

Тема 11. Электрическое поле

1. Основные положения электростатики

Электродинамика - это раздел физики, в котором изучают свойства и закономерности электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между заряженными телами и частицами.

Электростатика - это раздел электродинамики, в котором изучают свойства и закономерности электрического поля, осуществляющего взаимодействие между *неподвижными* заряженными телами и частицами.

Электрический заряд - это физическая величина, которая определяет свойства и закономерности всех электрических взаимодействий.

Существует **два рода электрических зарядов**: **+** и **-**; одноименные заряды отталкиваются, разноименные - притягиваются.

Силы электрического взаимодействия - наиболее мощные из всех сил, действующих *между физическими телами*.

Электрический заряд дискретен, т.е. его можно делить на части; однако в природе существует наименьший (неделимый) заряд; его называют *элементарным* зарядом.

Электрический заряд не может существовать сам по себе. Он является неотъемлемым свойством элементарных частиц. Не может быть заряда без частицы, но может быть частица без заряда (нейтральная частица).

В обычном состоянии большинство атомов - электрически нейтральны, т.к. число электронов (**-** заряд) = числу протонов (**+** заряд) в ядре. Атом с недостатком электронов становится **+** ионом, атом с избытком электронов становится **-** ионом.

При соприкосновении физических тел может происходить электризация. Электризация - это перераспределение электрического заряда между физическими телами. При электризации с тела, имеющего больший отрицательный заряд, электроны (наиболее легкие, заряженные отрицательно) перемещаются на тело с меньшим отрицательным зарядом. Наибольшая электризация происходит при трении.

Если несколько тел составляют *замкнутую* систему, то при электризации этих тел (перераспределении электрических зарядов), их общий (суммарный) заряд остается постоянным:

The image shows handwritten mathematical formulas on a grid background. The first formula is $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$. Below it, the word "или" (or) is written. The second formula is a summation: $\sum_{i=1}^n q_i = \text{const}$. Below the formulas, the text "Закон сохр. электр. заряда" is written in red. At the bottom, it says "q (лат 'кю') - обознач. эл. заряда".

Закон сохранения электрического заряда также важен и также выполняется при любых обстоятельствах, как и закон сохранения энергии.

2. Взаимодействие заряженных тел

Основной закон электростатики был установлен опытным путем французским физиком Шарлем Кулоном в 1785 г. Для определения силы взаимодействия между заряженными телами он использовал крутильные весы собственной конструкции. Меняя заряды подвешенных в весах шариков, равномерно разделяя заряды между шариками, он измерял расстояние и силу взаимодействия по углу закручивания нити в весах. Сила упругости закрученной нити, в соответствии с III законом Ньютона, была равна силе взаимодействия заряженных тел. На основе многочисленных опытов Кулон пришел к выводу, что:

The image shows a handwritten formula: $F_{\text{взаимос.}} \sim \frac{q_1 \times q_2}{r}$. The text "взаимос." is written below the F.

→ сила взаимодействия заряженных тел прямо пропорциональна произведению зарядов (без учета знака) и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Шарль Кулон проделал тысячи опытов, прежде чем получил точное выражение нового (для того времени) закона:

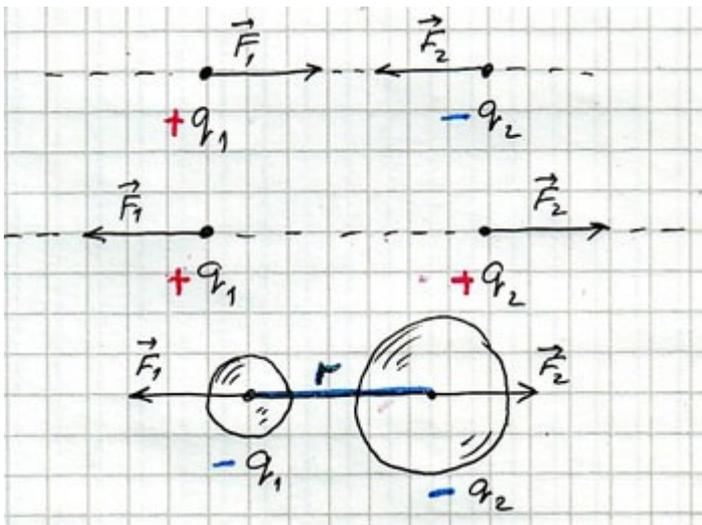
$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{Закон Кулона}$$

k - коэффициент пропорциональности

Читается: сила взаимодействия двух неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Сила направлена вдоль прямой, соединяющей тела.

Закон Кулона выполняется, если:

- заряженные тела - материальные точки;
- заряженные тела имеют сферическую форму (тогда в формулу подставляют расстояние между их центрами).



$$[q] - 1 \text{ Кл (Кулон)}$$

В системе "СИ" единица электрического заряда:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Коэффициент пропорциональности

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Элементарный заряд

Таким зарядом со знаком "-" обладает электрон, а протон имеет точно такой же заряд со знаком "+".

3. Электрическое поле и его свойства

Заряженные тела взаимодействуют через пространство, в котором может быть какое-либо вещество, а может и не быть - вакуум. В XVIII веке в физике появились две теории взаимодействия физических тел. Это была первая попытка объяснить любое взаимодействие (не только электрическое).

Теория дальнодействия: любое взаимодействие между телами осуществляется мгновенно на любом расстоянии и без помощи чего-либо. Эта теория подтверждалась опытами и законами, установленными Ньютоном, Кулоном, Ампером. Она считалась единственно верной вплоть до середины XIX века.

Теория близкодействия: любое взаимодействие между телами осуществляется с помощью чего-либо, что передает это взаимодействие. Скорость передачи взаимодействий - конечна.

В XIX веке Фарадей, а затем Максвелл доказали, что любое взаимодействие, в том числе электрическое, передается:

- с конечной скоростью, а не мгновенно;
- с помощью особого изменения окружающей среды - пространства.

Вокруг заряженных тел пространство меняет свои свойства => возникает так называемое **электрическое поле** (далее - ЭП) - особый вид материи. **ЭП создается только заряженными телами и действует только на заряженные тела.** Скорость распространения ЭП (а значит, и электрических взаимодействий) в пространстве очень велика, но все-таки конечна. Для вакуума она равна скорости света $c = 300\,000 \text{ км/с}$. Любая физическая среда (воздух, вода и т.п.) ослабляет электрическое взаимодействие => соответственно

уменьшает скорость передачи взаимодействия:

Коэфф-т ослабления ϵ (греч. "эпсилон")
 закон Кулона для физич. среды

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

ϵ - для каждого вещ-ва разное (взгляды).
 для вакуума $\epsilon = 1$

4. Напряженность ЭП

Пусть в пространстве имеется неподвижный электрический заряд q , который создает ЭП - для определенности.

Будем:

- а) поочередно вносить в это ЭП пробные заряды: $q_1, q_2, q_3, \dots, q_i$ на некоторое определенное расстояние r ;
- б) измерять силы, действующие на эти пробные заряды со стороны ЭП: $F_1, F_2, F_3, \dots, F_i$;
- в) возьмем отношения каждой силы к соответствующему заряду: $F_1/q_1, F_2/q_2, F_3/q_3, \dots, F_i/q_i$.

Мы увидим, что все эти соотношения равны между собой (для данного r): $F_1/q_1 = F_2/q_2 = F_3/q_3 = \dots = F_i/q_i$. Аналогичную операцию можно проделать для других расстояний, но результат будет тот же => отношение силы, действующей на заряд в ЭП, к величине этого заряда можно считать *характеристикой* данного ЭП. Такая величина, характеризующая ЭП, называется *напряженностью*.

Напряженность ЭП - это физическая величина, равная отношения силы действующей на заряд, к величине этого заряда:

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

$[E] = 1 \frac{Н}{Кл}$ - эта единица используется РЕДКО

Напряженность ЭП - это *векторная* величина, направление которой совпадает с направлением силы, действующей на заряд.

Напряженность ЭП точечного заряда вычисляется просто: нужно силу взаимодействия (закон Кулона) поделить на величину вносимого заряда:

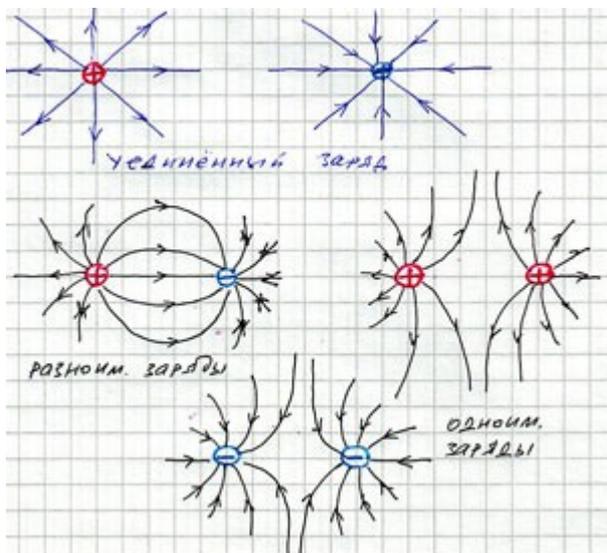
$$E = \frac{F}{q_i} \Rightarrow E = k \frac{q q_i}{\epsilon r^2 q_i} \Rightarrow E = k \frac{q}{\epsilon r^2}$$

для вакуума $E = k \frac{q}{r^2}$

ЭП принято изображать с помощью линий напряженности (или силовых линий), которые расположены таким образом, что вектор напряженности (или силы) направлен по касательной в каждой точке линии.

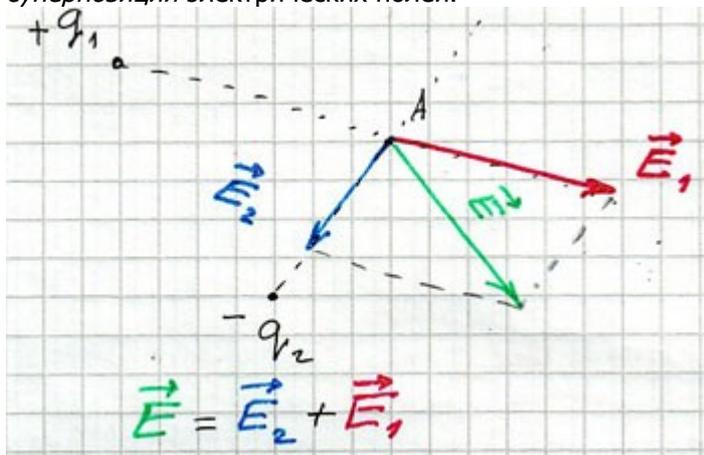
линии напряженности ЭП (силовыи линии ЭП)

Кроме того, линии напряженности начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Вот несколько примеров конфигураций ЭП, построенных с помощью линий напряженности:



Особый случай - ЭП двух параллельных плоскостей. Линии напряженности между такими плоскостями будут располагаться строго параллельно друг другу. Такое ЭП называют *однородным*. Именно однородное ЭП мы будем рассматривать в дальнейшем, поскольку его математическое описание довольно простое.

Если ЭП создается несколькими зарядами, а требуется найти напряженность в данной точке, то векторы напряженности ЭП каждого заряда нужно просто сложить и найти результирующий вектор напряженности (аналогично нескольким силам, действующим на тело, см. Тема 3, п.2). Это называется *принципом суперпозиции* электрических полей.

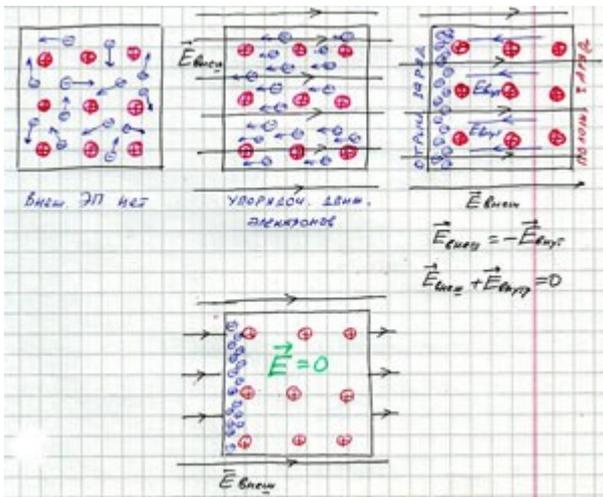


5. Проводники в ЭП

Рассмотрим, что происходит в проводнике, если его поместить в ЭП.

К проводникам относятся все металлы, некоторые жидкости и газы в особом состоянии - т.е. проводником может быть вещество в любом агрегатном состоянии. Основное свойство проводников - это наличие свободных носителей заряда. В металлах таковыми являются электроны, в жидкостях - ионы, в газах - ионы и электроны.

Для определенности рассмотрим фрагмент металла. Если нет внешнего ЭП, то свободные электроны движутся в металле хаотично между положительными ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Эти свободные электроны образуют так называемый электронный газ. Если же кусок металла поместить во внешнее ЭП, то электроны начнут двигаться упорядоченно в сторону, противоположную направлению ЭП. Это движение продлится недолго, и же в следующий момент они сгруппируются на одной из граней, создав, таким образом, отрицательный заряд на этой грани. С противоположной стороны останутся положительные ионы => там возникнет такой же по величине, но положительный заряд. Между этими гранями куска металла возникнет внутреннее ЭП, направленное против внешнего, причем величина его будет такова, что оно полностью компенсирует внешнее ЭП. Это значит, что внутри металла суммарная напряженность ЭП будет равна нулю!



Говорят, что металл экранирует ЭП. Для экранировки не обязательно нужен сплошной кусок металла. Достаточно тонких металлических листов и даже сетки - все равно внешнее ЭП будет полностью экранировано. Это свойство металлов используют для защиты от электрических полей.

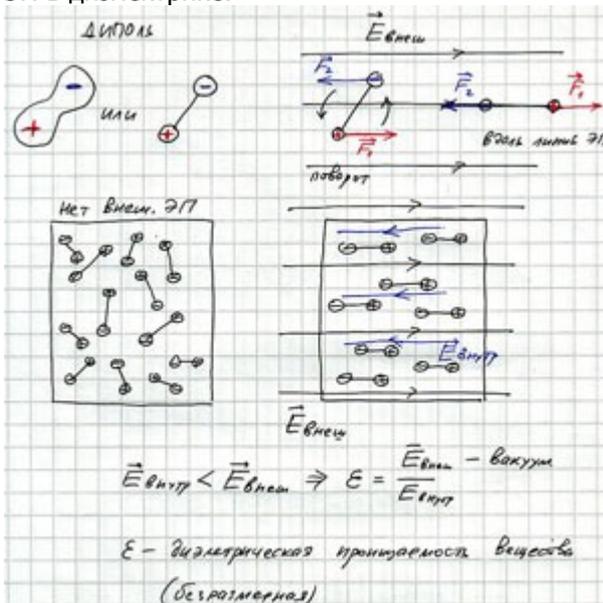
6. Диэлектрики в ЭП

Рассмотрим, что происходит в диэлектрике (непроводнике), если его поместить в ЭП.

К диэлектрикам относятся многие неорганические и органические вещества, газы в обычном состоянии, различные жидкости, в том числе дистиллированная вода. Основным признаком диэлектриков - это полное или почти полное отсутствие свободных носителей заряда. Поскольку диэлектрики гораздо многообразнее по своей природе и структуре, чем проводники, следует знать, что они бывают двух типов:

- неполярные** - это такие, в молекулах которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают;
- полярные** - это такие, в молекулах которых центры положительных и отрицательных зарядов НЕ совпадают.

Рассмотрим полярные диэлектрики. Молекулу такого диэлектрика можно представить в виде гантели, где на полюсах находятся центры положительных и отрицательных зарядов, жестко связанные между собой. Такую молекулу называют **диполем**. Если на диэлектрик не действует внешнее ЭП, то его диполи ориентированы хаотично. Под действием ЭП на каждый диполь будет действовать пара сил, создавая два вращающих момента (точно так мы действуем руками на руль) => каждая молекула станет разворачиваться до тех пор, пока не расположится параллельно линиям напряженности внешнего ЭП (моменты сил станут равными нулю). Таким образом, под действием внешнего ЭП произойдет *переориентация* (а не перемещение!) полярных молекул - ПОЛЯРИЗАЦИЯ диэлектрика => они создадут внутреннее ЭП, которое будет гораздо слабее внешнего и направлено против него => произойдет *частичное* ослабление внешнего ЭП в диэлектрике.



Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз ЭП ослабляется внутри диэлектрика по сравнению с вакуумом.

7. Работа ЭП

ЭП действует только на заряженные тела → ЭП может совершать работу по перемещению заряженных тел или частиц.

Пусть в однородном ЭП точечный заряд перемещается из точки **A** в точку **B** по криволинейной траектории. Нужно найти работу ЭП. Для этого применим тот же метод, что и при нахождении работы силы тяжести (см. Тема 6, п. 3): заменим криволинейную траекторию ступенчатой. Работа на вертикальных участках ступенек также будет равна нулю, а сумма длин горизонтальных ступенек даст отрезок **AC** - проекцию траектории на линии напряженности ЭП. Если из точки **C** перемещать заряд в точку **B**, то на участке **BC** работа будет равна нулю. Следовательно, перемещение по криволинейной траектории равноценно даже не многоступенчатой ломаной, а движению по двум отрезкам **AC** и **CB**.

Вывод №1: работа в ЭП не зависит от формы траектории, а зависит от длины ее проекции на линии напряженности.

Если далее переместить заряд в точку **D**, а потом - в исходную точку **A**, то общая работа **ACBDA** будет

$$\left. \begin{array}{l} A_{ACB} > 0 \\ A_{BDA} < 0 \end{array} \right\} A_{ACB} = A_{BDA} \Rightarrow A_{ACB} - A_{BDA} = 0$$

или $A_{\text{замкн. траектории}} = 0$ - работа по замкн. траектории

равна нулю!

Вывод №2: работа в ЭП по замкнутой траектории равна нулю.

Энергетические поля, в которых выполняются эти два условия, называются **потенциальными**.

8. Потенциал и напряжение

Работа по перемещению заряда в ЭП не зависит от формы траектории => как в механике

$$A = -\Delta E_{\text{п}} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) \quad \text{и} \quad A = qEd \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{\text{п}} = qEd \quad \text{— пот. энергия ЭП}$$

$$\frac{E_{\text{п}}}{q} = Ed = \varphi \quad (\text{греч. "фи", потенциал ЭП}) \Rightarrow \varphi = \frac{E_{\text{п}}}{q}$$

Отношение φ и $E_{\text{п}} = q\varphi$ определяется через потенциальную энергию.

называется **потенциалом ЭП**, т.к.

Практическое значение имеет **разность потенциалов**:

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}), \text{ но } E_n = q\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = -q\varphi_2 + q\varphi_1 \Rightarrow A = q \underbrace{(\varphi_1 - \varphi_2)}_{\text{разность потенциалов}}$$

Принято обозначать $U = \varphi_1 - \varphi_2$, где U - напряжение \Rightarrow

$$\Rightarrow U = \frac{A}{q}$$

В итоге: **напряжение** равно работе по перемещению зарядов в ЭП.
Установим связь между напряжением и напряженностью:

$$\left. \begin{array}{l} A = qEd \\ U = \frac{A}{q} \end{array} \right\} \Rightarrow U = Ed \Rightarrow \boxed{E = \frac{U}{d}}$$

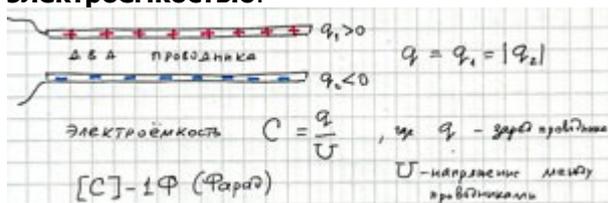
$[U] - 1В$ (Вольт)

$[E] - 1 \frac{В}{м}$ (Вольт/метр) - стандартная единица напряженности в 'СИ'

9. Конденсатор

При электризации (например, трении пластмассовой палочки о ткань) создается впечатление, что электрический заряд накапливает одно тело (в данном случае - палочка), но это не так. В соответствии с законом сохранения электрического заряда, накопление заряда происходит на двух телах (по крайней мере!), участвующих в электризации. Таким образом, чтобы произошло *накопление* электрического заряда, необходима *система тел*, состоящая, по крайней мере, из двух тел.

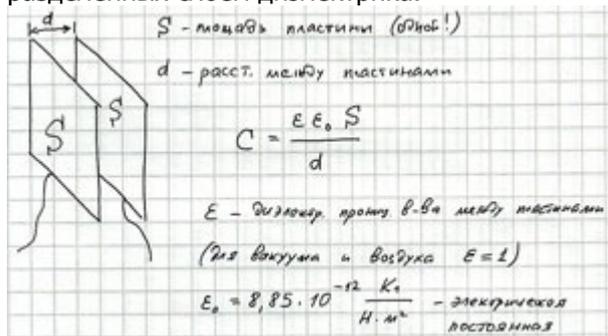
Величина, характеризующая способность физического тела накапливать электрический заряд, называется **электроёмкостью**.



ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ $C = \frac{q}{U}$, где q - заряд проводника
 $[C] - 1Ф$ (Фарад) U - напряжение между проводниками

Устройство для накопления электрического заряда называется конденсатор. Существует довольно много различных типов (конденсаторы постоянной емкости, переменной емкости, электролитические конденсаторы) и конструкций конденсаторов.

Рассмотрим простейший *плоский* конденсатор, Он состоит из двух плоских металлических пластин, разделенных слоем диэлектрика.



S - площадь пластины (одной!)

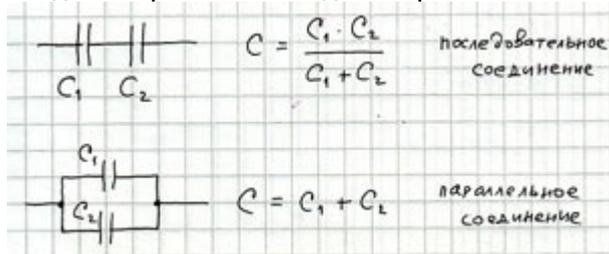
d - расст. между пластинами

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

ϵ - диэлектрик, промежу. в-ва между пластинами
(из вакуума и воздуха $\epsilon = 1$)

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл}{Н \cdot м^2}$ - электрическая постоянная

В радиотехнике, электронике и электротехнике используют различные конденсаторы. Конденсаторы можно соединять различными способами, при этом их общая емкость будет различной:



Контрольные вопросы:

1. Что называют электростатикой?
2. Что такое «электрический заряд»?
3. Раскройте смысл понятия дискретности электрического заряда.
4. Может ли существовать электрический заряд без частицы?
5. Что такое «электризация»?
6. Запишите и прочитайте закон сохранения электрического заряда.
7. Запишите и прочитайте закон Кулона.
8. Когда, при каких условиях выполняется закон Кулона?
9. Запишите единицу измерения электрического заряда.
10. Какова величина элементарного заряда?
11. Каковы заряды электрона и протона?
12. В чем суть теории дальнего действия?
13. В чем суть теории ближнего действия?
14. Что представляет собой ЭП?
15. Каково основное свойство ЭП?
16. Как влияет любая среда на электрические взаимодействия?
17. Что такое «напряженность ЭП»?
18. Запишите формулу напряженности ЭП по определению.
19. Запишите формулу напряженности ЭП точечного заряда.
20. Каким образом принято изображать ЭП графически?
21. Какое ЭП называют однородным?
22. В чем суть принципа суперпозиции электрических полей?
23. Какие вещества и почему относятся к проводникам?
24. Что происходит в проводнике, помещенном во внешнее ЭП?
25. Какие вещества и почему относятся к диэлектрикам?
26. Назовите типы диэлектриков. В чем их отличия?
27. Что происходит в диэлектрике, помещенном во внешнее ЭП?
28. Как вычислить работу по перемещению заряда в ЭП.
29. Зависит ли величина этой работы от формы траектории?
30. Чему равна работа ЭП, если заряд перемещать по замкнутой траектории?
31. Что называют потенциалом ЭП?
32. Что называют напряжением в ЭП?
33. Как связаны напряжение и напряженность ЭП?
34. Что такое «электроемкость»?
35. Как устроен простейший конденсатор?
36. Формула емкости плоского конденсатора.