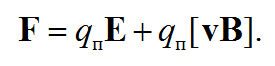
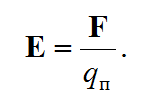
1. **Основные характеристики электромагнитного поля и среды.**

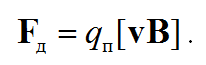
Электромагнитная волна — это колебательный процесс, свя­занный с изменяющимися в пространстве и во времени взаимо­связанными электрическими и магнитными полями. Область распространения электромагнитных волн называется электро­магнитным полем (ЭМП). Электромагнитное поле характеризуется векторами электрической напряженноcти E и индукции D, магнитной напряженности H и индукции B. Единица измерения напряженности электрического поля, согласно международной системе — вольт на метр (В/м), электрической индукции — кулон на квадратный метр (Кл/м2 ), напряженности магнитного поля — ампер на метр (А/м), магнитной индукции — тесла (Тл).Векторы E и B однозначно определяются силовым воздействием поля на пробный заряд qп (точечный малый заряд, не изменяющий исследуемое поле). На пробный заряд qп, помещенный в какой-либо точке пространства и движущийся со скоростью v, действует сила Лоренца (H), равная



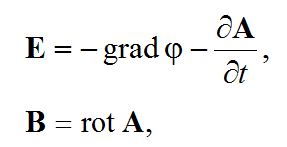
Отсюда вектор напряженности электрического поля E определяется как сила, действующая на неподвижный (v = 0) единичный заряд



Вектор индукции B определяется добавочной силой



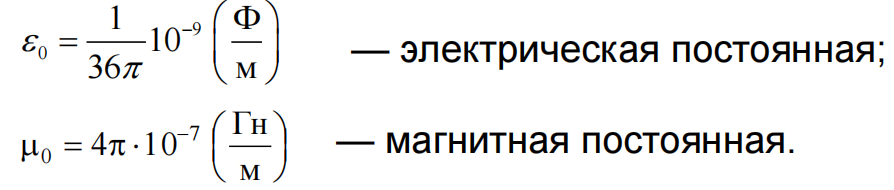
Электромагнитное поле можно характеризовать так называемыми электромагнитными потенциалами — векторным потенциалом A и скалярным φ. Эти величины связаны с векторами E и B следующим образом:



т. е. электрическое поле создается зарядами и изменением во времени магнитного поля; поле магнитной индукции имеет соленоидальный характер. Среда, в которой происходят электрические и

связанные с ними магнитные явления, характеризуется диэлектрической проницаемостью, магнитной проницаемостью и проводимостью. Связь векторов D и E, B и H определяется свойствами среды. В вакууме

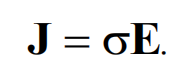


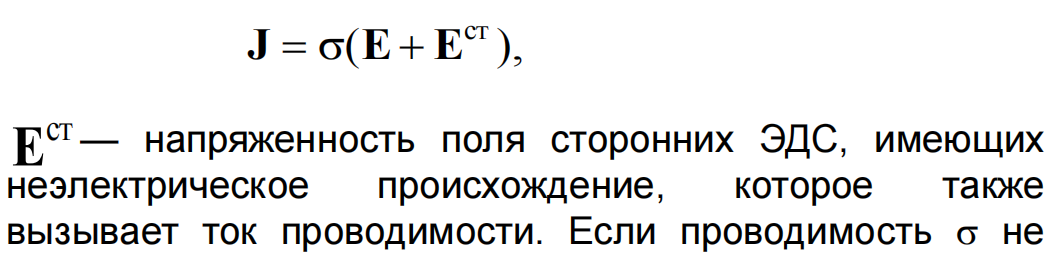


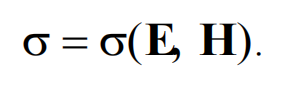
В зависимости от значения удельной проводимости среды делятся на

* проводники  104 См/м (сименс на метр),
* полупроводники 10–10 < σ < 104 См/м,
* диэлектрики σ < 10–10 См/м

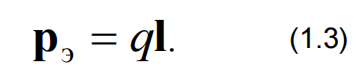
Проводники характеризуются наличием свободных зарядов, которые могут свободно перемещаться под действием электрического поля, при этом создается ток проводимости. В металлических проводниках это электроны, в жидких электролитах — ионы.

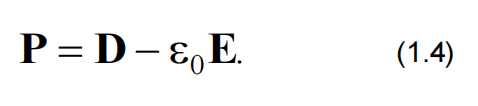


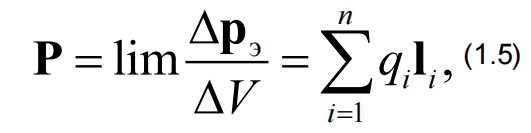


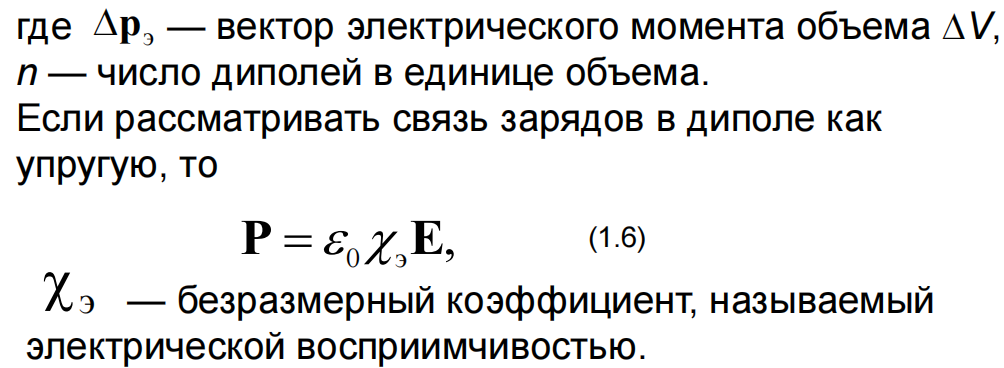


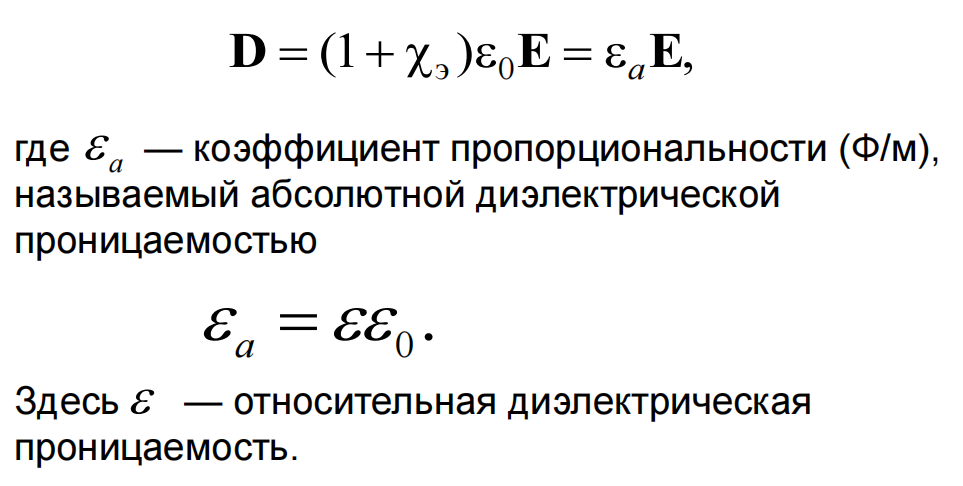
Диэлектрики характеризуются наличием связанных зарядов, входящих в состав нейтральных молекул диэлектриков. Под действием электрического поля происходит смещение ядра атома, обладающего положительным зарядом, и искажение орбит отрицательных электронов. При этом центр тяжести отрицательных зарядов уже не совпадает с положительным зарядом ядра. Такая система эквивалентна диполю.

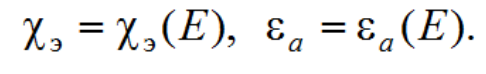


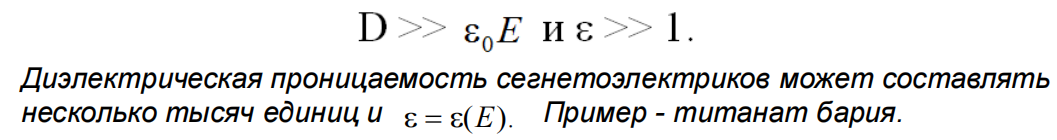




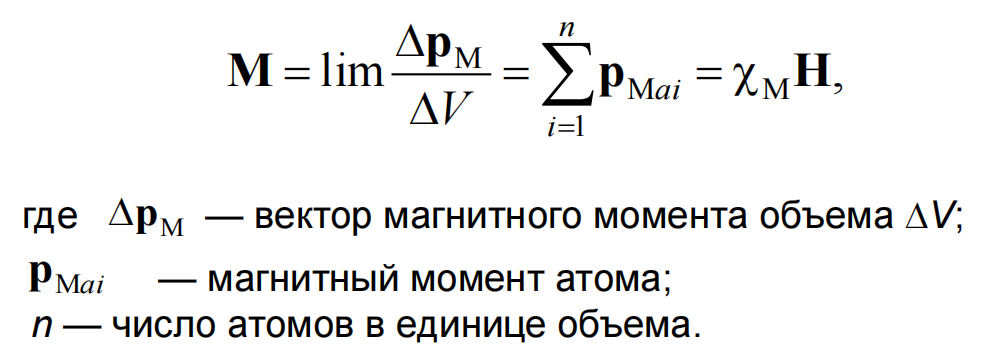


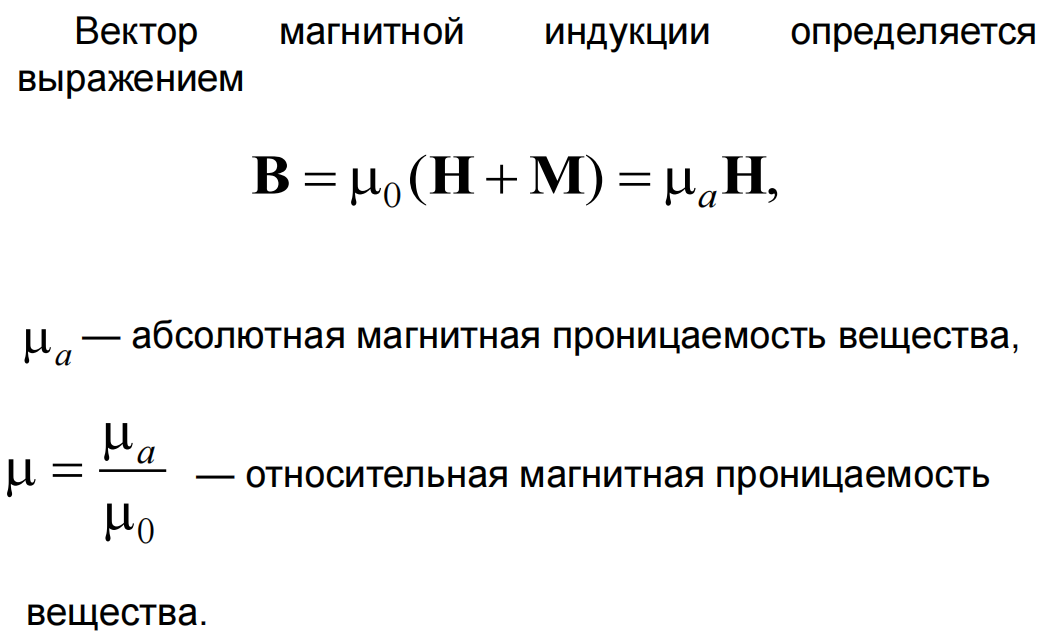




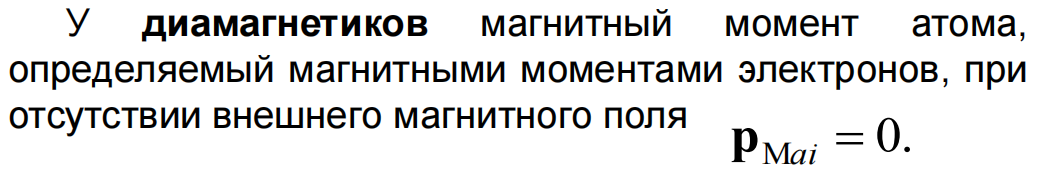


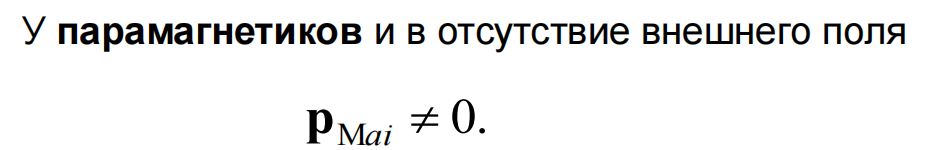
Магнетики — это среды, способные намагничиваться. Аналогично вектору поляризации вектор намагниченности M (А/м) определяется выражением



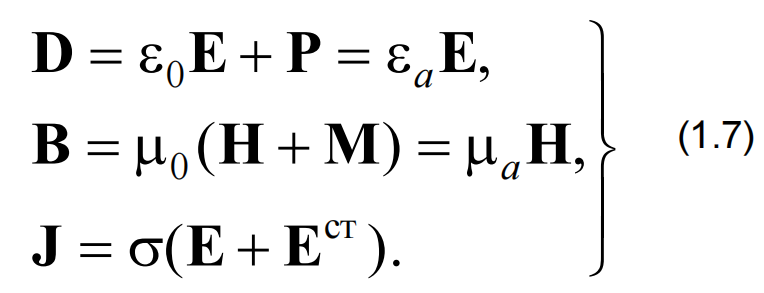


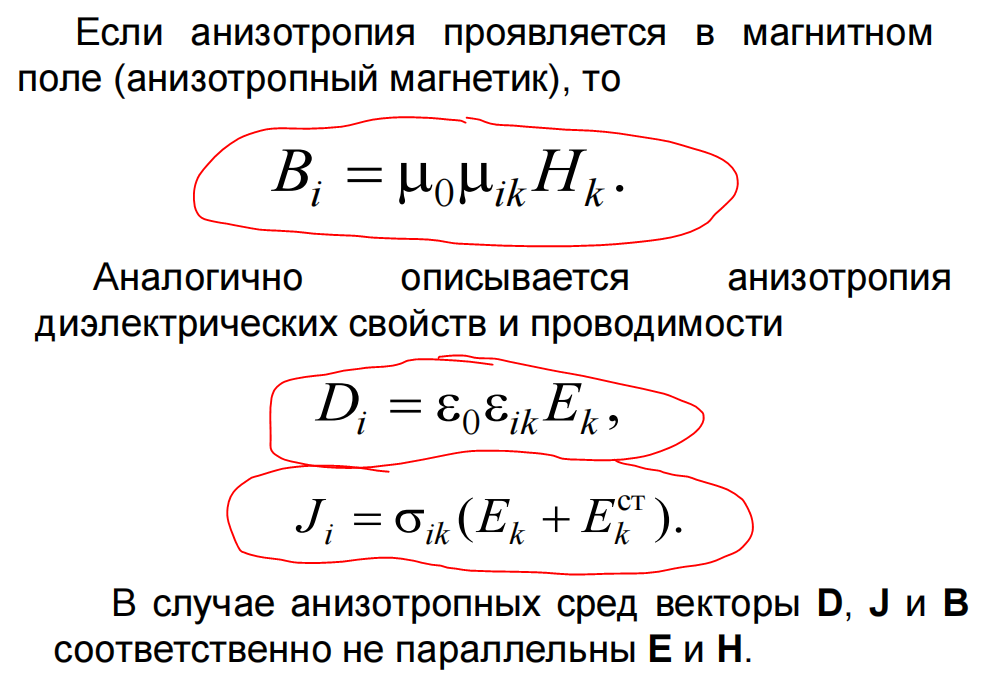
Магнетики делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.





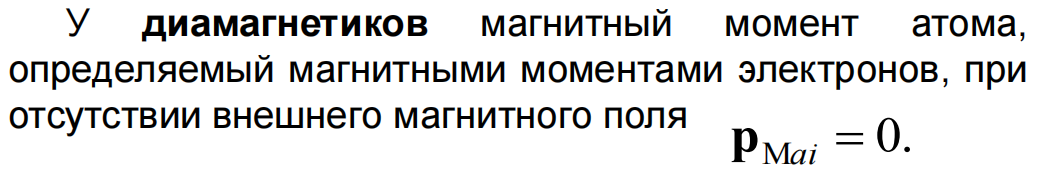
В ферромагнетиках существуют отдельные микроскопические области (домены) с линейными размерами порядка 10–3 см.

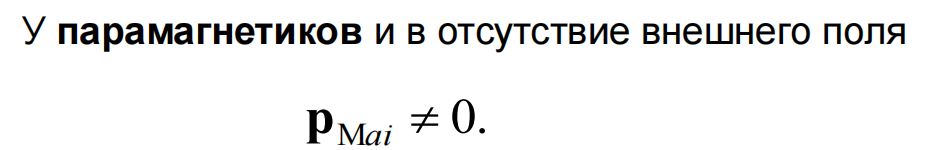




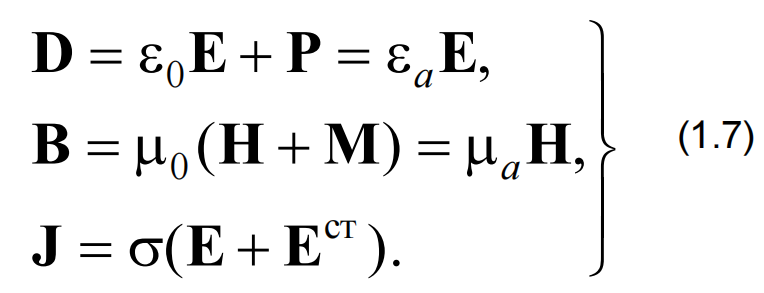
1. **Классификация магнетиков. Намагниченность насыщения.**

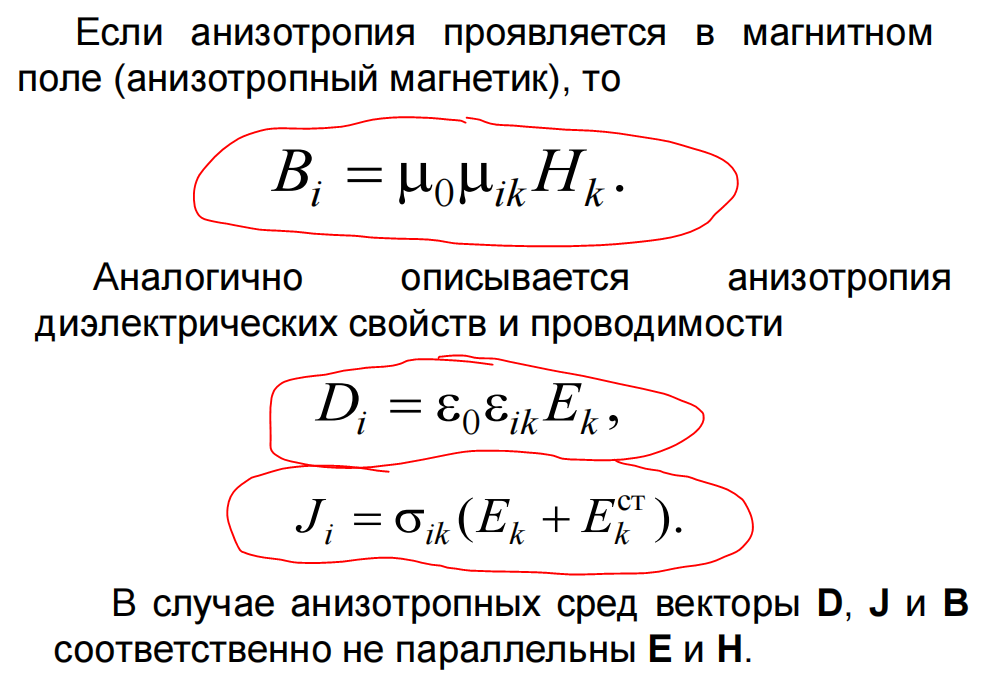
Магнетики делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.





В ферромагнетиках существуют отдельные микроскопические области (домены) с линейными размерами порядка 10–3 см.



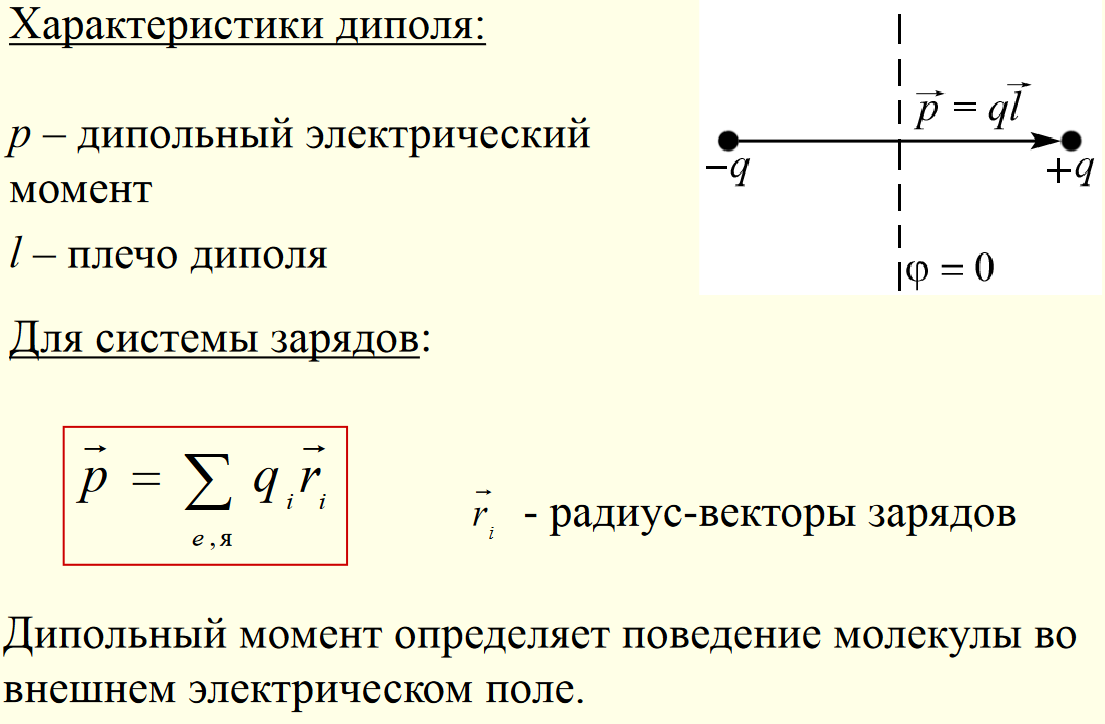


Намагниченность насыщения − состояние ферромагнетика, при котором его намагниченность достигает предельного значения Jm, не меняющегося при дальнейшем увеличении напряженности намагни­чивающего поля. При этом образец состоит как бы из одного домена с намагниченностью насыщения, направленной по полю.

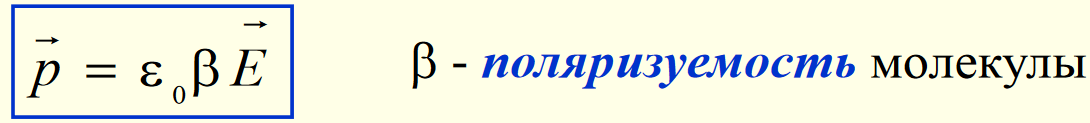
1. **Диэлектрик электрическом поле. Индуцированная поляризация.**

* **Диэлектрик электрическом поле**

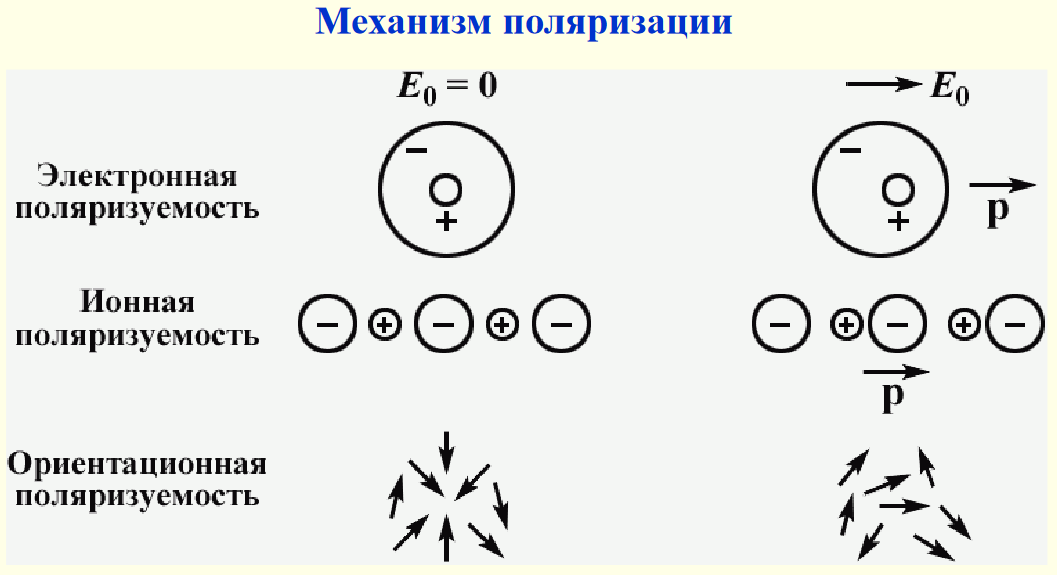
Диэлектрики состоят из молекул. Заряды в диэлектрике не могут свободно перемещаться создавая ток. Тем не менее молекулы обладают электрическими свойствами. Под действием электрического поля заряды в диэлектрике смещаются на расстояния порядка межатомных из положения равновесия – происходит поляризация диэлектрика – **молекулы становятся электрическими диполями, ориентированными положительно заряженными концами по полю.** Возникшие заряды называются индукционными, или связанными. Помимо них в диэлектрике могут быть свободные (сторонние) заряды - нескомпенсированные макроскопические заряды, появившиеся в результате, например электризации трением.



Неполярные молекулы (электронная поляризуемость): в отсутствие электрического поля «центры тяжести» отрицательных и положительных зарядов молекул совпадают (нет собственного дипольного момента). Возникший в электрическом поле индуцированный дипольный момент пропорционален напряженности электрического поля:

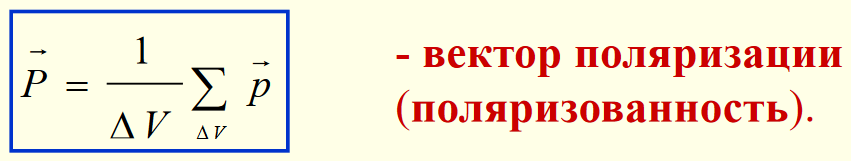


Полярные молекулы (ориентационная поляризуемость): в отсутствие электрического поля «центры тяжести» отрицательных и положительных зарядов молекул не совпадают (наличие собственного дипольного момента у молекул). В отсутствие электрического поля диполи совершают хаотическое тепловое движение, их ориентация беспорядочна. При внесении в поле происходит ориентация диполей по полю, сам дипольный момент не изменяется (жесткий диполь). Ионные диэлектрические кристаллы (ионная поляризуемость): 2 решетки из ионов противоположных знаков. При внесении в электрическое поле происходит сдвиг решеток.



* **Поляризация диэлектриков**

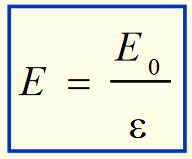
В отсутствие внешнего электрического поля суммарный дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении в поле происходит поляризация диэлектрика – дипольный момент становится отличным от нуля. степень поляризации характеризуется дипольным моментом единицы объема диэлектрика:



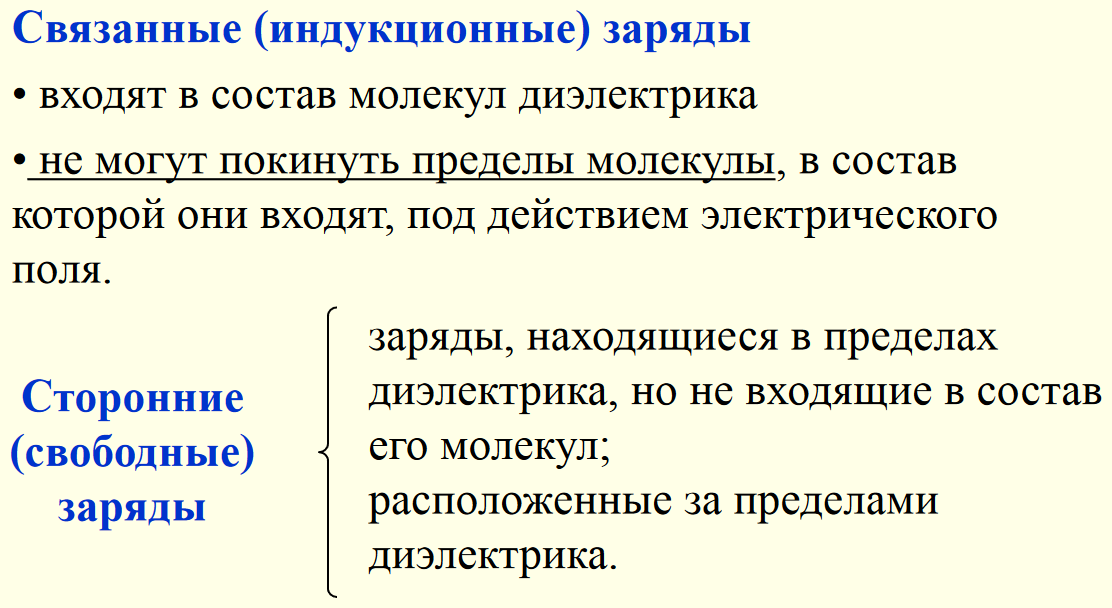
Для изотропных диэлектриков:

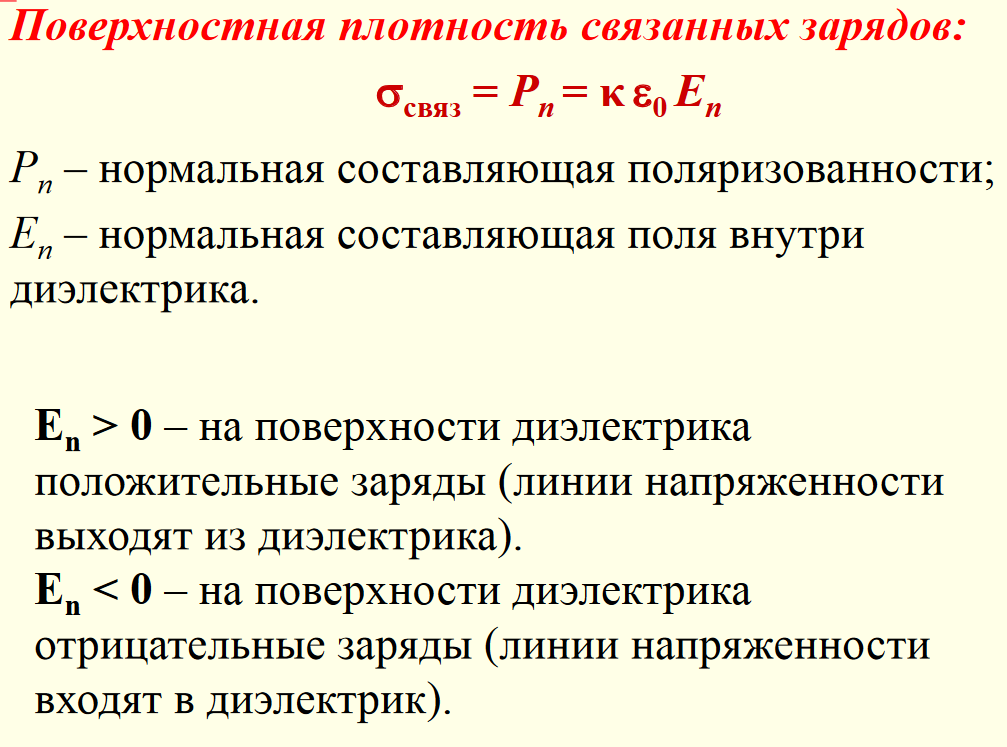


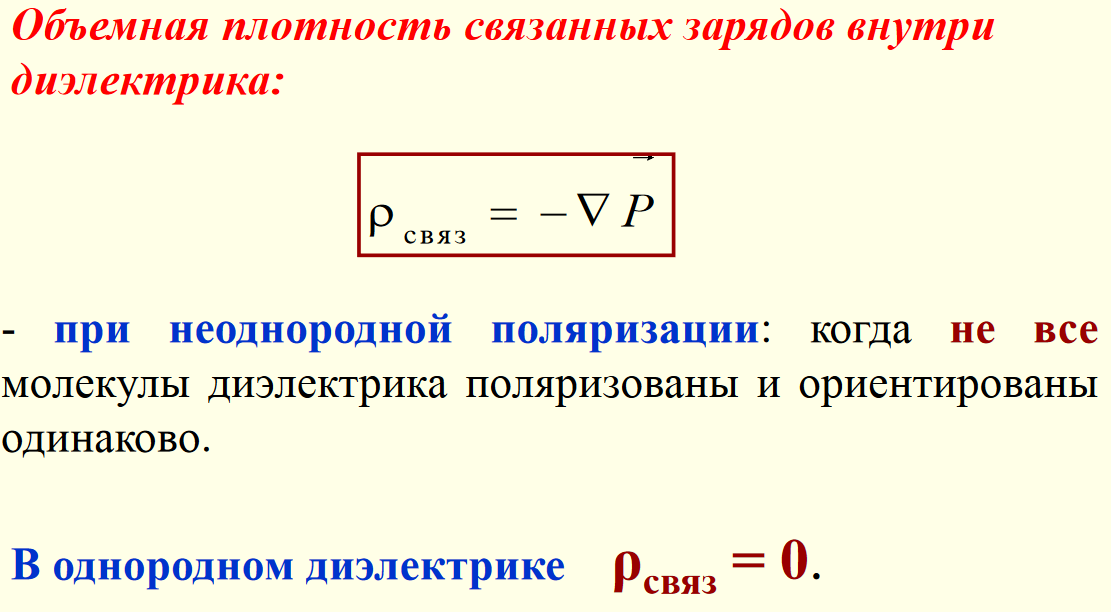
Если внести в однородное электрическое поле диэлектрик, то поле возникших связанных зарядов будет направлено противоположно внешнему полю и ослабляет его. В результате внутри диэлектрика:



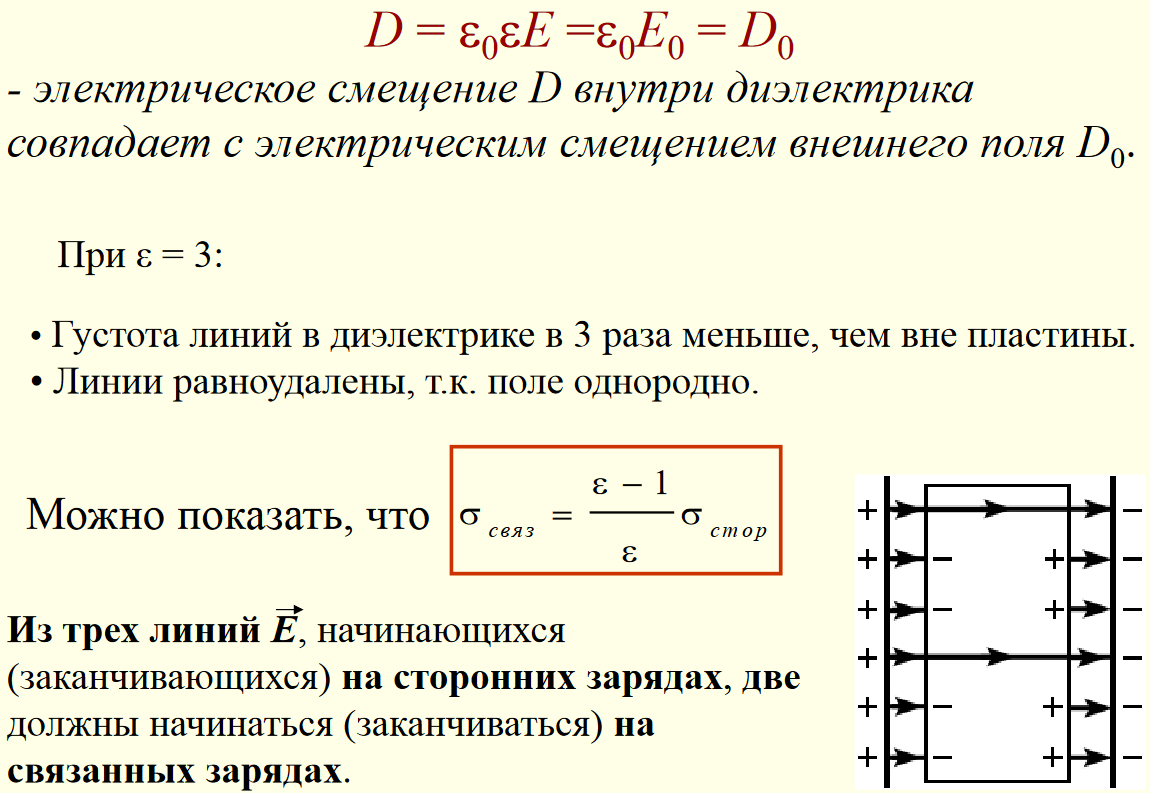
ε показывает во сколько раз поле ослабляется в диэлектрике











1. **Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости.**

Пусть среда имеет конечную проводимость IMG_256и сторонние токи отсутствуют IMG_257. Учтем, что IMG_258и IMG_259. Тогда в комплексной форме первое уравнение Максвелла запишется в виде

IMG_260.

Вводя обозначение

IMG_261,

получим

IMG_262.

Как видно, величина IMG_263по тому месту, которое она занимает в уравнении, может рассматриваться в качестве диэлектрической проницаемости. Это так называемая комплексная абсолютная диэлектрическая проницаемость. Она зависит от проводимости среды, ее диэлектрической проницаемости и частоты. Преобразуем выражение для нее к виду

IMG_264.

Комплексная диэлектрическая проницаемость также часто обозначается в виде эпсилон с тильдой: IMG_265.

Значение реальной части комплексной диэлектрической проницаемости говорит об интенсивности процесса поляризации, в то время как мнимая часть характеризует плотность токов проводимости.

Отношение реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости равно отношению амплитуд плотностей тока смещения и тока проводимости и называется тангенсом угла электрических потерь. Комплексные амплитуды векторов плотности тока проводимости и плотности тока смещения равны соответственно IMG_266и IMG_267, тогда

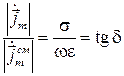
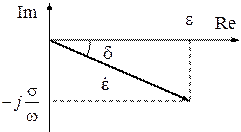
 

Рисунок 39 − Комплексная диэлектрическая проницаемость

Чем больше этот угол, тем большая часть электромагнитной энергии рассеивается в виде тепла.

Тангенс угла потерь определяет свойства среды в гармоническом электромагнитном поле и является критерием деления сред на проводники и диэлектрики:

1. IMG_270, т.е. IMG_271− среда хорошо проводящая

2. IMG_272, т.е. IMG_273− среда близка к диэлектрику

3. IMG_274, т.е. IMG_275−среда полупроводящая.

В силу частотной зависимости тангенса угла потерь, одна и та же среда на разных частотах может быть хорошо проводящей, полупроводящей и слабопроводящей (диэлектриком). С увеличением частоты все среды приобретают свойства диэлектрика. Металлы во всем диапазоне радиотехнических частот ведут себя как проводники.

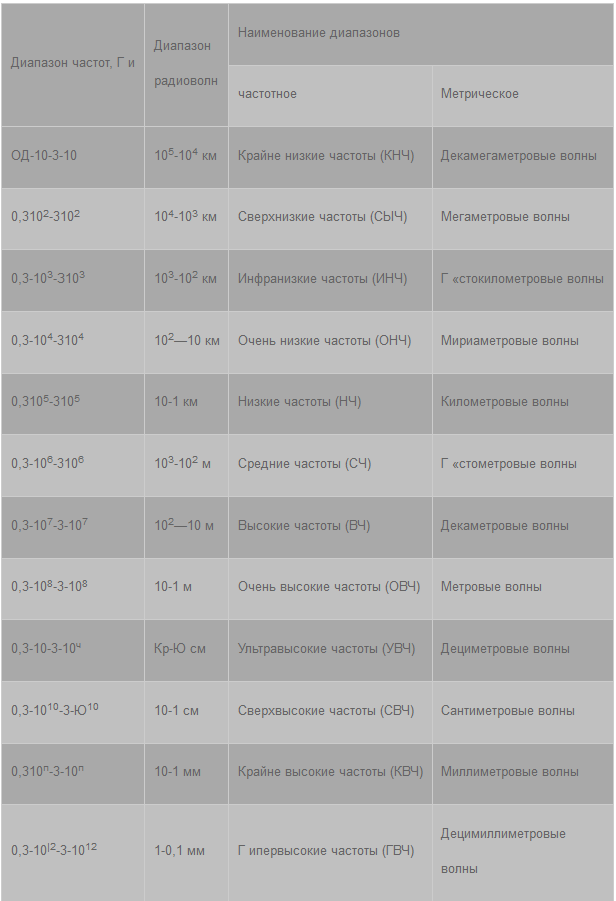
1. **Классификация электромагнитных полей.**

Электромагнитное поле (ЭМП) представляет собой особый вид материи. Оно характеризуется четырьмя векторными величинами: Е - напряженностью электрического поля, D - электрической индукцией, Н - напряженностью магнитного поля, В - магнитной индукцией. Основными характеристиками ЭМП являются следующие: **период и частота.**

IMG_256

IMG_257

Угловая частота имеет размерность рад/с. ЭМП с частотой, равной нулю, называются статическими полями (электростатическими и магнитостатическими).



Наряду с «радиотехнической» шкалой в электротехнике находит применение упрощенная шкала ЭМП, предложенная Международной электротехнической комиссией (МЭК):

— низкочастотные (НЧ) от 0 до 60 Г ц;

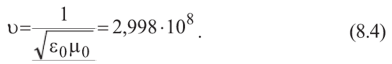
— среднечастотные (СЧ) от 60 Гц до 10 кГц;

— высокочастотные (ВЧ) от 10 кГц до 300 МГц;

— сверхвысокочастотные (СВЧ) от 300 МГц до 300 ГГц.

**Скорость и длина волны.** Скорость (ц, м/с) распространения электромагнитной волны определяется свойствами среды:

IMG_256



IMG_258

**Зоны воздействия.** У переменных ЭМП различают ближнюю и дальнюю зоны воздействия.

**Интенсивность.** В гигиенической практике интенсивность ЭМП в диапазоне частот 0 Гц - 300 МГц характеризуется следующими величинами:

— Е — среднеквадратическим значением напряженности электрического поля, выражаемой в вольтах на метр (В/м).

— Н— среднеквадратическим значением напряженности магнитного поля, имеющей размерность амперы на метр (А/м).

Для поля в вакууме справедливо соотношение:

IMG_256

IMG_257

где Z0 - волновое сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

**По энергетическому спектру** различают ЭМП:

— синусоидальные (монохроматические);

— модулированные;

— импульсные;

— флуктуационные (шумовые).

**По виду источника** принято разделять ЭМП от естественных источников (земных и внеземных) и ЭМП от искусственных (антропогенных) источников.

**По видам воздействия** различают ЭМП:

— изолированное (от одного источника);

— сочетанное (от двух и более источников одного частотного диапазона);

— смешанное (от двух и более источников различных частотных диапазонов);

— комбинированное (в случае одновременного действия какого- либо другого неблагоприятного фактора).

**По времени облучение** может быть постоянным и прерывистым.

1. **Классификация электромагнитных волн.**

Наряду с «радиотехнической» шкалой в электротехнике находит применение упрощенная шкала ЭМП, предложенная Международной электротехнической комиссией (МЭК):

— низкочастотные (НЧ) от 0 до 60 Г ц;

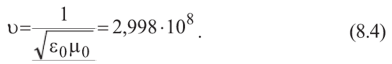
— среднечастотные (СЧ) от 60 Гц до 10 кГц;

— высокочастотные (ВЧ) от 10 кГц до 300 МГц;

— сверхвысокочастотные (СВЧ) от 300 МГц до 300 ГГц.

**Скорость и длина волны.** Скорость (ц, м/с) распространения электромагнитной волны определяется свойствами среды:

IMG_256



IMG_258

**Зоны воздействия.** У переменных ЭМП различают ближнюю и дальнюю зоны воздействия.

**Интенсивность.** В гигиенической практике интенсивность ЭМП в диапазоне частот 0 Гц - 300 МГц характеризуется следующими величинами:

— Е — среднеквадратическим значением напряженности электрического поля, выражаемой в вольтах на метр (В/м).

— Н— среднеквадратическим значением напряженности магнитного поля, имеющей размерность амперы на метр (А/м).

Для поля в вакууме справедливо соотношение:

IMG_256

IMG_257

где Z0 - волновое сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

**По энергетическому спектру** различают ЭМП:

— синусоидальные (монохроматические);

— модулированные;

— импульсные;

— флуктуационные (шумовые).

**По виду источника** принято разделять ЭМП от естественных источников (земных и внеземных) и ЭМП от искусственных (антропогенных) источников.

**По видам воздействия** различают ЭМП:

— изолированное (от одного источника);

— сочетанное (от двух и более источников одного частотного диапазона);

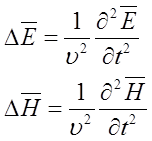
— смешанное (от двух и более источников различных частотных диапазонов);

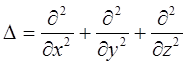
— комбинированное (в случае одновременного действия какого- либо другого неблагоприятного фактора).

**По времени облучение** может быть постоянным и прерывистым.

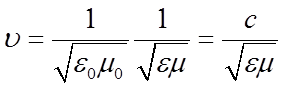
1. **Волновые уравнения для напряженностей поля.**

Существование электромагнитных волн – переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью, следовало из уравнений Максвелла. В однородной и изотропной среде, не поглощающей энергию, вдали от зарядов и токов, создающих электромагнитное поле, векторы напряженностей IMG_256и IMG_257переменного электромагнитного пол удовлетворяют так называемому волновому уравнению:

(1)

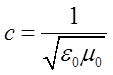
Где - оператор Лапласа; IMG_260- фазовая скорость.

Всякая функция, удовлетворяющая уравнениям (1), описывает некоторую волну. Следовательно, электромагнитные поля действительно могут существовать в виде электромагнитных волн. Фазовая скорость электромагнитных волн определяется выражением

(2)

Где IMG_262- соответственно электрическая и магнитная постоянные;

IMG_263-соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды;

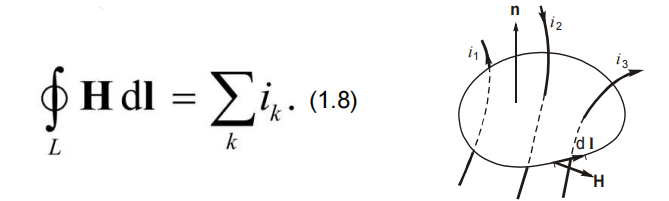
- скорость электромагнитных волн в вакууме.

Совпадение размерного коэффициента в (2) со скоростью распространения света в вакууме указывает на глубокую связь между электромагнитными и оптическими явлениями, позволившую Максвеллу создать электромагнитную теорию света, согласно которой свет представляет собой электромагнитные волны.

1. **Интегральные уравнения электромагнитного поля.**

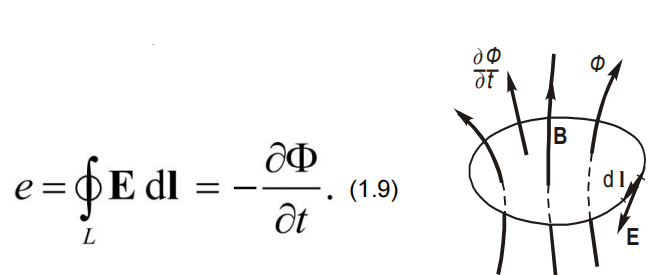
В основу уравнений электромагнитного поля легли следующие экспериментально установленные законы и факты.

**1. Закон о возбуждении магнитного поля** — закон Ампера



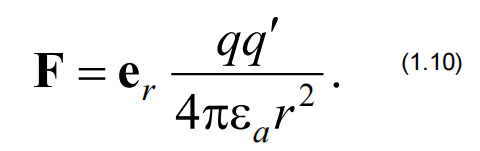
Циркуляция напряженности магнитного поля равна алгебраической сумме токов, охватываемых контуром (рис. 1.1). Этот закон указывает, что причиной существования магнитного поля является ток.

**2. Закон электромагнитной индукции** — закон Фарадея



Наводимая в контуре ЭДС, равная циркуляции напряженности электрического поля E вдоль всего контура проводника L, равна изменению во времени потока магнитной индукции Ф (Вб) через площадь, ограниченную этим контуром (рис. 1.2). Это означает, что причиной создания электрического поля (ЭДС) является изменение магнитного потока во времени.

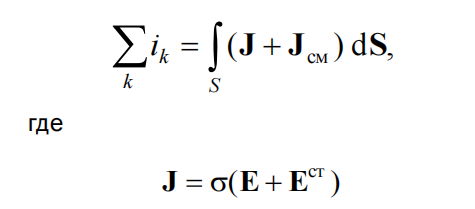
**3. Закон взаимодействия электрических зарядов** — закон Кулона



Между двумя покоящимися зарядами действует сила, прямо пропорциональная произведению зарядов и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. Эта сила направлена от одного заряда к другому.

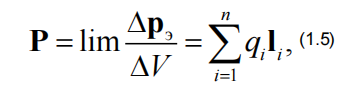
**4. Отсутствие магнитных зарядов**, аналогичных электрическим.

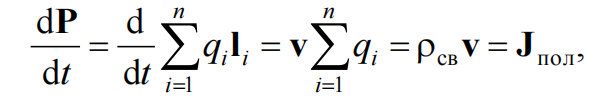
Правую часть уравнения закона Ампера (1.8) можно представить в виде



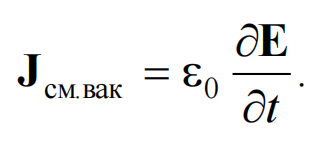
– плотность тока проводимости, обусловленного движением свободных зарядов;

Jсм – плотность тока смещения, обусловленного изменением электрического поля.Изменение электрического момента единицы объема, т. е. изменение вектора поляризации, согласно (1.5) определяется выражением

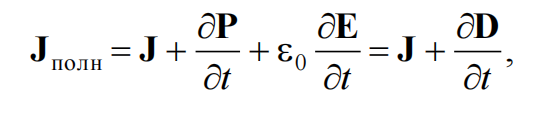




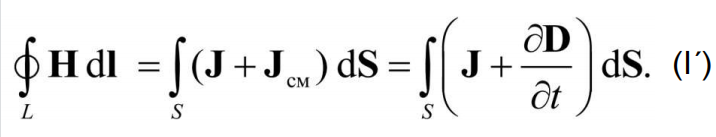
где (ро)св – объемная плотность одноименных связанных смещающихся зарядов; Jпол – плотность тока поляризации. Ток смещения в вакууме определяется выражением



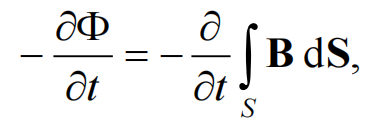
Полный ток, создающий магнитное поле



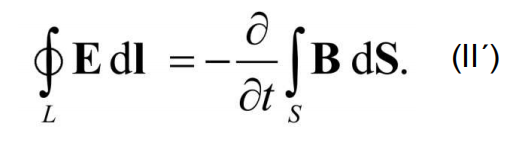
и первое интегральное уравнение электромагнитного поля имеет вид



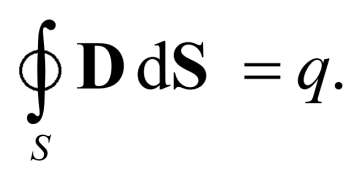
Представим правую часть уравнения в законе электромагнитной индукции (1.9) в виде



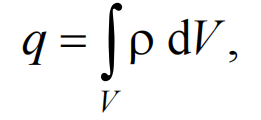
и получим второе интегральное уравнение электромагнитного поля



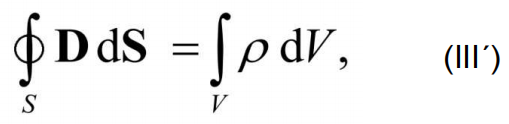
Определяя поток электрической индукции через поверхность сферы радиуса r, получим



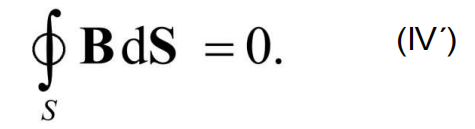
В общем случае



где (ро) — объемная плотность заряда (Кл/м3 ). С учетом этого получим третье интегральное уравнение электромагнитного поля



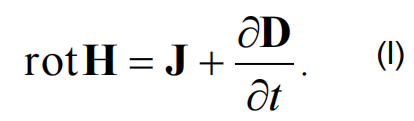
представляющее известную теорему Гаусса: поток вектора электрической индукции D через замкнутую поверхность S равен величине заряда q, расположенного в объеме V, ограниченном этой поверхностью. Это уравнение является обобщением опытного факта о прерывности электрических силовых линий на поверхности зарядов. Обобщая опытный факт об отсутствии магнитных зарядов, аналогичных электрическим, получим четвертое интегральное уравнение электромагнитного поля



1. **Дифференциальные уравнения электромагнитного поля.**

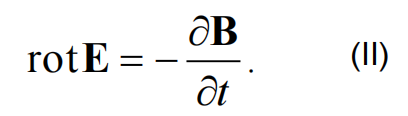
Эти уравнения применимы к более широкому диапазону волн. Однако они не пригодны для описания электромагнитных процессов на частотах, соответствующих волнам, длина которых λ сравнима с расстоянием между элементарными частицами вещества d.

**Первое дифференциальное уравнение** электромагнитного поля получается из первого интегрального уравнения (I´) путем применения теоремы Стокса и приравнивания подынтегральных выражений



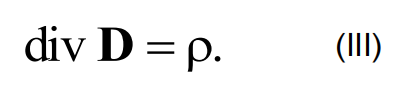
Из этого уравнения следует, что вихревое магнитное поле связано с наличием токов проводимости и смещения.

**Второе дифференциальное уравнение** получается аналогично первому из второго интегрального уравнения (II´)



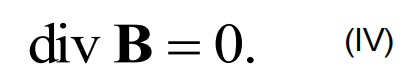
Отсюда следует, что вихревое электрическое поле связано с изменением во времени магнитной индукции. Из уравнений (I) и (II) следует возможность распространения электромагнитных волн вдали от проводников с током, так как электрическое и магнитное поля могут существовать, взаимно возбуждая друг друга.

**Третье дифференциальное уравнение** получается из третьего интегрального уравнения (III´) путем применения теоремы Остроградского–Гаусса и приравнивания подынтегральных выражений



Из этого уравнения следует, что электрическое поле кроме вихревой компоненты может иметь и потенциальную, определяемую электрическими зарядами.

**Четвертое дифференциальное уравнение** получается аналогично предыдущему из четвертого интегрального уравнения (IV´)



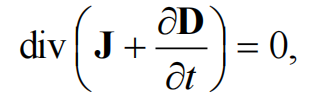
Из этого уравнения следует, что нет магнитных зарядов, аналогичных электрическим.

Четыре уравнения Максвелла в дифференциальной форме представляют пространственно-временное описание электромагнитного процесса. Однако этих уравнений еще недостаточно для решения задач, так как они не учитывают свойств среды, которые задаются зависимостью векторов D, J и B от E и H.

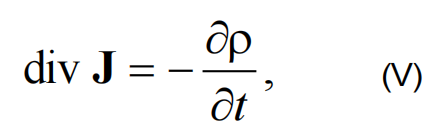
1. **Уравнения непрерывности в интегральной и дифференциальной форме.**

Из первого уравнения Максвелла в дифференциальной форме (I), применяя к нему операцию дивергенции, с учетом формулы

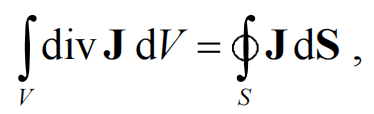
 получим



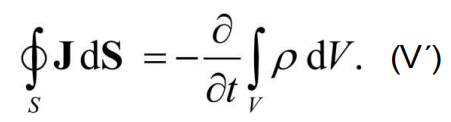
т. е. линии полного тока должны быть замкнуты. Если контур тока проходит через проводники, диэлектрики или вакуум, то ток проводимости, протекающий в проводниках, замыкается на токсмещения в вакууме и диэлектрике.Учитывая (III) и поменяв местами операции div и получим пятое дифференциальное уравнение



выражающее закон сохранения заряда и называемое уравнением непрерывности.Интегрируя по объему V и применяя теорему Остроградского-Гаусса



получим этот закон в интегральной форме



Ток через замкнутую поверхность равен убыли заряда в объеме, ограниченном этой поверхностью.

1. **Волновые уравнения для электромагнитных потенциалов поля.**
2. **Решения уравнений для запаздывающих потенциалов.**
3. **Теорема единственности решений уравнений Максвелла.**
4. **Граничные условия для нормальных составляющих электромагнитного поля.**
5. **Граничные условия для тангенциальных составляющих электромагнитного поля.**
6. **Граничные условия Леонтовича.**
7. **Теорема Умова-Пойнтинга.**
8. **Вектор Пойнтинга. Баланс энергии.**
9. **Комплексная теорема Умова - Пойнтинга**
10. **Электрический резонанс.**
11. **Излучение электрического диполя Герца. Вывод общих выражений для напряженностей электрического и магнитного полей.**
12. **Излучение электрического диполя Герца. Диаграмма излучения.**
13. **Излучение электрического диполя Герца. Особенности полей ближней и дальней зон.**
14. **Фазовая и групповая скорости электромагнитной волны.**
15. **Поляризация электромагнитных волн.**
16. **Распространение плоской электромагнитной волны в безграничной изотропной среде с потерями. Дисперсия.**
17. **Распространение плоской электромагнитной волны в безграничной изотопной среде без потерь.**
18. **Распространение плоской электромагнитной волны в анизотропной ферромагнитной среде при продольном подмагничивании. Вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея).**
19. **Распространение электромагнитной волны в анизотропной ферромагнитной среде при поперечном подмагничивании. Двойное лучепреломление (Эффект Коттона-Мутона).**
20. **Распространение электромагнитной волны в изотропной плазме.**
21. **Распространение электромагнитной волны в плазме с продольным подмагничиванием.**
22. **Распространение электромагнитной волны в плазме с поперечным подмагничиванием.**
23. **Переход электромагнитной волны через плоскопараллельную диэлектрическую пластину.**
24. **Нормальное падение на границу раздела двух сред. Коэффициент стоячей волны.**
25. **Наклонное падение на границу раздела двух сред без потерь.**
26. **Формулы Френеля для горизонтально-поляризованной волны.**
27. **Формулы Френеля для вертикально-поляризованной волны.**
28. **Полное прохождение электромагнитной волны при наклонном падении на границу раздела сред без потерь. Угол Брюстера.**
29. **Полное отражение от границы раздела двух диэлектрических сред.**
30. **Нормальное падение электромагнитного поля на движущуюся плоскость раздела. Эффект Доплера.**
31. **Направляющие системы.**
32. **Концепция парциальных волн.**
33. **Волны типов Е, Н и Т.**
34. **Основные свойства направляемых электромагнитных волн.**
35. **Распространение волны типа Е в прямоугольном волноводе.**
36. **Распространение волны типа Н в прямоугольном волноводе.**
37. **Волна Н10 в прямоугольном металлическом волноводе.**
38. **Распространение волны типа Н в круглом металлическом волноводе.**
39. **Распространение волны типа Е в круглом металлическом волноводе.**
40. **Волна Н11 в круглом металлическом волноводе.**
41. **Коаксиальный волновод. Характеристики волны основного типа.**
42. **Микрополосковые линии передачи. Характеристики волны основного типа.**
43. **Линии передачи с волной типа Т. Основные характеристики.**
44. **Распространение электромагнитной волны в диэлектрическом волноводе.**
45. **Потери в волноводах.**
46. **Поверхностные волны и замедляющие структуры.**
47. **Поверхностный эффект.**
48. **Четвертьволновый трансформатор.**