



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

При расчете электрических полей необходимо определить потенциал точки поля как функцию координат, т.е. $\varphi=f_1(x,y,z)$. Но очень часто задача оказывается неразрешимой, так как неизвестен закон распределения плотности зарядов $\rho=f_2(x,y,z)$

Если известен потенциал φ , то можно определить величину напряженности поля в заданной точке

$$E = -\frac{\partial\varphi}{\partial n},$$

где $\frac{\partial\varphi}{\partial n} = \mathbf{grad} \varphi$ - величина, характеризующая скорость изменения потенциала в пространстве и называемая **градиентом потенциала**. Вектор градиента потенциала направлен по нормали к поверхности и определяет направление силовых линий поля. Поверхности равного потенциала называются **эквипотенциалами**.

Зная распределение потенциала в межэлектродном пространстве можно принимать конкретные меры по регулированию поля с целью получения наиболее рациональной конструкции, обеспечивающей равномерную нагрузку на изоляцию и минимальные габариты изделия.

При расчете и исследовании электрических полей используются аналитические, графоаналитические и экспериментальные методы.

Аналитические методы

Точные

(расчет электростатических полей)

Основаны на применении **теоремы Гаусса**:

$$\oint \bar{E} ds = \frac{q}{\epsilon_a},$$

где q - электрический заряд, ϵ_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость;

постулата Максвелла:

$$\oint \bar{D}_n ds = q,$$

где \bar{D}_n - нормальная составляющая потока вектора смещения;

Уравнений Пуассона и Лапласа:

$$\begin{cases} \Delta U = -\frac{\rho}{\epsilon_a}, \\ \Delta U = 0, \end{cases}$$

где ρ - плотность объемного заряда

Приближенные

Замена неизвестного поля близким по конфигурации известным.

Опыт инженерных расчетов показывает, что значение напряженности поля, определенное с погрешностью несколько процентов (10-15%), является достаточным. Приближенные методы - просты и удобны в обращении.

Примеры приближенных расчетов полей

Пример 1. Найти максимальную напряженность поля промежутка шар - плоскость (рисунок 1).

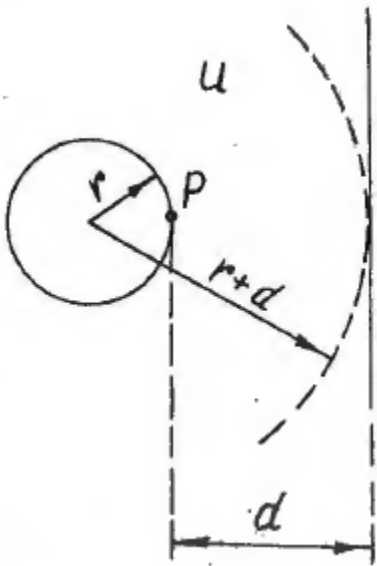


Рисунок 1 – К расчету поля промежутка шар - плоскость

Поле шар - плоскость с некоторым приближением можно заменить полем сферического конденсатора с радиусами сфер r и $r + d$.



(на основании того, что картина электрического поля вблизи точки P в обоих случаях практически одинакова, а изменение конфигурации второго (наружного) электрода при заданном потенциале и расстоянии не приводит к существенному изменению максимальной напряженности на внутреннем электроде).

Максимальная напряженность поля в точке P для электродов шар - против плоскости:

$$E_{\max} = k \frac{U \cdot R}{r(R - r)},$$

где $R = r + d$, k - коэффициент, учитывающий изменение поля шар-против плоскости по сравнению с полем сферического конденсатора ($k \approx 0,9$).

Пример 2. Найти максимальную напряженность поля промежутка цилиндр - цилиндр (рисунок 2).

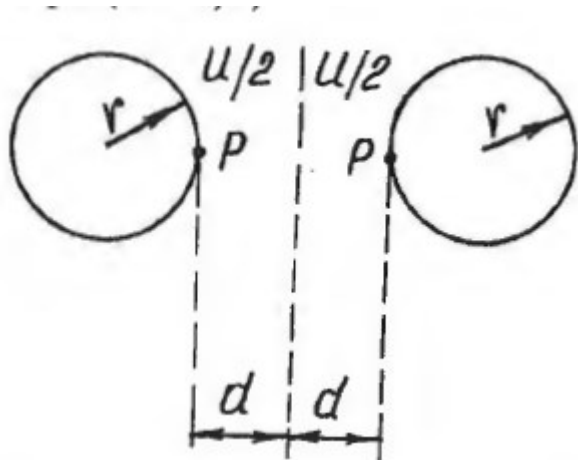


Рисунок 2 - К расчету поля промежутка цилиндр - цилиндр

Поле заданного промежутка - симметричное, поэтому решение задачи можно свести к определению максимальной напряженности поля в промежутке цилиндр - плоскость, к которому приложена разность потенциалов $U/2$. Тогда

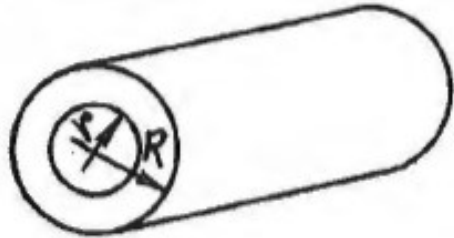
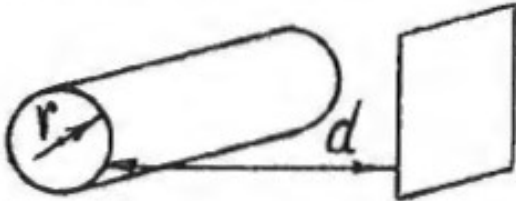
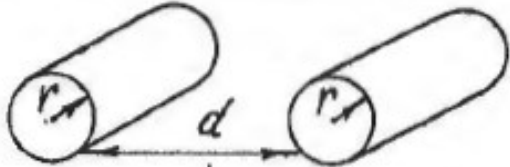
$$E_{\max} = k \frac{U}{2r \ln \frac{R}{r}},$$

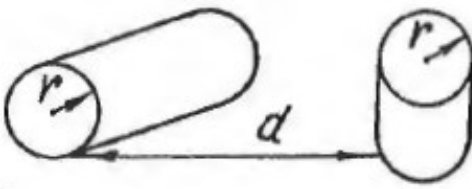
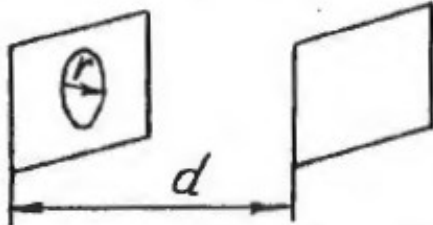
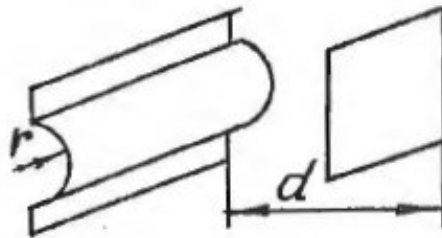
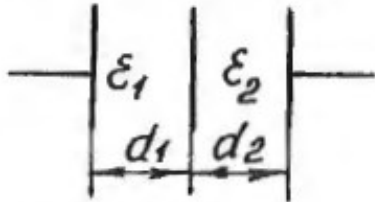
где $R = r + d$.

Напряженность поля в сильной мере зависит от качества обработки материала электродов. Наличие неровностей, шероховатостей, микровыступов может резко (до 200 и более раз) повысить максимальную напряженность поля в окрестности выступа по сравнению со средней напряженностью поля в промежутке.

Формулы для расчета максимальной напряженности поля, наиболее часто используемые в инженерных расчетах

Конфигурация поля	Эскиз	Формула для E_{\max}
1	2	3
Две плоскости		$E = \frac{U}{d}$
Две концентрические сферы		$E = \frac{U \cdot R}{r(R - r)}$
Шар против плоскости		$E = k \frac{U(r + d)}{r d}$
Шар против шара		$E = k \frac{U(r + 0,5 d)}{r d}$

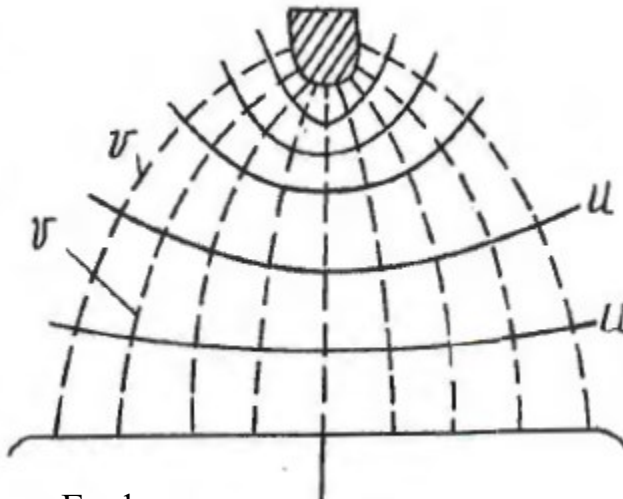
<p>Два коаксиальных цилиндра</p>		$E = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}$
<p>Цилиндр против плоскости</p>		$E = \frac{KU}{r \ln \frac{r+d}{r}}$
<p>Два параллельных цилиндра</p>		$E = k \frac{U}{2r \ln \frac{r+0,5d}{r}}$

1	2	3
<p>Два перекрещивающихся цилиндра</p>		$E = k \frac{U}{2r \ln \frac{r + 0,5d}{r}}$
<p>Полусфера на плоскости</p>		$E = \frac{3U}{d}; r_{сф} \ll d$
<p>Полуцилиндр на плоскости</p>		$E = \frac{2U}{d}; r_{ц} \ll d$
<p>Двухслойный диэлектрик</p>		$E_1 = \frac{U \epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}$ $E_2 = \frac{U \epsilon_1}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}$

Графаноаналитические методы

Суть метода - интуиции вычерчивается предполагаемая картина поля данной конструкции, которая затем шаг за шагом уточняется с помощью простых аналитических выражений.

При построении картины поля необходимо соблюдать следующие правила:



Графическое построение картины электрического поля

- Эквипотенциальные поверхности вблизи электрода имеют форму его поверхности.
 - По мере удаления ко второму электроду кривизна эквипотенциальных поверхностей медленно изменяется и вблизи второго электрода принимает форму его поверхности.
 - Силовые линии и эквипотенциальные поверхности пересекаются взаимно перпендикулярно.
 - Любой металлический электрод, находящийся в диэлектрическом поле, представляет собой эквипотенциальную поверхность.
 - При переходе из одной среды в другую эквипотенциали и силовые линии изменяют угол наклона пропорционально отношению диэлектрических проницаемостей.
- Эквипотенциали (U) и силовые линии (V) тем гуще, чем выше напряженность электрического поля.

Экспериментальные методы исследования электрических полей

Метод определения эквипотенциалей

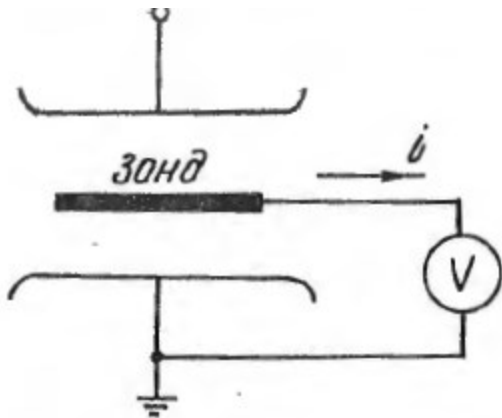
Методы определения силовых линий

Методы определения эквипотенциалей

С помощью этих методов определяются потенциалы точек заданной конструкции или модели, а затем через точки равного потенциала проводят эквипотенциальные поверхности.

- а) методы непосредственного измерения потенциалов;*
- б) компенсационные методы;*
- в) методы моделирования.*

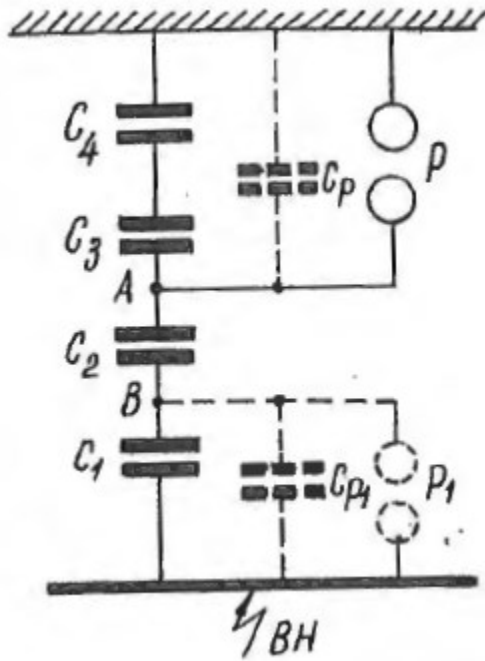
а) Методы непосредственного измерения потенциалов



Протекание тока в измерительной схеме вызывает тем большее искажение первоначальной картины поля, чем больше ток. Для уменьшения погрешности измерений рекомендуется применять приборы с большим входным сопротивлением (электростатические и ламповые вольтметры, шаровые разрядники).

Погрешность - (20-30%).

Метод измерения потенциалов по гирлянде изоляторов (метод М.И.Залесского).



При подсоединении шарового разрядника Р к точке А произойдет перераспределение потенциалов вдоль гирлянды, вследствие емкости шарового разрядника C_p .

Для уменьшения искажающего влияния М. И. Залесский предложил использовать шаровой разрядник с *меньшим диаметром шаров*, который при измерениях поочередно подсоединяется к каждому элементу гирлянды. Расстояние между шарами - неизменно, т.е. пробивное напряжение разрядника $U_{пр} = \text{const}$.

При измерениях потенциал провода повышается до момента пробоя промежутка Р₁.

Относительное падение напряжения на элементе:

$$a_k = \frac{U_{пр}}{U_k},$$

где U_k - напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов, при котором шаровой разрядник пробивается на соответствующем элементе гирлянды.

Тогда

$$a_1 = \frac{U_{\text{пр}}}{U_1}; a_2 = \frac{U_{\text{пр}}}{U_2}$$

Для гирлянды из n изоляторов: $a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = 1$ или

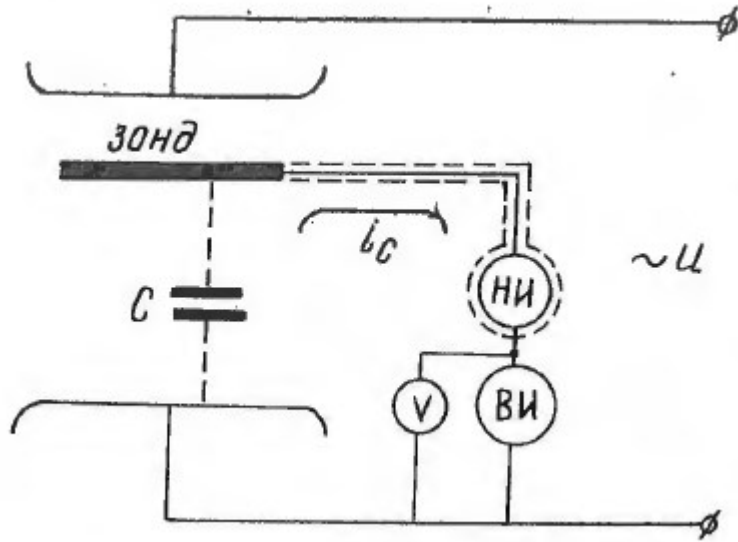
$$\frac{U_{\text{пр}}}{U_1} + \frac{U_{\text{пр}}}{U_2} + \dots + \frac{U_{\text{пр}}}{U_n} = 1$$

Откуда
$$U_{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}} \Rightarrow a_1 = \frac{1}{U_1 \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}} \Rightarrow a_k = \frac{1}{U_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}}$$

Откуда следует, что для определения потенциалов на каждом элементе гирлянды $U_{\text{пр}}$ разрядника знать не требуется, что также уменьшает погрешность измерения.

Зная относительное падение напряжения на элементах гирлянды можно легко определить напряжение на изоляторе и потенциал на любом элементе при заданном напряжении на гирлянде или потенциале на проводе. Практически при измерениях погрешность достигает (15-20) %.

б) Компенсационный метод



Суть метода состоит в том, что между заданной точкой, в которой помещен зонд, и вспомогательным источником (ВИ) регулируемого напряжения (по величине и фазе) включается нуль-индикатор (НИ), с помощью которого напряжение ВИ устанавливается равным напряжению интересующей нас точки. В этом случае ток через НИ будет равен нулю.

Показание вольтметра V дает значение потенциала точки поля, в которой расположен зонд.

Точность измерения с помощью данного метода определяется чувствительностью НИ и возможностью схемы установить полное равенство (по величине и фазе) между регулируемым напряжением и напряжением интересующей нас точки.

Для уменьшения погрешностей измерения за счет электростатических и электромагнитных наводок (на элементах измерительной схемы) необходимо применять короткие соединяющие провода и экранирование зонда.

в) Методы моделирования электрических полей

При моделировании электрических полей различают два основных метода:

Метод сплошных сред

Моделью служит поле электрического тока в сплошной проводящей среде.

Основным преимуществом метода сплошных сред является простота моделирующих устройств и большая точность соответствия между граничными условиями исследуемого объекта и модели.

Моделирование полей основано на **электростатической аналогии**. Если в рассматриваемой области отсутствуют распределенные источники поля, то постоянное электрическое поле в диэлектрике ($D = \epsilon E$), постоянное магнитное поле ($B = \mu H$) и стационарное электрическое поле тока в проводящей среде одинаково описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0.$$

Метод электрических сеток

Модель получается в виде электрической сетки, основанной на дискретном представлении элементарных объемов моделируемой области с помощью схем замещения.

Суть аналогии - при одинаковых граничных условиях и одинаковом распределении потенциалов на границах области картины электростатического поля в диэлектрике и поля тока в проводящей среде совпадают. При этом измерение потенциалов в поле тока осуществляется значительно проще, чем в электростатическом.

Исследование электрических полей, описываемых с помощью уравнения Лапласа, возможно при условии, что плотность объемных зарядов $\rho=0$, т.е. сопротивление электролита является **чисто активным** и **однородным** по всей жидкости.

Идентичность поля токов и электростатического имеет место только при измерении на постоянном напряжении.

Метод сплошных сред, в свою очередь, может быть разделен на **метод электролитической ванны** и **метод твердых моделей**.

Метод электролитической ванны \Rightarrow открытый резервуар (ванна) наполняется электролитом (купоросами, растворами солей и т.п.). Дно ванны выполняется из изоляционного материала. К модели подводится напряжение, и с помощью зонда производятся замеры.

Моделирование можно производить **глубиной раствора** или **проводимостью раствора**.

Метод моделирования глубиной раствора для плоскопараллельных полей, в которых проводимость среды изменяется, как функция координат поля, состоит в использовании однородной проводящей среды, имеющей различную толщину слоя.

На границе участков с различной толщиной устанавливается изоляционная перегородка с решетчатыми электродами на всю глубину проводящего слоя - «коллекторные шины» (КШ). Электроды этой решетки соединены между собой попарно и служат для равномерного распределения тока по всей толщине слоя электролита в ванне. Они обеспечивают скачкообразное изменение проводимости на границе слоев.

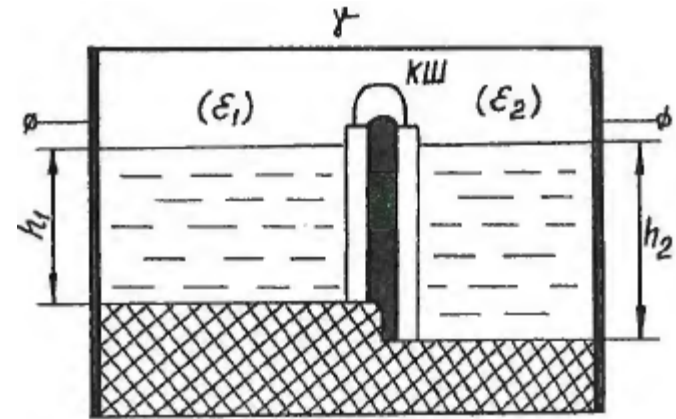


Схема моделирования **глубиной раствора**

При моделировании поля плоского двухслойного конденсатора с изоляционными материалами ϵ_1 и ϵ_2 необходимо соблюдать условие:

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{h_1}{h_2} = \text{const}$$

В этом случае поток вектора напряженности электрического поля в диэлектрике является идентичным потоку вектора плотности тока в электролите, и распределения потенциалов в обоих случаях являются одинаковыми.

По методу моделирования проводимостью раствора требуемая часть области отделяется от остальной части модели в электролитической ванне непроницаемой изоляционной перегородкой с решетчатыми электродами.

Внутри каждой части ванны заливается электролит различной проводимости.

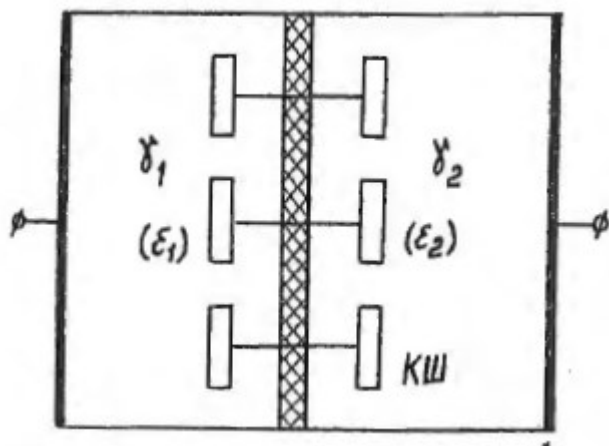


Схема моделирования
проводимостью раствора

При моделировании поля двухслойного диэлектрика необходимо выдерживать соотношение:

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \text{const}$$

Метод электролитических моделей можно использовать для исследования электрического поля любой конфигурации.

Обычно питание ванны осуществляется напряжением 10-100 В с частотой от 400-500 до 1500-3000 Гц.

При моделировании поля по методу твердых моделей используются тонкие металлические пластины (фольги) из марганца, свинца, алюминия или различные массы на основе графита, сажи в смеси с наполнителями.

Методы построения силовых линий поля

Если в электрическое поле поместить тело удлиненной формы, то оно в результате возникновения дипольного момента, обусловленного поляризацией молекул, испытывает действие пары сил. Под действием вращающего момента поляризованное тело ориентируется вдоль силовых линий поля. На этом принципе и основаны методы построения силовых линий электрического поля.

Метод электрических спектров состоит в том, что на диэлектрическую подложку, например из стекла, наклеивают две полоски фольги, изображающие обкладки конденсатора в выбранном плоском сечении. Прикладываем к полоскам фольги некоторое напряжение и насыпаем на пластину мелкие кристаллы гипса или другого диэлектрика (стриженный волос, слюдяная мука и т.п.). Если легко постучать по пластине, то можно заметить, что частицы диэлектрика устанавливаются строго в определенном направлении, которое и определяет направление силовых линий поля. Эта картина носит название «электрического спектра». Таким образом можно получать электрический спектр как для плоскопараллельного, так и для плоскомеридианного полей.

Суть *метода стрелки* состоит в том, что в электрическое поле исследуемой конструкции вносится легкая, свободно вращающаяся на оси, уравновешенная стрелка, например соломинка. Изолятор и соломинку проектируют на экран, на котором зарисовывается ряд положений стрелки, помещаемой последовательно в различные точки поля. В результате получают картину силовых линий данного поля. Используя известные правила построения картины электрического поля, можно провести эквипотенциальные поверхности.

Метод магнитного моделирования основан на использовании магнитного поля. Для получения картины поля используются мелкие металлические опилки.



Методы построения силовых линий поля являются наиболее простыми из всех ранее рассмотренных методов, но, вместе с этим, и наименее точными. С помощью методов построения силовых линий, как правило, исследуют лишь качественную сторону электрического поля данной конструкции.

Способы регулирования электрических полей

Основной задачей регулирования электрических полей является **снижение максимальной напряженности электрического поля, уменьшение габаритов и повышение разрядных характеристик** изоляционной конструкции.

Влияние различных факторов на величину максимальной напряженности поля.

- Зависимость максимальной напряженности поля от разности потенциалов может быть выражена формулой $E_{max} = kU$, где k зависит от многих условий, в том числе и от расстояния. Таким образом, увеличение напряжения между электродами, при неизменных прочих условиях, всегда вызывает повышение E_{max} .
- Максимальная напряженность поля с уменьшением радиуса кривизны электрода возрастает и тем больше, чем больше расстояние между электродами. При этом влияние формы второго (большого) электрода на величину E_{max} не очень велико, вследствие меньшей плотности зарядов на нем.
- Регулирование величины напряженности поля на переменном напряжении можно производить подбором ϵ диэлектрика в соответствии с выражением $E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1$. За счет перераспределения напряжения в слоях с большей ϵ напряженность поля снижается, а в слоях с меньшей ϵ - повышается.

Поэтому в области максимальной напряженности помещают диэлектрик с наибольшей ϵ . Такой способ широко применяется при изготовлении кабелей и называется **градированием изоляции**. Условием идеального градирования, при котором во всех слоях цилиндрического конденсатора $E_{max} = \text{const}$, является $r_k \epsilon_k = \text{const}$.

При **постоянном напряжении** регулирование поля осуществляется подбором проводимости диэлектрика в соответствии с выражением $E_1/E_2 = \gamma_2/\gamma_1$

- Нанесение **покрытий на электроды** большой кривизны в конструкциях с однородной изоляционной средой (газ, жидкость) позволяет существенно уменьшить максимальную напряженность и предотвратить нежелательные явления (корону, скользящий разряд). При этом напряженность поля в остальной части промежутка практически не изменяется, так как тонкий изоляционный слой толщиной не более 1 мм практически не изменяет емкости между электродами. Снижение максимальной напряженности обусловлено тем, что ϵ твердого покрытия, как правило, всегда больше ϵ среды. При этом одновременно происходит и некоторое увеличение E_{np} конструкции.

- Принудительное распределение потенциалов с помощью полупроводящих покрытий и сред, конденсаторных обкладок и емкостей, внешних и внутренних экранов, коронирующих электродов.



Роль полупроводящих покрытий и сред ($10^4 - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) - в области максимальной напряженности поля создаются повышенные активные составляющие утечки тока, приводящие к выравниванию распределения потенциала.



Внешние (на гирляндах изоляторов, вводах, конструкциях опорных изоляторов) и внутренние экраны (опорные изоляторы), имеющие потенциал высоковольтного электрода. В местах с наибольшей неравномерностью поля происходит увеличение емкости высоковольтного электрода и уменьшение роли паразитных емкостей приводящее к снижению E_{\max} .

- В конструкциях с газовой и жидкой изоляцией – барьеры из твердых диэлектриков. «Барьерный эффект» связан с выравниванием поля в промежутке и снижением E_{\max} вблизи электрода (острия).

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Основное достоинство воздуха - доступность и полное отсутствие затрат на его получение. Воздух характеризуется низкими значениями таких электрофизических параметров, как диэлектрические потери ($\text{tg}\delta \approx 10^{-8}$), диэлектрическая проницаемость ($\epsilon=1$), проводимость ($\gamma = 10^{-17} - 10^{-18} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$).

В однородном электрическом поле при небольших межэлектродных зазорах (1-2 см) электрическая прочность воздуха не превышает 30 кВ/см, и она уменьшается с ростом расстояния между электродами.

Электрическая прочность воздуха в резконеверном поле при расстояниях 1-2 м составляет около 5 кВ/см, а при расстояниях порядка 10-20 м снижается соответственно до 2,5-1,5 кВ/см. Это обстоятельство и определяет резкое возрастание габаритов ЛЭП и подстанций с ростом номинальных напряжений.

Воздух является нестареющей изоляцией и полностью восстанавливает свою прочность после снятия напряжения.

На электрическую прочность воздуха оказывает влияние давление P температура T и абсолютная влажность воздуха γ .

Для возможности сравнения результатов, полученных в различных условиях, эти данные приводят к нормальным условиям ($T = 20^\circ\text{C}$, $P = 760$ мм рт. ст., $\gamma = 11$ г/м³). Нормальным атмосферным условиям соответствует нормальная плотность газа, принимаемая за единицу.

Относительная плотность газа при давлении P и температуре T вычисляется по формуле

$$\delta = 0,386 P/T = 0,386 P/(273 + t),$$

где P - давление воздуха, мм рт. ст.; T - температура, K ; t - температура, $^\circ\text{C}$.

Давление воздуха от высоты расположения высоковольтной установки над уровнем моря определяется из выражения:

$$P = P_0(1 - 10^{-4}h),$$

где h - высота над уровнем моря, м. Температура воздуха может изменяться от -60 до $+50^\circ\text{C}$.

Расчет пробивного напряжения воздуха в равномерном поле

В обобщенном виде формула для определения $U_{пр}$ воздуха в равномерном поле в зависимости от расстояния S и относительной плотности воздуха δ (на основании обработки экспериментальных данных) имеет вид:

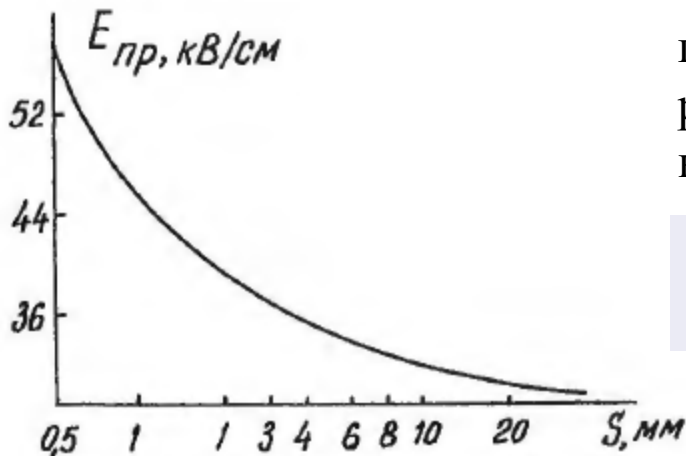
$$U_{пр} = 23,85 \delta \cdot S + 7,85 \sqrt{\delta \cdot S}, \text{ кВ.}$$

Формула справедлива при $S < 16$ см и $\delta = 0,8 - 1,1$.

Для ориентировочных расчетов $U_{пр}$ воздуха при атмосферном давлении можно использовать выражение:

$$U_{пр} = E_{пр}(S) \cdot S$$

где $E_{пр}(S)$ - пробивная напряженность воздуха в равномерном поле (для заданного расстояния), которую можно определить из графика.



Зависимость пробивной напряженности поля в воздухе при $P = 1$ атм от расстояния между плоскими параллельными электродами (по Шуману)

Электрическая прочность воздуха при переменном и постоянном напряжении практически одинакова.

При импульсном напряжении $E_{пр}$ воздуха практически не зависит от длительности воздействующего напряжения до $t \approx 10^{-6}$ с. При $t < 10^{-6}$ с электрическая прочность воздуха повышается по сравнению с $U_{пр}$ при статическом приложении напряжения, что объясняется **эффектом запаздывания разряда**. При временах воздействия порядка 10^{-8} - 10^{-9} с **коэффициент импульса** при пробое воздуха может достигать величины 2,0-2,5.

Для удобства расчетов А.А.Горев и Л.Е.Машкилейсон предложили формулу для расчета вольтсекундной характеристики воздушного промежутка:

$$U_{пр}(t) = U_{пр min} \sqrt{1 + \frac{T}{t}},$$

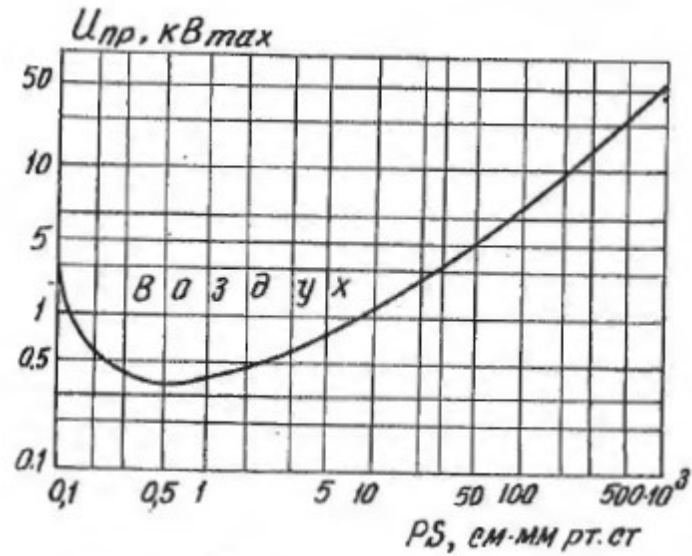
где $U_{пр min}$ - минимальное пробивное напряжение промежутка, соответствующее максимальному времени разряда. Практически это напряжение соответствует $U_{50\%}$ промежутка; T - параметр, зависящий от свойств промежутка, t - время разряда, мкс.

При атмосферных условиях, отличающихся от нормальных, пробивное напряжение воздуха может быть определено:

$$U_{пр} = U_{пр 0} \delta,$$

где $U_{пр 0}$ - пробивное напряжение воздушного промежутка при нормальных условиях ($\delta=1$).

В равномерном поле при неизменной температуре пробивное напряжение газового (воздушного) промежутка подчиняется закону Пашена $U_{пр} = f(P \cdot S)$. В пределах погрешности 10% законом Пашена (получаются завышенные $U_{пр}$) можно пользоваться до давлений воздуха (20-25) атм, а при более высоких давлениях следует пользоваться графиками (рисунок 1).



Зависимость $U_{пр} = f(P \cdot S)$ позволяет выбирать пути повышения $U_{пр}$ газовой изоляции.

Увеличение давления газа (правая ветвь кривой) используется в воздушных выключателях, газонаполненных кабелях, трансформаторах, конденсаторах. Вакуум (левая ветвь кривой) используется для увеличения $E_{пр}$ в ускорителях заряженных частиц, конденсаторах)

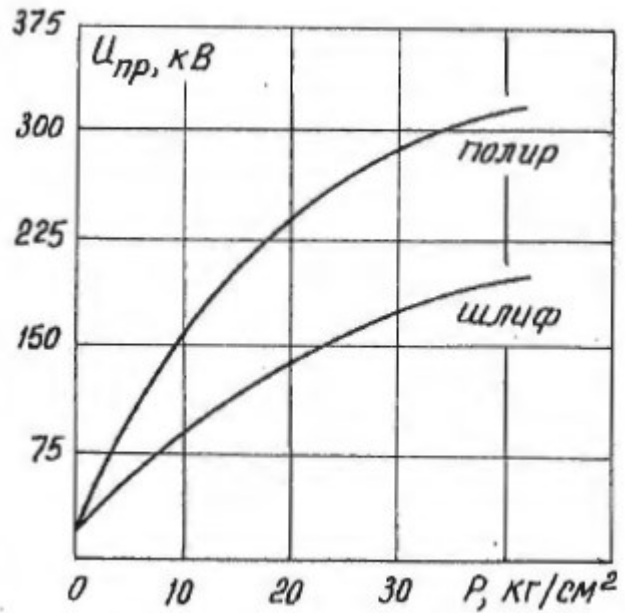


Рисунок 1 – Зависимость $U_{пр}$ воздуха от давления при различной степени обработки поверхности медных электродов ($S=0,63$ см)

При малых давлениях воздуха местное искажение поля за счет микронеоднородностей не может оказать заметного влияния на электрическую прочность, так как длина свободного пробега электрона значительно превосходит размеры микровыступов.

Расчет пробивного напряжения воздуха для сферических и цилиндрических электродов

Промежуток сфера - сфера. При относительно небольших расстояниях между сферическими электродами и больших диаметрах шаров электрическое поле практически равномерное.

Для практических расчетов $U_{\text{пр}}$ при переменном напряжении между сферическими электродами радиусом r была предложена следующая эмпирическая формула, полученная на основании обработки экспериментальных данных:

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}} S}{f}, \text{ кВ}_{\text{max}},$$

где

$$E_{\text{пр}} = 27,2\delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{r\delta}} \right), \text{ кВ}_{\text{max}}/\text{см},$$

S - кратчайшее расстояние между сферами, см.

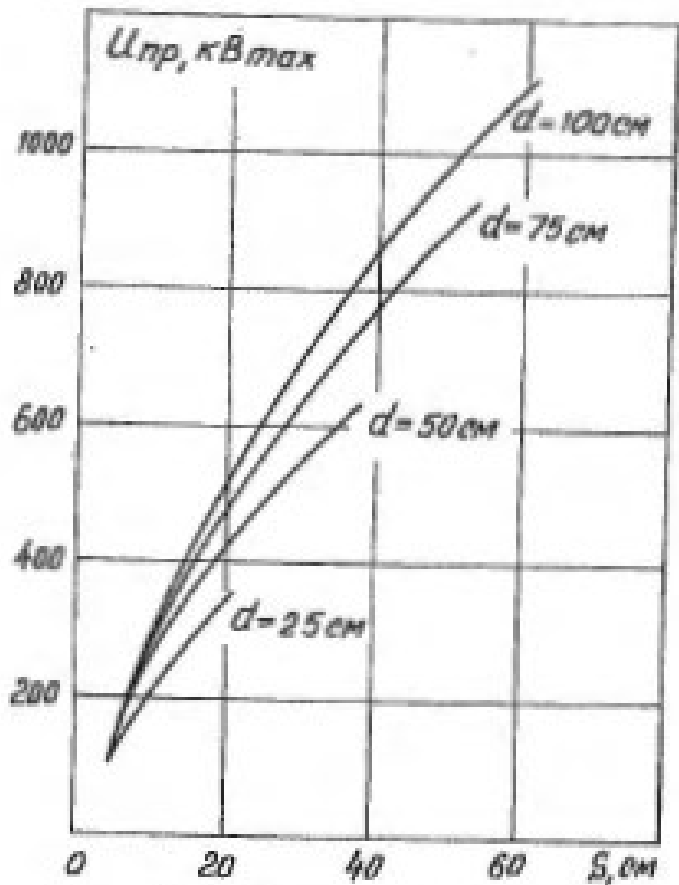
Геометрический фактор $f = 0,25 \left[\frac{S}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{S}{r} + 1 \right)^2 + 8} \right],$

учитывает снижение $U_{\text{пр}}$ из-за неравномерности поля.

С погрешностью порядка 10 % формула (2-5) справедлива при $0,54 \sqrt{r} < S \leq 2r$.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) разработала таблицы, которые рекомендуется использовать при проведении инженерных расчетов.

Δ , см	Диаметр шара, см						
	2	5	6,25	10	12,5	15	25
0,1	4,4	-					
0,2	8,2	8,0					
0,3	11,6	-					
0,4	14,9	14,3	14,2				
0,5	18,1	-	-	16,9	16,7	16,5	
0,6	21,2	20,4	20,2	-	-	-	
0,7	24,1	-	-	-	-	-	
0,8	26,9	26,4	26,2	-	-	-	
0,9	29,5	-	-	-	-	-	
1,0	32	32,2	32	31,6	31,5	31,3	31
1,4	(41,2)	43,3	43,2	-	-	-	-
1,8	(48,7)	53,5	53,9	-	-	-	-
2,0	(51,8)	58,3	59	59,3	59,4	59,2	59
8,0	-	(79,3)	81,8	84,9	85,4	85,8	86
4,0	-	(96,4)	(101)	107	110	111	113
5,0	-	(111)	(117)	128	132	134	138
6,0	-	-	(131)	(146)	152	155	162
7,0	-	-	-	(163)	(170)	175	185
8,0	-	-	-	(177)	(187)	(194)	207
10,0	-	-	-	(208)	(217)	(227)	248



Пробивное напряжение
воздуха между шаровыми
электродами

Влажность воздуха на $U_{пр}$ почти не влияет, а давление и температура воздуха учитываются:

$$U_{пр} = U_{пр0} \cdot \delta$$

При больших отклонениях относительной плотности воздуха от нормальной $U_{пр}$ определяется из формулы:

$$U_{пр} = U_{пр0} \cdot k$$

где k - поправочный коэффициент, определяемый из таблицы.

δ	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
k	0,72	0,76	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00	1,05	1,09

Коаксиальные и параллельные цилиндры.

Пробивное напряжение воздуха для коаксиальных (соосных) цилиндров при переменном напряжении 50 Гц (в амплитудных значениях)

$$U_{np} = E_{np} \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r}, \quad \text{кВ}_{\text{max}}$$

где R , r - радиусы наружного и внутреннего цилиндров в см.

$$E_{np} = 31 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}} \right), \quad \text{кВ/см}$$

Формула применима при $R/r < 10$.

Для параллельных цилиндров с радиусом r и расстоянием между цилиндрами S ($S/r < 30$) пробивное напряжение при частоте 50 Гц:

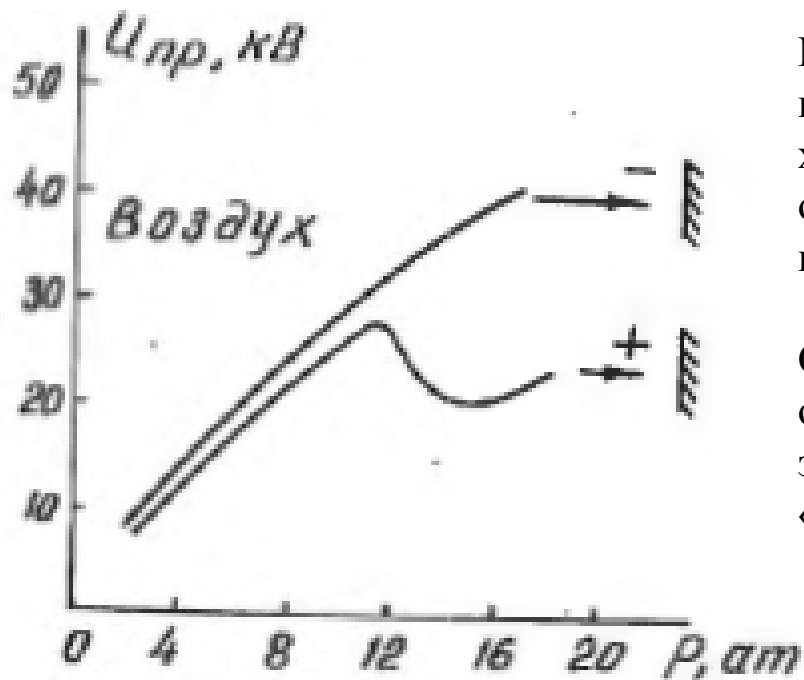
$$U_{np} = 2E_{np} \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r}, \quad \text{кВ}$$

$$E_{np} = 30 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r\delta}} \right), \quad \text{кВ/см}$$

Расчет пробивного напряжения воздуха в резконеоднородных полях

Ударная ионизация и вызванный ею разряд возникает в области максимальной напряженности поля обычно у одного из электродов, имеющего очень малый радиус кривизны.

- Разряд в РНП характеризуется двумя значениями напряжений: начальным или коронным ($U_{кор}$) и пробивным ($U_{пр}$).
- Наличие эффекта полярности, который особенно наглядно проявляется в системе электродов острие - плоскость.
- $U_{пр}$ в РНП значительно меньше $U_{пр}$ в равномерном поле при всех прочих равных условиях.
- С увеличением давления газа (воздуха) электрическая прочность промежутка увеличивается медленнее, чем в равномерном поле, что свидетельствует о неприменимости закона Пашена к промежуткам с РНП.
- Существенным при пробое воздуха, а также для некоторых газов (азота, элегаза, фреона) является наличие аномалии в ходе зависимости $U_{пр} = f(P)$. Как правило, аномалии наблюдаются при положительной полярности острия в системе электродов острие -плоскость, а также в системе острие - острие заземленное.



Зависимость $U_{пр}$ воздуха от давления в промежутке острие - плоскость.

Постоянное напряжение. $S = 0,3$ см

Максимум в кривой $U_{пр} = f(P)$ наблюдается при пробое электроотрицательных газов, характеризующихся интенсивным образованием отрицательных ионов при протекании ионизационных явлений.

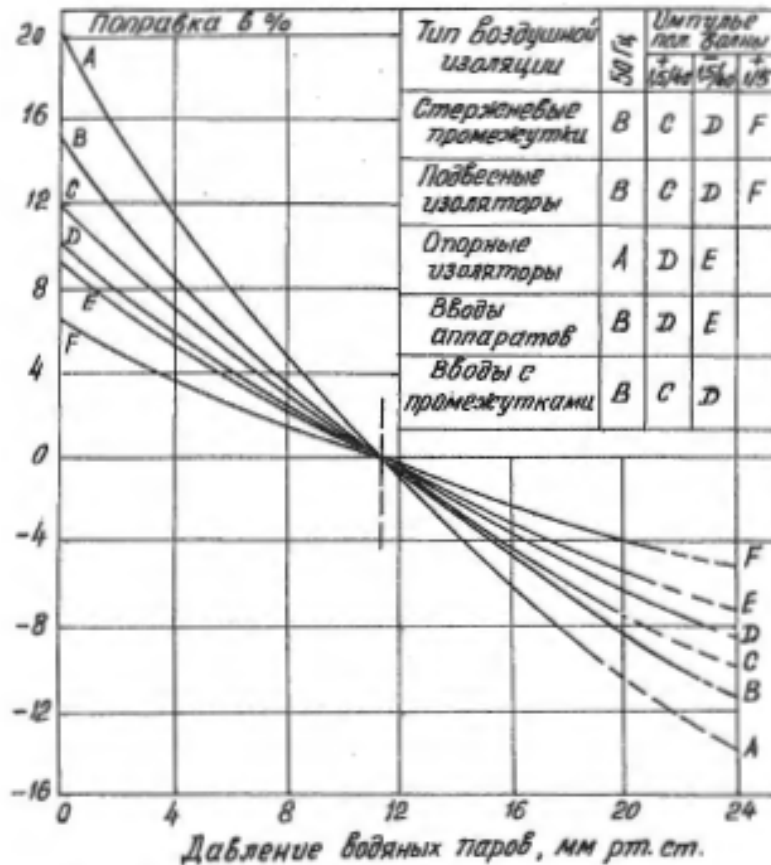
С ростом внешнего давления растет и плотность отрицательного заряда, что приводит к снижению эффективности ионизации вследствие «прилипания» электронов к молекулам.

Возрастание плотности отрицательного объемного заряда способствует повышению $U_{пр}$. При некотором давлении P (критическом) условия для существования устойчивого компактного заряда нарушаются и $U_{пр}$ снижается.

- Пробивное напряжение промежутка с РНП зависит от относительной плотности воздуха δ и влажности.

$$U_{пр} = U_{пр0} \cdot \frac{\delta}{k},$$

где k - поправочный коэффициент на влажность воздуха, который определяется по номограммам с учетом показаний психрометра.



При расчете пробивных напряжений воздуха между стержневыми электродами пользуются эмпирическими формулами. На переменном напряжении промышленной частоты для электродов “острие-острие”(симметричное напряжение) при $S \geq 8$ см

$$U_{np} = (14 + 3,36S)\delta, \text{ кВ}$$

“острие-острие заземленное”

$$U_{np} = (14 + 3,16S)\delta, \text{ кВ}$$

“острие-плоскость”

$$U_{np} = (7 + 3,36S)\delta, \text{ кВ}$$

При $30 < S \leq 200$ см, $P = 760$ мм рт. ст. и $t = 20^\circ\text{C}$ при симметричном включении электродов “острие-острие” на переменном напряжении

$$U_{np} = 15 + 3,8\delta, \text{ кВ}$$

и при одном заземленном острие

$$U_{np} = 15 + 3,6\delta, \text{ кВ}$$

На импульсах положительной полярности

$$U_{np} = 75 + 5,56S, \quad \kappa B_{\max}$$

На импульсах отрицательной полярности

$$U_{np} = 110 + 6S, \quad \kappa B_{\max}$$

При переменном напряжении для электродов “острие - плоскость заземленная” при $1 < S \leq 9$ м:

$$U_{np} = (1,62^3 \sqrt{S} - 1,1)10^3 S, \quad \kappa B_{\max}$$

а для промежутка “острие-острие заземленное” при $1 < S \leq 4,5$ м:

$$U_{np} = (1,45\sqrt{S} - 0,93)10^3, \quad \kappa B_{\max}$$

а для промежутка “провод-провод разрядные напряжения при $1 < S \leq 4,75$ м:

$$U_{np} = (0,21 + 0,35S)10^3, \quad \kappa B_{\max}$$

Вольт-секундная характеристика промежутка “стержень-стержень” при стандартной положительной волне описывается уравнением ($100 < S \leq 300$ см)

$$U_{np}(t) = 4,95S \left(1 + \frac{2,34}{t_p}\right), \quad \kappa B_{\max}$$

где t_p - разрядное время, мкс;

Пробивное напряжение промежутков с **высокопрочными газами** определяется из выражения:

$$U_{np}^Г = A \cdot U_{np}^B,$$

где U_{np}^B - пробивное напряжение воздуха при заданных условиях; A - коэффициент относительной электрической прочности.

Газ	Воздух	N ₂	SF ₆	CCl ₂ F ₂	CO ₂	CCl ₄	SeF ₆
$A=U_{np}^Г/U_{np}^B$	1,0	1,0	2,3-2,5	2,4-2,6	0,95	6,3	4,5
T _{сж} , °C	-192	-195,8	-62	-28	-34,6	76	49,2

Рабочее напряжение воздушной изоляции:

$$U_{раб} = \frac{U_{np}}{K_{зап}},$$

где $K_{зап}$ - коэффициент запаса электрической прочности воздуха. В зависимости от требований, предъявляемых к изоляции, коэффициент может принимать значения от 1,1 до 6,0 и выше.

При измерении пробивного напряжения промежутка наблюдается, как известно, разброс значений, обусловленный действием разнообразных факторов. Поэтому принято считать, что пробивное напряжение промежутка - величина статистическая.

Среднее значение U_{np} промежутка из N пробоев:

$$\bar{U}_{np} = \frac{\sum_{i=1}^N U_{npi}}{N}, \quad \text{кВ},$$

где U_{npi} - пробивное напряжение промежутка при i -м опыте.

Разброс отдельных значений относительно U_{npi} характеризуется **среднеквадратичным отклонением**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (U_{npi} - \bar{U}_{np})^2}{N - 1}}, \quad \text{кВ}.$$

Коэффициент вариации

$$\gamma = \frac{\sigma}{\bar{U}_{np}} 100, \quad \%.$$

Вероятность пробоя промежутка в диапазоне воздействующих напряжений от U_k до U_{k+1} :

$$P_k = \frac{\Delta n_k}{N},$$

где n_k - число зарегистрированных пробоев в рассматриваемом интервале.

Пробой по поверхности раздела двух сред называется **перекрытием**, а напряжение, в котором происходит этот разряд - **напряжением перекрытия** ($U_{пер}$). Если граница раздела двух сред не расположена нормально к силовым линиям электрического поля, то вектор напряженности электрического поля испытывает при переходе в смежную среду преломление.

При этом отношение угла падения α_1 к углу преломления α_2 равно отношению диэлектрических проницаемостей изолирующих сред. Тангенциальные составляющие преломляющегося и преломленного векторов равны между собой $E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$, а нормальные составляющие подчиняются соотношению

$$\frac{E_{N1}}{E_{N2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1}.$$

Изменяя форму поверхности изолятора, можно выровнять электрическое поле, изменить траекторию разряда и повысить разрядное напряжение конструкции.

Наиболее опасными для изоляционной конструкции бывают скользящие разряды, являющиеся предвестниками перекрытия.

Теплер предложил эмпирическую формулу для определения напряжения скользящих разрядов при 50 Гц от величины удельной поверхностной емкости ($C_{уд}$)

$$U_{ск} = \frac{13,5 \cdot 10^{-5}}{C_{уд}^{0,45}}, \quad кВ$$

При $C_{уд} > 0,25 \cdot 10^{-12}$, $\Phi/см^2$

Для плоского диэлектрика $C_{уд} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{d}, \quad \Phi/см^2$

Для цилиндра $C_{уд} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{R \ln \frac{R}{r}}, \quad \Phi/см^2$

Длину скользящих разрядов можно определить из формулы Теплера:

$$l_{ск} = K \cdot C_{уд}^2 \cdot U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}}, \quad см$$

где K - постоянная, зависящая от рода напряжения и полярности импульсов. На импульсах положительной полярности $K = 39 \cdot 10^{15}$, а при отрицательной полярности импульсов $K = 33 \cdot 10^{15}$;

U - приложенное напряжение, кВмах;

dU/dt - скорость изменения напряжения, кВмах/мкс.

Напряжение перекрытия изолятора при сухой и чистой поверхности называется **сухоразрядным напряжением** ($U_{схр}$).

Для опорных и подвесных фарфоровых изоляторов $U_{схр}$ определится из формулы:

$$U_{схр} = 20 + 3,35l_{схр}, \quad кВ_{\max}$$

При $l_{схр} = 20 \div 200$ см.

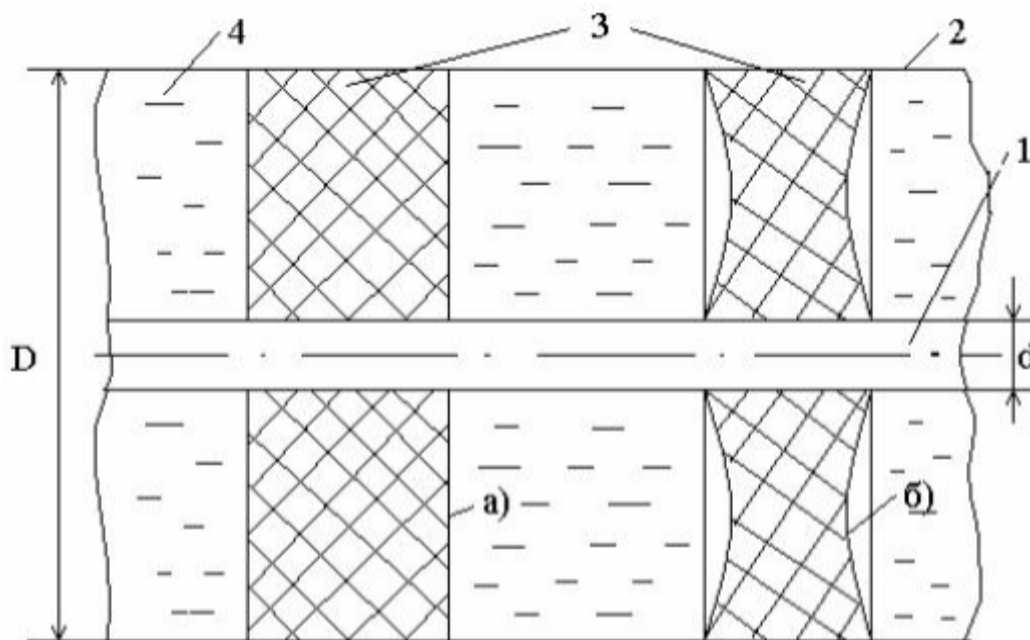
Для импульсной стандартной волны 50% - ное напряжение:

$$U_{схр} = 60 + 5,21l_{схр}, \quad кВ_{\max}$$

$$U_{схр} = 150 + 6,5l_{схр}, \quad кВ_{\max}$$

При импульсном напряжении разряд имеет тенденцию “прилипнуть” к поверхности изолятора, что свидетельствует о целесообразности изготовления ребер на изоляторах для увеличения $U_{пер}$.

Перспективным является применение коаксиальных кабелей со сжатым газом или жидким диэлектриком как в силовой электроэнергетике, так и в технике физического эксперимента. Опытные данные по перекрытию центрирующих изоляторов в коаксиальных системах показывают, что разрядное напряжение имеет максимальное значение при $D/d = 2,8 - 3,5$.



Коаксиальный кабель: 1- токоведущая труба; 2 – наружная труба; 3 –центрирующие изоляторы типа «шайба» (а) и типа «желоб» (б); 4-изоляционная среда (газ или трансформаторное масло)

При равенстве диэлектрических проницаемостей материала твердого диэлектрика (ϵ_v) и изоляционной среды (ϵ_m), т.е. когда $\epsilon_v = \epsilon_m$, наибольшее $U_{пер}$ имеют изоляторы вогнутой формы типа “желоб”, т.к. при такой форме происходит значительное выравнивание поля и разряд “вынужден” идти по кратчайшему расстоянию между кромками изолятора, т.е. по изоляционной среде.

Если ϵ_v и ϵ_m отличаются существенно, то наиболее оптимальной формой изолятора является изолятор типа “шайба” т.к. он производит наименьшее искажение поля. Напряжение перекрытия по чистой и увлажненной поверхности изолятора называется **мокроразрядным напряжением ($U_{мр}$)**.

При напряжении промышленной частоты и силе дождя 5 мм/мин минимальное мокроразрядное напряжение можно определить по формуле ($l_{схр}$ - в см)

$$U_{мкр} = 2,15l_{схр}, кВ$$

На импульсах положительной полярности

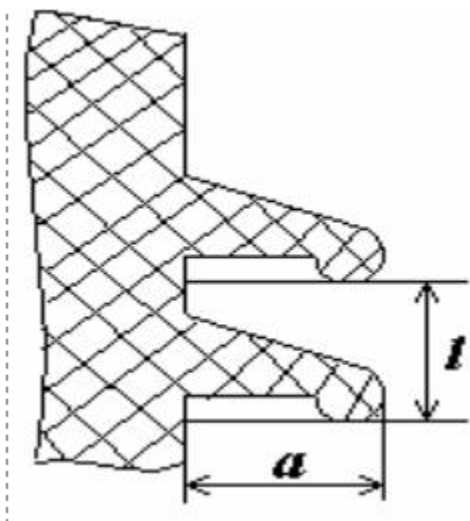
$$U_{мкр+} = 5,15l_{схр}, кВ_{max}$$

Число ребер в изоляторе выбирается по формуле

$$n = 1,5 + 0,065U_n, \quad \text{шт}$$

где U_n - номинальное напряжение изолятора, кВ.

Ребро должно иметь капельницу, чтобы вода не смачивала его нижнюю поверхность и не сокращала сухие участки поверхности изолятора. Обычно изолятор конструируют таким образом, чтобы $a/l \approx 0,5$ (a - вылет ребра; l - расстояние между ребрами).



Количество изоляторов в поддерживающей гирлянде на металлических и железобетонных опорах

$$n = \frac{\lambda_{эф} K \cdot U_{раб.л}}{L}, \quad \text{шт}$$

где $\lambda_{эф}$ - удельная эффективная длина пути утечки, которая зависит от номинального напряжения и режима нейтрали ЛЭП, степени загрязненности атмосферы см/кВ;

K - коэффициент эффективности использования длины пути утечки;

$U_{раб.л}$ - наибольшее рабочее линейное напряжение, кВ

L - длина пути утечки изолятора, см.

На деревянных опорах число элементов в гирлянде берется на один меньше.

Число изоляторов, устанавливаемых в натяжных гирляндах:

$$m = n + a, \quad \text{шт}$$

где a - число дополнительных изоляторов.

Для $U_H=110-150$ кВ $a=1$; для $U_H=220-330$ кВ $a=2$; для $U_H=500$ кВ $a=3$ и для $U_H=750$ кВ $a=4$.

Напряжение перекрытия вдоль загрязненной и увлажненной поверхности изолятора называется **влажноразрядным напряжением** ($U_{вр}$).

Ток утечки вдоль поверхности изолятора, при котором происходит перекрытие, называется **критическим током**.

$$I_{кр} = (A \cdot \pi \cdot \gamma_n \cdot D_э)^{\frac{1}{1+n}}, A$$

где γ_n - удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения, См

$D_э$ - эквивалентный диаметр изолятора, см.

Постоянные: $A = 100$; $n = 0,7$.

Сопротивление поверхностного слоя

$$R = \frac{K_{\phi}}{\bar{\gamma}_n}, \text{ Ом}$$

где K_{ϕ} - коэффициент формы изолятора ($K_{\phi} = 0,7 - 1,1$).

Средняя влагоразрядная напряженность по длине пути утечки изолятора:

$$E_{\text{влL}} = \frac{U}{L}, \text{ кВ/см}$$

где L - длина пути утечки изолятора, см.

Средняя влагоразрядная напряженность по строительной высоте изолятора:

$$E_{\text{влH}} = \frac{U}{H}, \text{ кВ/см}$$

где H - длина пути утечки изолятора, см.

Напряжение перекрытия изоляторов при промышленной частоте и условиях, отличающихся от нормальных

$$U_{\text{пер}\delta} = (0,14 + 0,86\delta)U_1, \text{ кВ}$$

где U_1 - напряжение перекрытия изолятора при $\delta = 1,0$.

Зависимость 50% - го импульсного напряжения перекрытия (при $t \geq 1$ мкс) от относительной плотности воздуха выражается формулой

$$U_{пер} = (0,3 + 0,7\delta)U_1, \text{ кВ}$$

где U_1 - импульсное разрядное напряжение при $\delta = 1,0$.

Принято приводить разрядное напряжение к абсолютной влажности, равной 11 г/м³ при 20° С, что соответствует $W = 63,5$ %

$$U_n = \frac{U_\gamma}{1 + K(\gamma - 11)}, \text{ кВ}$$

где U_γ - разрядное напряжение при влажности γ ; K - поправочный коэффициент, определяемый из номограмм и графиков $K = f(\gamma)$.