т.к.  то  (1.3.4)

Пример 2. Найдем напряженность поля на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины в т.*B*, равноудаленной от зарядов



(1.3.5)

Рис. 3.3

+

–









*q*

*q*

*l*





Из подобия треугольников:  (1.3.6)

тогда  (1.3.7)

 имеет направление, противоположное вектору электрического момента диполя (вектор  направлен от отрицательного заряда к положительному).

**§ 1.4. Потенциал электростатического поля**

Работа сил электрического поля при перемещении электрического заряда в электростатическом поле из т.1 в т.2 по любой траектории равна изменению потенциальной энергии перемещаемого электрического заряда q в электростатическом поле, взятому с обратным знаком:

 (1.4.1)

Для разных электрических зарядов в одной и той же точке поля потенциальная энергия имеет разные значения, однако отношение потенциальной энергии к модулю заряда в одной и тоже точке электростатического поля для любого заряда одинаково и поэтому является энергетической характеристикой данной точки поля. Это отношение обозначается буквойи называется *потенциалом электростатического поля. Потенциал– это энергетическая характеристика поля, численно равная потенциальной энергии единичного положительного точечного заряда помещенного в рассматриваемую точку поля.*

 (1.4.2)

Единица электрического потенциала – *вольт* (В).

1В = 1Дж /1Кл.

Потенциал, как скалярная величина, может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Например, для точечного заряда  (1.4.3)

Тогда потенциальная энергия в точке равна

 (1.4.4)

Из выражений (1.4.1) и (1.4.4) следует, что работа сил электростатического поля при перемещении электрического заряда из точки с потенциалом  в точку с потенциалом  равна произведению заряда на разность потенциалов электростатического поля в т.1 и в т.2.

 (1.4.5)

Если  то . Следовательно, (1.4.6)

*Потенциал* данной точки поля численно равен работе, которую необходимо совершить для перемещения единичного положительного точечного заряда силами поля из рассматриваемой точки в бесконечность.

Геометрическое место точек с одинаковыми потенциалами называется эквипотенциальной поверхностью.

Если поле образовано системой электрических зарядов, то потенциал электрического поля в некоторой точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов создаваемых в этой точке каждым из зарядов в отдельности:

 (1.4.7)

**§ 1.5. Связь между напряженностью и потенциалом**

Напряженность – это силовая характеристика некоторой точки электростатического поля, а потенциал является энергетической характеристикой этой же точки поля. Следовательно, между напряженностью и потенциалом должна существовать определенная связь.

Пусть пробный заряд  совершает элементарное перемещение *dl*, в однородном электрическом поле, напряженность которого .

Работа перемещения  (1.5.1)

Эту же работу можно представить

 (1.5.2)

Здесь *изменение потенциала*.

Приравнивая выражения (1.5.1) и (1.5.2), получим:

 (1.5.3)

где  проекция перемещения на направление силовой линии.

Тогда  (1.5.4)

Величина называется **градиентом потенциала.**

*Градиент потенциала – это вектор, направленный в сторону наибольшего увеличения потенциала и численно равный изменению потенциала на единицу длины в данном направлении.*

Таким образом  (1.5.5)

# Напряженность равняется но направлена в противоположную сторону.

Если  тоСледовательно, из выражения (1.5.3) получаем, что т.е. при перемещении заряда перпендикулярно силовым линиям, потенциал не меняется.

Покажем другую связь между напряженностью и потенциалом. Работа по перемещению заряда  между точками 1 и 2 определяется выражением:

 (1.5.6)

С другой стороны: (1.5.7)

Приравнивая выражения (1.5.6) и (1.5.7), получаем:

 (1.5.8)

Из выражения (1.5.8) видно, что разность потенциалов между двумя точками равняется работе перемещения единичного положительного заряда силами поля между этими точками.

**§ 1.6. Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса**

Вычисление напряженности поля системы электрических зарядов с помощью принципа суперпозиции можно упростить, используя теорему, выведенную немецким ученым Гауссом, определяющую поток вектора напряженности электрического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность.

Рассмотрим поток вектора напряженности через произвольную поверхность 



*dS*

*α*

*dS*

**



Рис. 6.1

Пусть элемент поверхности 

единичный вектор, перпендикулярный площадке

угол между нормалью к площадке и направлением вектора напряженности электрического поля 

Тогда поток вектора напряженности электрического поля через площадку равен:

 (1.6.1)

Число линий напряженности, пронизывающих элементарную площадку , равен:

 (1.6.2)

Сравнивая (1.6.2) и (1.6.1), замечаем, что *поток вектора напряженности* равняется числу силовых линий напряженности, пронизывающих рассматриваемую поверхность.

Тогда суммарный поток через произвольную поверхность

интеграл по поверхности.

Вычислим поток напряженности через сферическую поверхность *S’ ,* в центре которой имеется точечный заряд 

Напряженность электрического поля, создаваемая точечным зарядом равна:

 (1.6.3)

Поэтому 

 (1.6.4)

Если внутри замкнутой поверхности  имеется система точечных зарядов, то их суммарная напряженность определяется по принципу суперпозиции 

Тогда поток напряженности через замкнутую поверхность произвольной формы, охватывающей систему точечных зарядов:

(1.6.5)

Теорема Гаусса для электростатического поля в среде с диэлектрической проницаемостью : поток напряженности через замкнутую поверхность равняется отношению алгебраической суммы зарядов, находящихся внутри этой поверхности к произведению

 теорема Гаусса. (1.6.6)

Если заряд распределен в пространстве непрерывно по объему, то вводят понятие *объемной плотности* заряда

 (1.6.7)

Тогда заряд объема  охватывающего поверхность  определяется:

 (1.6.8)

Следовательно, теорема Гаусса примет следующий вид:  (1.6.9)

**§ 1.7. Электроемкость уединенного проводника**

Рассмотрим уединенный проводник – проводник, который удален от других проводников, тел и зарядов. Если проводнику сообщить зарядто он распределится по поверхности проводника.

Из опыта известно, что разные проводники, одинаково заряженные, могут иметь разные потенциалы. Отсюда вытекает, что потенциал проводника прямо пропорционален заряду, находящемуся на нем.

Поэтому для уединенного проводника можно записать:  (1.7.1)

Физическую величину С называют электроемкостью (емкостью) уединенного проводника, которая определяется зарядом, сообщение которого проводнику изменяет его потенциал на единицу.

 (1.7.2)

Емкость проводника зависит от размеров, формы проводника и диэлектрических свойств окружающей среды, но не зависит от формы и размеров полости внутри проводника, т.к. избыточные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Единица электроемкости– фарад (Ф).

1*Ф* – емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1*В* при сообщении ему заряда 1*Кл*.

Зная потенциал шара

 (1.7.3)можно найти емкость уединенного проводящего шара:

 (1.7.4)

Отсюда следует, что емкостью в 1*Ф* обладал бы уединенный шар, находящийся в вакууме и имеющий радиус км, что примерно в 1400 раз больше радиуса Земли. Емкость Земли около 0,7*мФ*.

**§ 1.8. Взаимная электроемкость. Конденсаторы**

+

+

+

-

-

-

Диэлектрик

*d*

*- q*

*+ q*





Рис. 8.1

Из предыдущего параграфа видно, для того, чтобы проводник обладал большой емкостью, он должен иметь большие размеры. Однако, на практике необходимы устройства, обладающие способностью при малых размерах и небольших потенциалах относительно окружающих тел накапливать значительные заряды, т.е. обладать большой емкостью.

Эти устройства называются конденсаторами.

Система из двух проводников (обкладок) разделенных тонким слоем диэлектрика представляет собой простейший конденсатор (рис.8.1).

Конденсатор применяется для кратковременного накопления зарядов.

Взаимная емкость – это заряд, который необходимо сообщить одному из проводников, чтобы разность потенциалов между ними увеличивалась на 1*В*.

 (1.8.1)

Взаимная емкость намного больше, чем емкость каждого проводника в отдельности. Наличие диэлектрика между проводниками приводит к ослаблению напряженности поля, т.е. уменьшению разности потенциалов. Это увеличивает электроемкость.

Рассчитаем электроемкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью  каждая, расположенных на расстоянии  друг от друга и имеющих заряды  и 

Если расстояние между пластинами мало по сравнению с их линейными размерами, то поле между обкладками можно считать однородным. При наличии диэлектрика между обкладками разность потенциалов между ними равна:

 (1.8.2)

гдеповерхностная плоскость заряда.

Тогда емкость плоского конденсатора:

 (1.8.3)

Встречаются цилиндрические и сферические конденсаторы.

Цилиндрические конденсаторы состоят из двух полых коаксиальных цилиндров с радиусами  и (причем) вставленные один в другой. Между ними помещают диэлектрик.

Применяя соотношение для линейной плотности заряда

 (1.8.4), получим (1.8.5)

Отсюда емкость цилиндрического конденсатора:

, (1.8.6),

гдедлина обкладок.

Сферический конденсатор состоит из двух концентрических обкладок, разделенных сферическим слоем диэлектрика. Диэлектрик расположен между обкладками радиусами  и Емкость сферического конденсатора равна:

 . (1.8.7)

Отсюда получим: (1.8.8)

Емкость конденсаторов любой формы прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика, заполняющего всё пространство между обкладками.

Поэтому для получения конденсаторов большой емкости, в качестве диэлектрика используют сегнетоэлектрики.

*Пробивным напряжением* называется разность потенциалов между обкладками конденсатора, при которой происходит *пробой,* т.е. электрический заряд проходит через слой диэлектрика в конденсаторе. Пробивное напряжение зависит от формы обкладок, свойств диэлектрика и его толщины.

**§ 1.9. Соединение конденсаторов**

Для увеличения емкости и получения ее необходимых значений конденсаторы соединяют в батареи, при этом используется их параллельное и последовательное соединения.

Рассмотрим последовательное соединение конденсаторов.



































Рис. 9.1

Предположим, что левой обкладке первого конденсатора сообщен заряд – За счет сил электростатического отталкивания валентные электроны от правой обкладки первого конденсатора через соединяющий проводник перейдут на левую обкладку второго конденсатора (рис. 9.1).

Таким образом, происходит зарядка батареи конденсаторов.

В результате, чтобы зарядить всю батарею, достаточно сообщить заряд обкладке какого-либо конденсатора. Тогда все конденсаторы приобретут такой же по модулю заряд.

 (1.9.1)

Из схемы видно, что общая разность потенциалов всей батареи равняется сумме разности потенциалов между обкладками всех конденсаторов.

 (1.9.2)

Из выражений (1.9.1) и (1.9.2) и применяя соотношение

 (1.9.3)

получим общую емкость при последовательном соединении конденсаторов:

 (1.9.4)

При параллельном соединении все конденсаторы подсоединены к одним точкам, поэтому разность потенциалов у всех конденсаторов одинакова (рис. 9.2).

 (1.9.5)

где 

Левые обкладки всех конденсаторов можно рассматривать как одну суммарную обкладку. То же самое относится и к правой обкладке.



…























Рис. 9.2

Поэтому заряд всей батареи равняется сумме зарядов отдельных конденсаторов.



 (1.9.6)

Из (1.9.5) и (1.9.6) получаем  (1.9.7)

– общую емкость при параллельном соединении конденсаторов.

**§ 1.10. Энергия электростатического поля**

Пусть имеется проводник, заряд, емкость и потенциал которого соответственно равны Увеличим его заряд на  для этого необходимо перенести заряд из бесконечности на данный проводник. При этом совершается элементарная работа против силы отталкивания со стороны поля заряженного тела:

 (1.10.1)

Применяя соотношениеполучим

 (1.10.2)

Эта работа накапливается в виде энергии электрического поля заряженного проводника. При переносе заряда  из бесконечности на проводник увеличиваем потенциальную энергию поля на величину:

 (1.10.3)

Проинтегрировав выражение (1.10.3), находим потенциальную энергию электростатического поля заряженного проводника при увеличении его заряда от 0 до

 (1.10.4)

Применяя соотношение  получаем следующее выражение для энергии электрического поля заряженного тела:

 (1.10.5)

Полученные формулы справедливы при любой форме обкладок.

Однако, если конденсатор плоский, то его емкость определяется выражением тогда для потенциальной энергии плоского конденсатора с учетом  справедливо выражение:

 (1.10.6)

В однородном поле конденсатора его энергия распределена равномерно по всему объему поля Учитывая получим выражение для энергии поля плоского конденсатора:

 (1.10.7),

где энергия, заключенная в единице объема, называется удельной энергией электростатического поля. Тогда удельная энергия электрического поля определяется выражением:

 (1.10.8)

**Тема 2. Электродинамика**

**§ 2.1. Электрический ток. Сила и плотность тока**

+

-

###### S

**

**

**

проводник

Рис. 1.1

*Электрическим током* называется упорядоченное движение электрических зарядов под действием сил электрического поля.

В проводнике под действием приложенного электрического поля с напряженностью  свободные электрические заряды перемещаются: положительные – по полю, отрицательные – против поля (рис. 1.1).

За положительное направление электрического тока принимают направленное движение положительных зарядов. Электроны проводимости движутся всегда в направлении, противоположном направлению тока.

Количественной мерой электрического тока является *сила тока*, которая определяется электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

 (2.1.1) где *dq* – количество электрического заряда, проходящего за время *dt* через поперечное течение проводника.

Единица силы электрического тока *J –* ампер [*А*]. Эталон Ампера вводится из рассмотрения магнитного взаимодействия параллельных токов. Для характеристики направления электрического тока в разных точках рассматриваемой поверхности и распределения силы тока по этой поверхности вводят понятие вектора плотности тока.

*Плотностью тока* называется векторная физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярно направлению тока:

 (2.1.2)

Единица плотности электрического тока 

Сила тока сквозь произвольную поверхность *S* определяется как поток вектора плотности тока:

 (2.1.3)

где = · *dS* ( – единичный вектор, направленный по нормали к площадке *dS*).

**§ 2.2. Сторонние силы. Электродвижущая сила и напряженность**

Рис. 2.1

J

+

-

###### R

**

**





###### -

###### +

Чтобы в проводнике все время существовал постоянный ток, на его концах необходимо поддерживать постоянную разность потенциалов. Для этого используют источники тока.

Внутри источника тока происходит непрерывное разделение зарядов противоположного знака и их перенос к соответствующим полюсам.

Для разделения зарядов нельзя использовать электрические силы, так как разноименные заряды притягиваются.

Поэтому для разделения зарядов необходимо использовать силы неэлектрического происхождения, т.е. сторонние силы, которые действуют на заряды со стороны источника тока. Природа сторонних сил может быть различной: химической (в гальванических элементах они возникают за счет энергии химической реакции между электродами и электролитами); механической (в генераторе за счет механической энергии вращения ротора генератора).

Под действием создаваемого сторонними силами поля электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электрического поля и на концах внешней цепи поддерживается постоянная разность потенциалов. В результате в цепи течет постоянный электрический ток J (рис. 2.1).

Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов. Физическая величина, определяющая работу сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль всей цепи называется электродвижущей силой ( ).

 (2.2.1)

Сторонняя сила, действующая на пробный заряд равна:

, (2.2.2) где напряженность поля сторонних сил.

Тогда работа сторонних сил поля по перемещению  на замкнутом участке цепи равна:

 . (2.2.3)

Разделим выражение (2.2.3) на и получим выражение для ЭДС, действующей на участке 1–2.

 (2.2.4)

*a*

*b*

*ε*

+

-

###### R

На заряд  кроме сторонних сил действуют также силы электрического поля 

Поэтому результирующая сила равна:

 (2.2.5)

Тогда работа результирующей силы над зарядомна участке 1–2:

 (2.2.6)

Учитывая связь между напряженностью и потенциалом и выражение (2.2.4), получим:

 (2.2.7)

Известно, что для замкнутой цепи  тогда работа результирующей силы на замкнутой цепи равна:

 (2.2.8)

Напряжением на участке 1–2 называется физическая величина, определяемая суммарной работой, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

 (2.2.9)

Понятие напряжения является обобщением понятия разности потенциалов: напряжение на концах цепи равно разности потенциалов в том случае, если на этом участке не действует ЭДС, т.е. сторонние силы отсутствуют (участок не содержит источника тока).

**§ 2.3. Закон Ома в классической электронной теории проводимости металлов**

Металлы имеют кристаллическую структуру. В узлах кристаллической решетки располагаются положительные ионы, а валентные электроны отдельных атомов хаотически движутся между узлами решетки.

В классической электронной теории проводимости металлов предполагается, что свободные электроны движутся согласно законам справедливым для молекул идеального газа. При хаотическом тепловом движении электроны сталкиваются как между собой, так и с узлами решетки. Взаимное столкновение электронов для электрических свойств проводника значения не имеет.

В электрическом поле к хаотическому движению электронов добавляется их направленное движение.

При столкновениях с узлами кристаллической решетки электроны меняют направление движения произвольно, поэтому теряют скорость направленного движения. Результатом столкновения электронов с узлами решетки является сопротивление металлов. С повышением температуры соударения электронов с ионами решетки становятся чаще. Сопротивление проводников зависит от температуры:

, (2.3.1)где  сопротивление проводника при 0R–сопротивление проводника при t термический коэффициент сопротивления. Для химически чистых металлов  К–1.

Сопротивление проводника также зависит от его размеров, формы и материала, из которого проводник изготовлен. Для однородного цилиндрического проводника длиной и площадью поперечного сечения S сопротивление рассчитывается по формуле:

 (2.3.2) где *ρ* – удельное сопротивление проводника.

Единица удельного сопротивления –

Немецкий физик Г. Ом (1787 – 1854) экспериментально установил, что сила тока *J*, текущего по однородному металлическому проводнику прямо пропорционально напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка проводника.

Закон Ома для участка цепи (не содержащего источник тока):

 (2.3.3)

Единица сопротивления *R –* [1 *Ом*] – это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1*В* течет постоянный электрический ток 1 *А*.

Величину обратную электрическому сопротивлению называют проводимостью проводника:

 (2.3.4)

Единица проводимости проводника – [См]– сименс.

1 сименс – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1*Ом*.

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме:

 следовательно,  , (2.3.5)

где  удельная электрическая проводимость вещества проводника 

Учитывая, что  напряженность электрического поля в проводнике, а  плотность тока, то выражение (2.3.5) можно записать в виде:

** (2.3.6)

Это закон Ома в дифференциальной форме, связывающий плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке. Направления векторов  и  совпадают, так как носители заряда в каждой точке движутся по направлению вектора напряженности электрического поля 

**§ 2.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца**

При перемещении заряда вдоль электрической цепи кулоновские и сторонние силы совершают работу *А*. Пусть к концам однородного проводника приложено напряжение *U* и за промежуток времени *dt* через сечение проводника проходит заряд *dq*.

*dq* = *J* · *dt* (2.4.1)

Если электрическая цепь неподвижна и ток, протекающий по ней постоянен, то работа тока по перемещению заряда *dq* под действием электрического поля равна:

*dA* = *U* · *dq* (2.4.2)

Учитывая выражение для силы тока:получим

*dq* = *J* · *dt*, тогда:

*dA* = *U* · *J* · *dt* (2.4.3)

По этой формуле можно рассчитать работу, совершаемую током, независимо от того в какую энергию превращается электрическая энергия.

Используя закон Ома для участка цепи *J* = *U*/*R*, получим:

 (2.4.4) Единица работы электрического тока – [Дж] – джоуль.

Мощность тока  (2.4.5) Единица мощности тока – [*Вт*] – ватт.

Внесистемные единицы работы тока – ватт-час – [1 *Вт* · *ч*] = 3600 *Вт* · *с* = 3,6· *Дж* и киловатт-час – 1 кВт · ч = 3,6 · *Дж*.

Если ток проходит по неподвижному металлическому проводнику, то происходит рассеяние энергии в результате столкновений носителей электрического тока между собой и другими частицами среды и вся работа тока идет на его нагревание. По закону сохранения энергии:

*dQ* = *dA* (2.4.6)

Таким образом, закон Джоуля-Ленца принимает следующий вид:

 (2.4.7)

Выделим в проводнике элементарный цилиндрический объем *dV*. Где  (ось цилиндра совпадает с направлением тока). Сопротивление этого проводника

Тогда по закону Джоуля-Ленца, за время *dt* в нем выделится теплота



 (2.4.8)

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называется *удельной тепловой мощностью тока*:

 (2.4.9)

Применяя дифференциальную форму закона Омаи выражение получим закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме, который справедлив для любого проводника.

 (2.4.10)

**§ 2.5. Соединение проводников**

1. Последовательное соединение.

Рассмотрим три проводника, соединенных последовательно. Через каждый проводник проходит один и тот же ток.  (2.5.1),























*J*

Рис. 5.1

а разность потенциалов суммируется

 (2.5.2).

Используя закон Ома и выражения (2.5.1), (2.5.2), получим общее сопротивление проводников при последовательном соединении:

 (2.5.3)

2. Параллельное соединение.

При параллельном соединении проводников сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме токов, протекающих в разветвленных участках цепи:



















(Рис. 5.2)

 (2.5.4)

Все резисторы подсоединены к одним и тем же точкам, поэтому разность потенциалов в них одинакова:

 (2.5.5)

Используя закон Ома и выражения (2.5.4), (2.5.5) получим величину обратную общему сопротивлению при параллельном соединении:

 (2.5.6)

**§ 2.6. Правило Кирхгофа для разветвленных цепей**

Сложные цепи не удается рассчитывать используя только закон Ома и формулы для последовательного и параллельного соединения.

Такие цепи рассчитывают, решая систему уравнений, полученную, используя правила Кирхгофа, которые является следствием закона Ома.

*Узлом* называется точка соединения двух или более проводников.

Токи, входящие в узел, считаются положительными, а выходящие из узла – отрицательными.

Участком цепи называется часть цепи между двумя узлами. Участок может содержать несколько источников тока и ряд других элементов.

В пределах участка направление и сила тока не меняются.

*1 правило*: Алгебраическая сумма сил токов, входящих и выходящих из узла, равняется нулю.

 (2.6.1).

*2 правило*: Для замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивление соответствующего участка контура равна алгебраической сумме ЭДС источников тока, входящего в данный контур.

 (2.6.2).

*Алгоритм записи уравнений по правилам Кирхгофа:*

1. Для каждого участка выбрать произвольно направление тока и обозначить на схеме.
2. Выбрать направление обхода контуров, одинаковое для всех контуров.
3. Записать столько уравнений, сколько неизвестных. Уравнения должны быть линейно независимыми. Для этого каждое последующее уравнение должно содержать хотя бы одно неизвестное, не входившее в предыдущее уравнение, чтобы не появлялись уравнения, являющиеся простой комбинацией ранее составленных уравнений.
4. Знак произведения величин *JiRi* берется положительным, если направление тока на данном участке совпадает с направлением обхода контура.
5. Знак *εi* берется положительным, если при обходе первым встречается отрицательный полюс источника.
6. Если в результате решения системы уравнений некоторые токи отрицательны, то это означает, что токи на данном участке имеют противоположное направление, а их числовое значение остается таким же.

**Тема 3. Электрический ток в металлах, вакууме и газах**

**§ 3.1. Вывод основных законов электрического тока в классической теории электропроводности металлов**

**Закон Ома.** Пусть в металлическом проводнике существует внешнее электрическое поле напряженностью *E = const*. Поле действует на заряд с силой  и согласно закону Ньютона электрон приобретает ускорение 

Таким образом, под действием электрического поля электроны, двигаясь равноускоренно, к концу пробега приобретают скорость 

 среднее время между двумя последовательными соударениями электрона с ионами решетки.

В конце свободного пробега электрон, сталкиваясь с ионами решетки, отдает им накопленную в поле энергию, поэтому его скорость становится равной нулю. Следовательно, средняя скорость движения электрона



Среднее время свободного пробега определяется средней длиной свободного пробега и средней скоростью движения электронов относительно кристаллической решетки проводника, равной 

средняя скорость теплового движения электронов.

Так как  то 

Тогда  (3.1.1)

Так как плотность тока то есть плотность тока прямо пропорциональна напряженности электрического поля.

Учитывая, что закон Ома в дифференциальной форме имеет вид замечаем, что  удельная электропроводимость материала, которая тем больше, чем больше концентрация свободных электронов и средняя длина их свободного пробега.

**§ 3.2. Работа выхода электронов из металла**

При обычных температурах свободные электроны металл не покидают. Следовательно, в поверхностном слое металла есть задерживающее электрическое поле.

Работой выхода называется минимальная работа, которую нужно затратить для удаления электронов из металла в вакуум. Рассмотрим причины появления *Авых*:

1. если электрон по какой-то причине удаляется из металла, то в том месте, которое электрон покинул, возникает избыточный положительный заряд и электрон притягивается к индуцированному положительному заряду.
2. электроны, покидая металл, создают над поверхностью металла «электронное облако», плотность которого убывает с расстоянием. Это облако препятствует дальнейшему выходу свободных электронов из металла.

Поэтому электрон при вылете из металла должен преодолеть задерживающее его электрическое поле, при этом:

 (3.2.1)

Потенциальная энергия свободного электрона внутри металла равна Весь объем металла для электронной проводимости представляет собой некоторую потенциальную яму с вертикальными стенками и плоским дном, глубина которой равна работе выхода. Чтобы электроны могли покинуть металл, им необходимо преодолеть этот потенциальный барьер.

*Авых* [1 *эВ*] – это работа, совершаемая силами поля при перемещении элементарного электрического заряда и прохождении им разности потенциалов в 1 *В*.

Так как *Кл*, то 1 *эВ**Дж*.

Работа выхода зависит от химической природы металлов, чистоты их поверхности и может меняться в пределах нескольких *эВ*, если определенным образом подбирать покрытие поверхности металла. Например, при нанесении оксида щелочноземельного металла на поверхность вольфрама работа выхода может быть снижена в 2,25 раза.

**§ 3.3. Эмиссионные явления и их применения**

Если сообщить электронам в металлах энергию, необходимую для совершения работы выхода, то часть электронов может покинуть металл, при этом наблюдается испускание электронов, т.е. электронная эмиссия.

В зависимости от способа передачи электронам энергии выделяют термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную и автоэлектронную эмиссии.

1. Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми металлами. Даже при нормальных температурах некоторые электроны обладают энергией, достаточной для совершения работы выхода. С повышением температуры число таких электронов возрастает, и явление термоэлектронной эмиссии становится заметным.

Вакуумный диод – это стеклянный баллон, с откачанным из него воздухом, в котором имеется два электрода: *К* – катод и*А* – анод. Катодом в простейшем случае является нить из тугоплавкого металла (вольфрама), накаливаемая электрическим током (рис. 3.1).

Анод – металлический цилиндр, окружающий катод.

*mA*

+





+

*К*

*А*

Рис. 3.2

Рис. 3.1

катод

анод

цоколь

Если диод включить в цепь как на рисунке 3.2, то при накаливании катода и подаче положительного напряжения на анод, в анодной цепи диода возникает ток. Но если поменять полярность батареи  то ток прекращается, как бы сильно катод ни накаливали. Следовательно, катод испускает электроны.

Рис. 3.3



*нас*

*нас*







*T*

Вольтамперная характеристика (рис 3.3).

При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого значения *Jнас* – тока насыщения, это значит, что все электроны, покидающие катод, достигают анода и при дальнейшем увеличении напряжения, не приводит к увеличению тока.

С повышением температуры катода испускание электронов идет интенсивнее и при этом ток насыщения возрастает.

При  наблюдается анодный ток, то есть некоторые электроны обладают энергией, достаточной для совершения работы выхода и достижения анода без внешнего электрического поля.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в рентгеновских трубках, электронных микроскопах.

1. Фотоэлектронная эмиссия – это испускание электронов из металла под действием света или коротковолнового электромагнитного излучения.
2. Вторичная электронная эмиссия – это испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников или диэлектриков при бомбардировке их пучком электронов.
3. Автоэлектронная эмиссия – это эмиссия электронов с поверхности металла под действием сильного внешнего электрического поля. При напряжении 300*В* электрическое поле имеет напряженность  а при повышении напряжения возникает слабый ток, вызванный электронами, испускаемыми с катода. Токи возникают при холодном катоде, поэтому это явление называется «холодной эмиссией».

**§ 3.4. Ионизация газов. Несамостоятельный газовый разряд**

При обычных условиях газы состоят из нейтральных молекул и атомов и поэтому не содержат свободных зарядов (электронов и ионов), следовательно, не проводят электрический ток. Чтобы газ стал проводником электричества, его необходимо подвергнуть действию ионизатора.

Под действием ионизатора электроны вырываются из атомов, в результате образуются свободные электроны и положительные ионы. Электроны могут присоединяться к нейтральным атомам и превращать их в отрицательные ионы. Следовательно, в ионизированном газе имеются положительные и отрицательные ионы, а также свободные электроны.

Рис. 4.1

*mA*

*V*

+

-

Схема для изучения газового разряда

Пусть два электрода подсоединены к внешнему источнику тока (рис. 4.1). Если даже между электродами создается разность потенциалов порядка нескольких вольт, ток в цепи отсутствует.

Если газ между электродами облучать радиоактивными лучами от внешнего ионизатора, то цепь становится замкнутой, т.к. под действием облучения происходит ионизация молекул газа.

Под действием электрического поля положительные ионы перемещаются к катоду, а отрицательные ионы к аноду.

Таким образом, электрический ток в газах в начале имеет место только при наличии ионизированных молекул и представляет направленное движение ионов и электронов.

Электрический ток в газах называют газовым разрядом.

*B*

*D*

*A*

*C*

###### E

*K*

*Uн*

*Uпр.*

*U*

*Iн*

*I*

0

Рис.4.2

С увеличением напряжения *U* между электродами, ток в цепи увеличивается (рис. 4.2). Зависимость силы тока от напряжения на участке *AB* – линейная, при этом закон Ома выполняется.

Начиная с т. *B* рост силы тока замедляется, а при *U*>*Uнас*, сила тока перестает зависеть от напряжения *U*. Наступает насыщение тока газового разряда*J* = *Jн* = *const*.

Сила тока насыщения зависит только от мощности внешнего ионизатора. Ионизировать газ можно и за счет нагрева. Такой процесс называется термической ионизацией. Процесс ионизации под действием радиоактивных лучей называется фотоионизацией.

При дальнейшем увеличении напряжения, начиная с т. *D* , сила тока вновь начинает расти. При увеличении напряжения электроны и ионы повышают свою скорость, и при определенных скоростях начинается вторичный процесс ионизации: 1) электроны выбивают из нейтральных молекул электроны; 2) положительные ионы при ударе о катод выбивают из него электроны; 3) при соударениях молекул и ионов происходит переход молекул на более высокий энергетический уровень (возбуждение молекул), при обратном переходе молекул испускается фотон, который может привести к ионизации других молекул.

На любом этапе увеличения напряжения от 0 до *ε* если убрать внешний ионизатор, ток в цепи мгновенно прекращается. Газовый разряд, который имеет место только при наличии внешнего ионизатора называется несамостоятельным газовым разрядом. При *U*>*Uпроб*, сила тока в цепи резко возрастает, это говорит о том, что вторичные процессы ионизации приобретают лавинообразный характер. Если при этих напряжениях убрать внешний ионизатор, ток в цепи не прекращается. Газовый разряд, который продолжается без внешнего ионизатора, называется самостоятельным газовым разрядом.

**§ 3.5. Самостоятельный газовый разряд и его типы**

В зависимости от давления газа, конфигурация электродов, параметров внешней цепи выделяют четыре типа самостоятельного разряда: тлеющий, искровой, дуговой и коронный.

1. *Тлеющий разряд* возникает при низких давлениях. Наблюдается в стеклянной трубке длиной 0,5*м* с электродами, на которые подается напряжение несколько сот вольт (до 1000*В*) (рис. 5.1). При откачивании воздуха из трубки до 5,3 – 6,7*кПа* возникает разряд в виде светящегося извилистого шнура красноватого цвета, идущего от катода к аноду. По мере понижения давления шнур утолщается и при давлении около 13*Па* разряд имеет вид (рис.5.1):

*К*

###### А

1

2

3

5

Рис. 5.1

4

Вблизи катода находится тонкий светящийся слой 1 – первое катодное свечение (катодная пленка), затем идет темный слой 2 – катодное темное пространство, переходящее в светящийся слой 3 – тлеющее свечение. Все перечисленные слои образуют катодную часть тлеющего разряда. С тлеющим свечением граничит темный промежуток 4 – фарадеево темное пространство. Вся остальная часть трубки заполнена светящимся газом 5 – положительный столб. При понижении давления катодная часть разряда и фарадеево темное пространство расширяются, положительный столб укорачивается. При давлении 1,3*Па* положительный столб распадается на ряд чередующихся темных и светлых изогнутых слоев – страт, свечение газа ослабевает и начинают светиться стенки трубки. Электроны, выбиваемые из катода положительными ионами, при таком разряжении редко сталкиваются с молекулами газа и поэтому, ускоренные полем, ударяясь о стекло, вызывают его свечение, которое называется катодолюминесценцией. Поток таких электронов называется катодными лучами.

Тлеющий разряд применяется в технике и в газосветных трубках для светящихся надписей и реклам (неоновые газоразрядные трубки дают красное свечение, аргоновые – синевато-зеленое). Лампы дневного света более экономичны, чем лампы накаливания, излучение тлеющего разряда, происходящее в парах ртути, поглощается нанесенным на внутреннюю поверхность трубки люминофором, начинающим под действием поглощенного излучения светиться. Спектр излучения при подборе люминофора близок к спектру солнечного излучения.

Тлеющий разряд используется для катодного напыления металла. Вещество катода в тлеющем разряде при бомбардировке положительными ионами, сильно нагреваясь, переходит в парообразное состояние и если вблизи катода поместить различные предметы, то они покрываются равномерным слоем металла.

2. *Искровой разряд* возникает в тех случаях, когда напряженность электрического поля достигает пробивного значения (3*МВ*/*м*). Искра имеет вид яркого светящегося тонкого канала, сложным образом изогнутого и разветвленного.

Возникновению ярко светящегося канала искры предшествует появление слабосветящихся скоплений ионизированного газа – стримеров, которые возникают не только в результате образования электронных лавин при ударной ионизации, но и в результате фотонной ионизации газа. Лавины, догоняя друг друга, образуют проводящие мостики из стримеров, по которым в следующий момент времени движутся мощные потоки электронов, образующие каналы искрового разряда. При этом выделяется большое количество теплоты и газ в искровом промежутке нагревается до 104*К*, что приводит к его свечению. Быстрый нагрев газа приводит к повышению давления и возникновению ударных волн, звуковых эффектов при искровом разряде (пример: раскаты грома в случае молнии является примером искрового разряда между грозовым облаком и Землей или между двумя грозовыми облаками).

Искровой разряд используется для воспламенения горючей смеси в ДВС. При малой длине разрядного промежутка он вызывает разрушение поверхности металла, поэтому применяется для электроискровой точной обработки металлов (резание, сверление). Его также используют в спектральном анализе для регистрации заряженных частиц (искровые счетчики).

3. *Дуговой разряд* впервые был получен в 1802 г. В.В. Петровым. Два электрода (например, угольные) сближают до соприкосновения, затем сильно раскаляют электрическим током, а потом их разводят и получают электрическую дугу. Нагретый светящийся газ изгибается в виде дуги. Сила тока в дуге 103 – 104*А,* а переменное напряжение составляет несколько десятков вольт. Дуговой разряд может протекать как при низком, так и при высоком давлении. Основными процессами, поддерживающими разряд, являются термоэлектронная эмиссия с раскаленной поверхности катода и термическая ионизация молекул. Пространство заполнено высокотемпературной плазмой, она служит проводником. Анод под ударами мощного потока электронов, нагревается. Это приводит к тому, что анод испаряется и образуется кратер (самое яркое место). Этот разряд обладает падающей вольтамперной характеристикой. Это объясняется тем, что при увеличении силы тока увеличивается термоэлектронная эмиссия с катода.

4. *Коронный разряд*. При коронном разряде ионизация и возбуждение молекул происходят не во всяком межатомном пространстве, а лишь вблизи электрода с малым радиусом кривизны. В этой части разряда газ светится. Свечение наблюдается в виде короны. В зависимости от знака коронирующего электрода говорят о положительных или отрицательных коронах. Толщина коронирующего слоя и сила разрядного тока увеличивается с увеличением напряжения.

**Задания для самостоятельной работы студентов**

**Комплект заданий для выполнения расчетной работы № 1**

**Тема 1.** Электростатика

**Задача 1**. На рис.1 показаны точки, расположенные в узлах решетки с ячейкой в форме квадрата со стороной *а* = 0,1 м. В некоторых узлах решетки расположены точечные заряды Q1, …. Q9, величины которых с размерностью нКл (1 нКл = 10 -9 Кл) указаны в таблице 1.1. В остальных узлах заряды отсутствуют. Определите напряженность и потенциал электрического поля в точке, указанной в последнем столбце таблицы. Сделайте схематический рисунок линий напряженности электрического поля заданной системы зарядов.

• • • • •

17 16 15 14 13

• • • • •

18 5 4 3 12

• • • • •

19 6 1 2 11

• • • • •

20 7 8 9 10

• • • • •

21 22 23 24 25

**Рис.1**

**Таблица 1.1 (к задачам 1.1.1 – 1.1.30)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Величины зарядов** | | | | | | | | | **номер точки** |
| **Q1** | **Q2** | **Q3** | **Q4** | **Q5** | **Q6** | **Q7** | **Q8** | **Q9** |
| **1.1.1** |  |  | 1 |  |  |  | 1 |  | 2 | *17* |
| **1.1.2** | 2 | 1 |  |  |  | 1 |  |  |  | *4* |
| **1.1.3** | 2 |  |  | 1 |  | 1 |  |  |  | *5* |
| **1.1.4** | 3 | 1 |  | 1 |  | 1 |  |  |  | *8* |
| **1.1.5** |  |  |  | 1 |  | 1 |  |  | 2 | *21* |
| **1.1.6** |  | 1 |  | 1 |  |  | 2 |  |  | *1* |
| **1.1.7** |  |  | 1 | 2 | 1 |  |  |  |  | *12* |
| **1.1.8** | 3 | 1 |  | 1 |  |  | 1 |  |  | *3* |
| **1.1.9** |  |  |  | 1 | 1 |  |  |  |  | *1* |
| **1.1.10** |  | 1 | 2 | 1 |  |  |  |  |  | *12* |
| **1.1.11** | 1 | 1 | 1 | 1 |  |  |  |  |  | *8* |
| **1.1.12** |  |  | 1 |  | 2 |  | 1 |  |  | *9* |
| **1.1.13** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |  |  |  | *8* |
| **1.1.14** |  |  | 1 |  | 1 |  |  |  |  | *1* |
| **1.1.15** |  | 1 |  |  | 2 |  |  | 1 |  | *9* |
| **1.1.16** |  | 1 | 1 |  | 1 | 1 |  |  |  | *8* |
| **1.1.17** |  | 1 |  | 1 |  | 1 |  | 1 |  | *7* |
| **1.1.18** |  |  | 1 |  | 2 |  | 1 |  |  | *1* |
| **1.1.19** | 1 |  |  | 1 | 1 | 1 |  |  |  | *7* |
| **1.1.20** |  |  | 1 |  |  |  | 1 |  |  | *1* |
| **1.1.21** |  | 2 |  | 2 |  | 2 |  | 2 |  | *1* |
| **1.1.22** | 2 |  | 1 |  |  |  | 1 |  |  | *5* |
| **1.1.23** |  | 2 |  |  | 1 |  | 1 |  |  | *6* |
| **1.1.24** |  |  | 1 |  | 1 |  |  | 2 |  | *4* |
| **1.1.25** | 3 |  | 1 |  |  | 1 |  | 1 |  | *2* |
| **1.1.26** | 1 | 2 |  | 1 |  |  | 3 |  |  | *3* |
| **1.1.27** |  |  | 2 |  | 1 | 1 |  |  |  | *8* |
| **1.1.28** |  | 1 |  |  |  | 3 |  | 1 |  | *4* |
| **1.1.29** | 1 |  |  | 2 |  |  | 3 |  |  | *2* |
| **1.1.30** |  | 1 | 2 | 1 |  |  |  |  |  | *12* |

**Задача 2**. Равномерно заряженная сфера радиуса R1 окружена слоем диэлектрика, внешний радиус которого R2 . Заряд сферы равен Q, диэлектрическая проницаемость материала слоя ε. Нарисовать график зависимости напряженности и потенциала электрического поля от расстояния до центра сферы и вычислить поверхностную плотность заряда диэлектрика.

**Таблица 1.2 (к задачам 1.2.1 – 1.2.30)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Номер задачи** | **R1, см** | **R2, см** | **Q, нКл** | **ε** |
| **1.2.1** | 10 | 20 | 10 | 1 |
| **1.2.2** | 15 | 25 | 20 | 5 |
| **1.2.3** | 10 | 30 | 20 | 4 |
| **1.2.4** | 10 | 40 | -10 | 7 |
| **1.2.5** | 15 | 20 | 10 | 2,7 |
| **1.2.6** | 20 | 25 | 10 | 3 |
| **1.2.7** | 15 | 30 | 10 | 10 |
| **1.2.8** | 30 | 40 | -10 | 8 |
| **1.2.9** | 25 | 30 | -10 | 2,5 |
| **1.2.10** | 5 | 25 | -10 | 9 |
| **1.2.11** | 5 | 30 | 20 | 1 |
| **1.2.12** | 25 | 40 | -20 | 5 |
| **1.2.13** | 10 | 20 | -20 | 4 |
| **1.2.14** | 15 | 25 | 20 | 7 |
| **1.2.15** | 20 | 30 | 20 | 2,7 |
| **1.2.16** | 25 | 40 | 10 | 3 |
| **1.2.17** | 30 | 40 | 20 | 10 |
| **1.2.18** | 35 | 45 | 20 | 8 |
| **1.2.19** | 10 | 30 | -10 | 2,5 |
| **1.2.20** | 15 | 40 | 10 | 9 |
| **1.2.21** | 20 | 35 | 10 | 1 |
| **1.2.22** | 15 | 25 | 10 | 5 |
| **1.2.23** | 30 | 35 | -10 | 4 |
| **1.2.24** | 25 | 40 | -10 | 7 |
| **1.2.25** | 5 | 10 | -10 | 2,7 |
| **1.2.26** | 5 | 15 | 20 | 3 |
| **1.2.27** | 10 | 15 | -20 | 10 |
| **1.2.28** | 10 | 20 | -20 | 8 |
| **1.2.29** | 20 | 25 | 20 | 2,5 |
| **1.2.30** | 25 | 35 | 20 | 9 |

**Комплект заданий для выполнения расчетной работы № 2**

**Тема 2.** Электродинамика

**Задача 1**. От источника, разность потенциалов на клеммах которого *U0*, требуется передать мощность *Р* на расстояние *L*. Допустимая «потеря» напряжения в проводах *n*. Рассчитайте минимальное сечение *S* медного провода, пригодного для этой цепи.

**Таблица 2.1 (к задачам 2.1.1 – 2.1.30)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Номер задачи** | **U 0, В** | **Р, МВт** | **L, км** | ***n*, %** |
| **2.1.1** | 100 | 5 | 5 | 1 |
| **2.1.2** | 200 | 3 | 6 | 2 |
| **2.1.3** | 300 | 6 | 10 | 3 |
| **2.1.4** | 150 | 10 | 3 | 1,5 |
| **2.1.5** | 250 | 4 | 7 | 2,5 |
| **2.1.6** | 100 | 7 | 4 | 0,75 |
| **2.1.7** | 200 | 8 | 8 | 1 |
| **2.1.8** | 300 | 9 | 9 | 2 |
| **2.1.9** | 150 | 2 | 5 | 3 |
| **2.1.10** | 250 | 5 | 6 | 1,5 |
| **2.1.11** | 100 | 3 | 10 | 2,5 |
| **2.1.12** | 200 | 6 | 3 | 0,75 |
| **2.1.13** | 300 | 10 | 7 | 1 |
| **2.1.14** | 150 | 4 | 4 | 2 |
| **2.1.15** | 250 | 7 | 8 | 3 |
| **2.1.16** | 100 | 8 | 9 | 1,5 |
| **2.1.17** | 200 | 9 | 5 | 2,5 |
| **2.1.18** | 300 | 2 | 6 | 0,75 |
| **2.1.19** | 150 | 5 | 10 | 1 |
| **2.1.20** | 250 | 3 | 3 | 2 |
| **2.1.21** | 100 | 6 | 7 | 3 |
| **2.1.22** | 200 | 10 | 4 | 1,5 |
| **2.1.23** | 300 | 4 | 8 | 2,5 |
| **2.1.24** | 150 | 7 | 9 | 0,75 |
| **2.1.25** | 250 | 8 | 5 | 1 |
| **2.1.26** | 100 | 9 | 6 | 2 |
| **2.1.27** | 200 | 2 | 10 | 3 |
| **2.1.28** | 300 | 5 | 3 | 1,5 |
| **2.1.29** | 150 | 6 | 7 | 2,5 |
| **2.1.30** | 250 | 4 | 5 | 0,75 |

**Задача 2**. С каким коэффициентом полезного действия работает свинцовый аккумулятор, ЭДС которого **U 0**, если во внешней цепи сопротивлением R идет ток I ? Какую максимальную полезную мощность может дать аккумулятор во внешней цепи? Как при этом изменится его КПД?

**Таблица 2.2 (к задачам 2.2.1 – 2.2.30)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Номер задачи** | **U 0, В** | **R, Ом** | **I, А** |
| **2.2.1** | 2,15 | 0,25 | 5 |
| **2.2.2** | 2,1 | 0,2 | 4 |
| **2.2.3** | 1,9 | 0,18 | 6 |
| **2.2.4** | 2,4 | 0,3 | 4,5 |
| **2.2.5** | 2,0 | 0,4 | 3,8 |
| **2.2.6** | 1,8 | 0,15 | 5,5 |
| **2.2.7** | 1,75 | 0,23 | 4,3 |
| **2.2.8** | 2,10 | 0,30 | 4,8 |
| **2.2.9** | 2,25 | 0,17 | 5,8 |
| **2.2.10** | 2,0 | 0,28 | 4,1 |
| **2.2.11** | 1,95 | 0,25 | 4,2 |
| **2.2.12** | 1,85 | 0,2 | 5,4 |
| **2.2.13** | 2,30 | 0,18 | 5,7 |
| **2.2.14** | 2,15 | 0,3 | 5 |
| **2.2.15** | 2,1 | 0,4 | 4 |
| **2.2.16** | 1,9 | 0,15 | 6 |
| **2.2.17** | 2,4 | 0,23 | 4,5 |
| **2.2.18** | 2,0 | 0,30 | 3,8 |
| **2.2.19** | 1,8 | 0,17 | 5,5 |
| **2.2.20** | 1,75 | 0,28 | 4,3 |
| **2.2.21** | 2,10 | 0,23 | 4,8 |
| **2.2.22** | 2,25 | 0,30 | 5,8 |
| **2.2.23** | 2,0 | 0,17 | 4,1 |
| **2.2.24** | 1,95 | 0,28 | 4,2 |
| **2.2.25** | 1,85 | 0,25 | 5,4 |
| **2.2.26** | 1,65 | 0,18 | 5,7 |
| **2.2.27** | 1,87 | 0,3 | 5,6 |
| **2.2.28** | 2,12 | 0,4 | 4,6 |
| **2.2.29** | 2,18 | 0,15 | 4,7 |
| **2.2.30** | 2,1 | 0,3 | 4 |

**Вопросы для подготовки к коллоквиуму**

**Тема1. Электростатика**

1. Закон Кулона. Приделы применимости закона Кулона. Единицы измерения заряда.
2. Электрические поля. Напряжённость электрического поля. Единицы измерения напряжённости. Принцип суперпозиции.
3. Потенциал электрического поля. Разность потенциалов. Потенциал результирующего поля. Единицы измерения.
4. Связь потенциала с напряженностью поля.
5. Индукция электрического поля. Поток электрической индукции. Теорема Гаусса – Остроградского.
6. Поле равномерно заряженной безграничной плоскости.
7. Электрическое поле вблизи поверхности заряженного проводника.
8. Поле в плоском конденсаторе.
9. Поле, создаваемое равномерно заряженной сферической поверхностью.
10. Поле, создаваемое равномерно заряженной цилиндрической поверхностью.
11. Электроёмкость. Ёмкость плоского конденсатора. Ёмкость сферического конденсатора.
12. Соединение конденсаторов.
13. Энергия электрического поля. Плотность энергии электрического поля.

**Темы 2-3. Электродинамика. Электрический ток в металлах, вакууме и газах**

1. Электрический ток, сила тока и плотность тока.
2. ЭДС. Закон Ома для полной цепи.
3. Законы Кирхгофа для разветвлённых цепей.
4. Основные законы электрического тока в классической теории электропроводности металлов.
5. Работа выхода электронов из металлов.
6. Эмиссионные явления и их применение.
7. Ионизация газов. Несамостоятельный газовый разряд.
8. Самостоятельный газовый разряд и его типы.

**Список используемой литературы**

1. Вафин, Д.Б. Физика.Ч.1. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Электростатика. Электродинамика: учеб. пособие/Д.Б.Вафин;КГТУ.-2-е изд., доп.-Казань:Изд-во МО и Н РТ,2010.-316 с. Гриф МО
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов/ Т.И. Трофимова.- М.: Высшая школа, 2003. - 542с.
3. Хавруняк, В.Г. Курс физики : учебное пособие / В.Г. Хавруняк. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 400с.

**Учебное издание**

**Яковлева Елена Владимировна**

доктор педагогических наук, доцент

**ФИЗИКА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Корректор Белова И.М.

Худ.редактор Фёдорова Л.Г.

Сдано в набор 09.03.17.

Подписано в печать 13.03.17.

Бумага писчая. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,9. Тираж 100 экз.

Заказ № 40.

НХТИ ФГБОУ ВО «КНИТУ»,

г. Нижнекамск, 423570, ул. 30 лет Победы, д.5а.