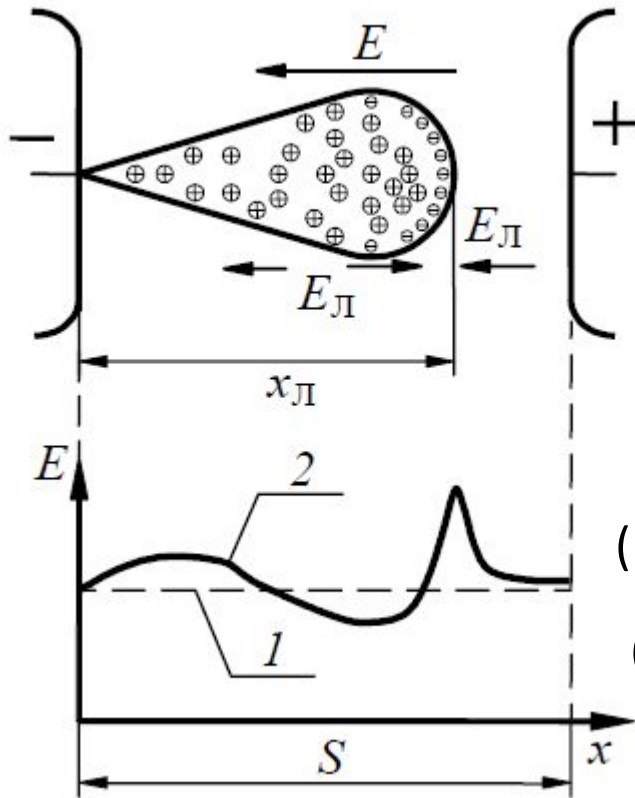


$$v_{De} \gg v_{Di}$$



Электроны намного быстрее ионов покидают промежуток и поглощаются анодом



Искажение электрического поля в промежутке, обусловленное лавиной

Таунсендовский (темный) разряд.
Условие самостоятельности ($i=1$ мкА).

Для поддержания самостоятельного разряда достаточно лишь приложенного напряжения

Число электронов в лавине в промежутке длиной S с учетом «прилипания»

$$(1) N_e = e^{(\alpha - \eta)S} \quad \eta - \text{коэффициент прилипания}$$

$$(2) N_i = N_e - 1 - \text{число образовавшихся ионов}$$

γ - эффективный коэффициент извлечения электрона из катода при столкновении с ионом

$$\gamma \cong 10^{-4}$$

Условие генерации новой лавины

$$(3) \gamma N_i \geq 1$$

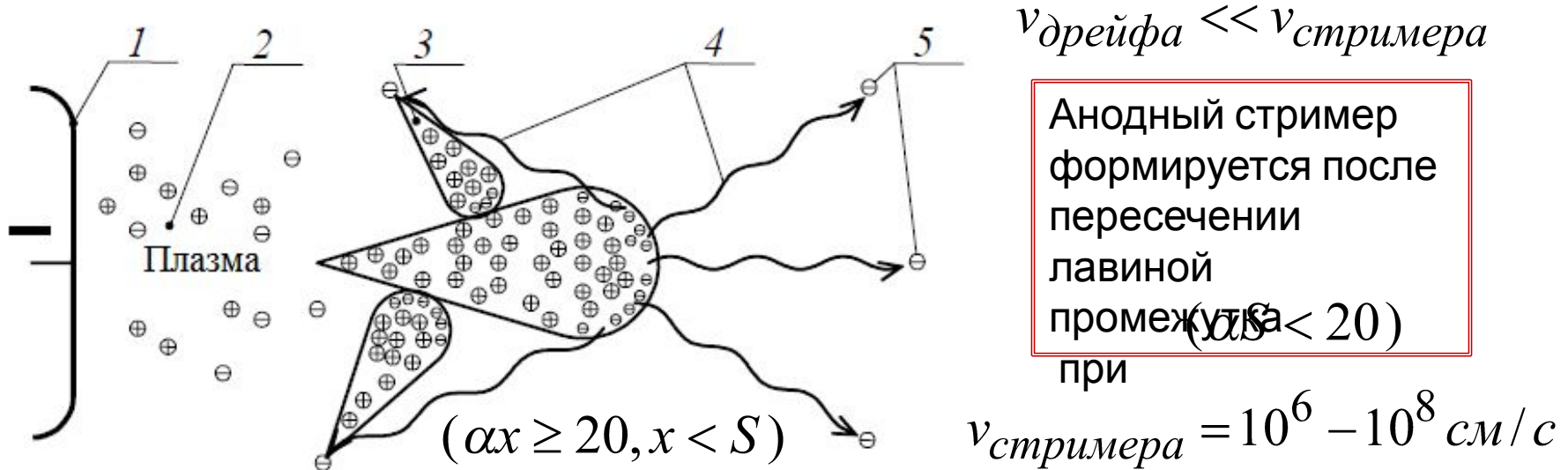
откуда
$$(4) e^{(\alpha - \eta)S} - 1 = \frac{1}{\gamma}$$

Разряд в форме стримера



Лавина переходит в стример формируется при $N_{i,e} > 10^7 - 10^9$

Это достигается в плотных, включая нормальные условия, газах и достаточно длинных (свыше 2 см) газовых промежутков S



Механизм развития катодного стримера:

1 – электрод (катод); 2 – канал стримера; 3 – лавины; 4 – движение фотонов; 5 – электроны за счет фотоионизации



Фотография катодного стримера $S=30 \text{ мм}$ $U=42 \text{ кВ}$, $P=740 \text{ торр}$

После пересечения стримером промежутка наступает стадия главного разряда-образование хорошо проводящего светящегося канала

Закон Пашена. Подобие разрядных промежутков



Выше имели условие
самостоятельности разряда в
виде

$$(1) \quad e^{(\alpha - \eta)S} - 1 = \frac{1}{\gamma}$$

При низких давлениях P $\eta = 0$

$$\Rightarrow e^{\alpha S} = \frac{1}{\gamma} + 1 \cong \frac{1}{\gamma} \Rightarrow$$

$$(2) \quad \Rightarrow \alpha = \frac{\ln \frac{1}{\gamma}}{S}$$

В то же время экспериментально
подтвержденная формула Таунсенда (3)
(см. выше) дает

$$(3) \quad \alpha = PAe^{-\frac{B}{E/P}}$$

где E – напряженность электрического поля, A, B – константы
газа

$$(4) \quad E = \frac{U}{S}$$

Приравнивая выражения для α найдем

$$(5) \quad U_{np} = \frac{B \cdot (P \cdot S)}{\ln \frac{A \cdot (P \cdot S)}{\ln \frac{1}{\gamma}}}$$

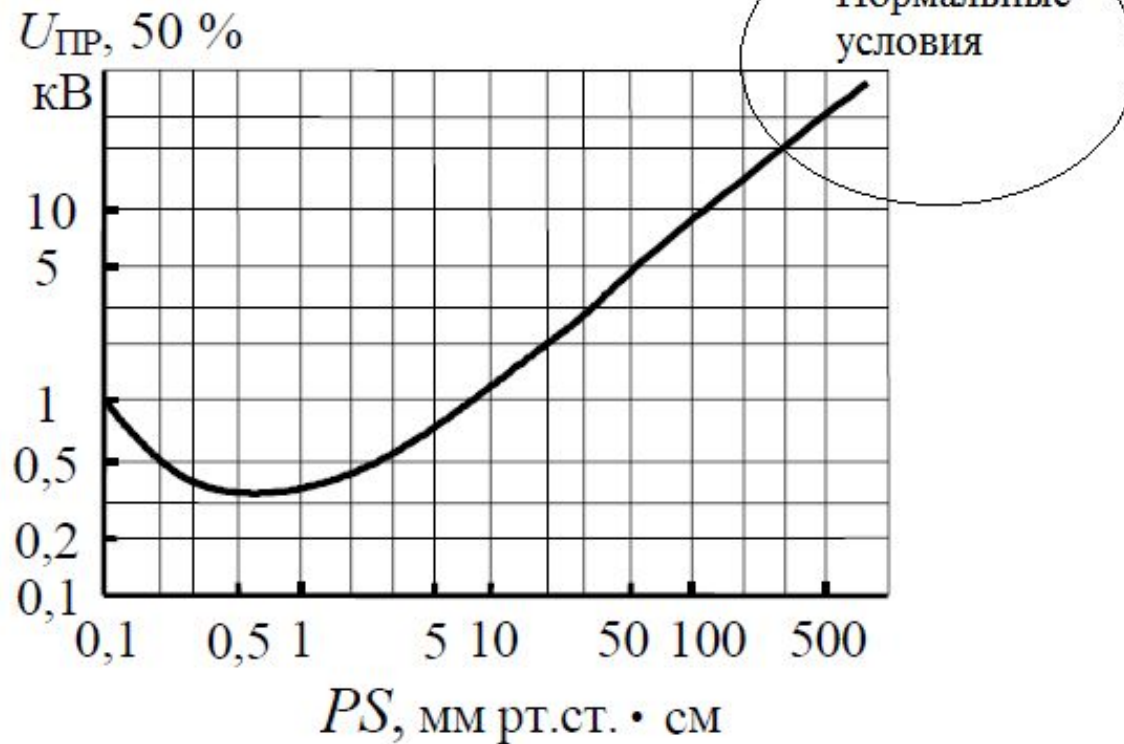
Данное напряжение также
носит название начального,
как минимально
необходимое для
поддержания ионизационных
процессов

(6)

$$U_{np} = f(P \cdot S)$$



В однородном
поле



Графическое отображение закона Пашена для воздуха

Влияние температуры – обратное по отношению к росту давления

$$U_{пр} = U_{пр\text{Пашена}} 0.386 \frac{P_{\text{мм рт.ст.}}}{T_K} \quad (1)$$

Отклонения от закона Пашена



- 1) Низкие (близкие к вакууму) давления. Главная роль принадлежит процессам на электродах в частности на катоде
- 2) Высокие давления и длины промежутков. Основной механизм разряда стример и объемная фотоионизация. Появление вторичных лавин в объеме ведет к снижению пробивного напряжения.

Практическое использование закона Пашена

- 1) Вакуумная изоляция установок высокого напряжения
- 2) Газовая изоляция высокого давления
- 3) При конструировании следует избегать минимума кривой Пашена, в которой $U_{пр} \approx 300 \text{ В}$

Практическая аппроксимация кривой Пашена (правая ветвь)

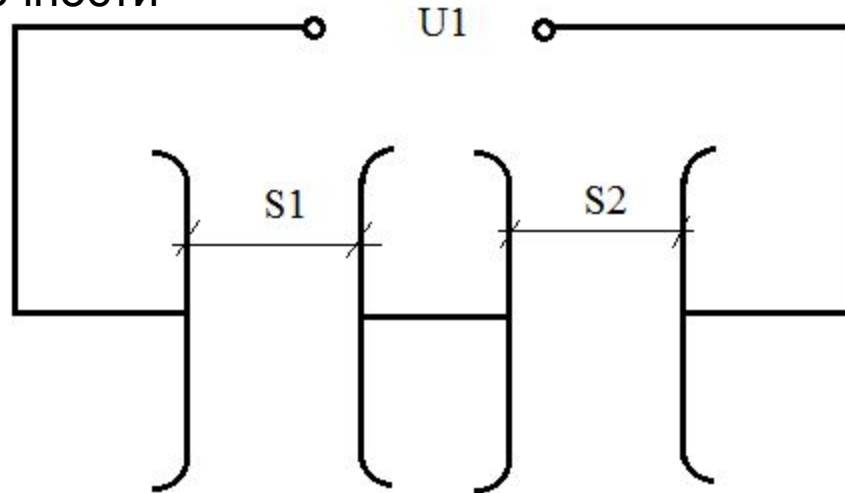


$$(1) \quad U_{np} = a(\delta \cdot S) + b\sqrt{\delta \cdot S} \quad \delta = \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \begin{array}{l} \text{- относительная} \\ \text{плотность воздуха} \\ [T]=K \end{array}$$

Постоянные	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	He	Ne
a, кВ/см	24.5	26	23.5	12.6	2.01	1.82
b, кВ/см ^{1/2}	6.4	6.35	9.55	4.33	1.55	1.57

$$(2) \quad E_{np} = \frac{U_{np}}{S} = a\delta + b\sqrt{\frac{\delta}{S}} \quad \Rightarrow \quad S \downarrow \Rightarrow E_{np} \uparrow \quad \Rightarrow$$

Разбиение газового промежутка для увеличения электрической прочности

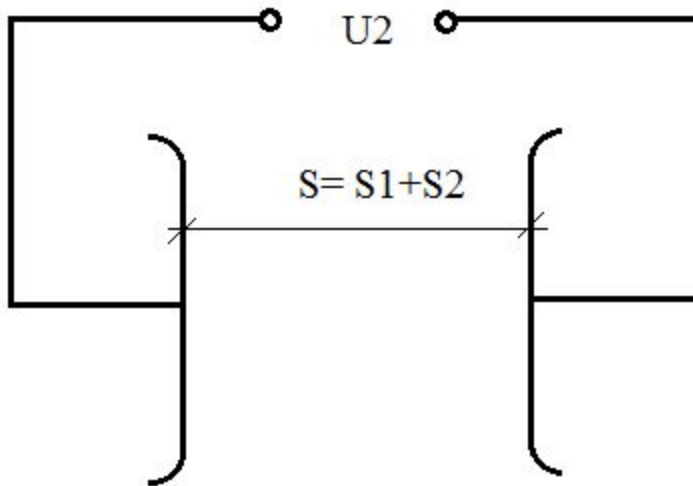


$$U_{np1} = E_{np1} \cdot S_1 + E_{np2} \cdot S_2$$

$$U_{np1} > U_{np2}$$

$$E_{np1} > E_{np}$$

$$E_{np2} > E_{np}$$



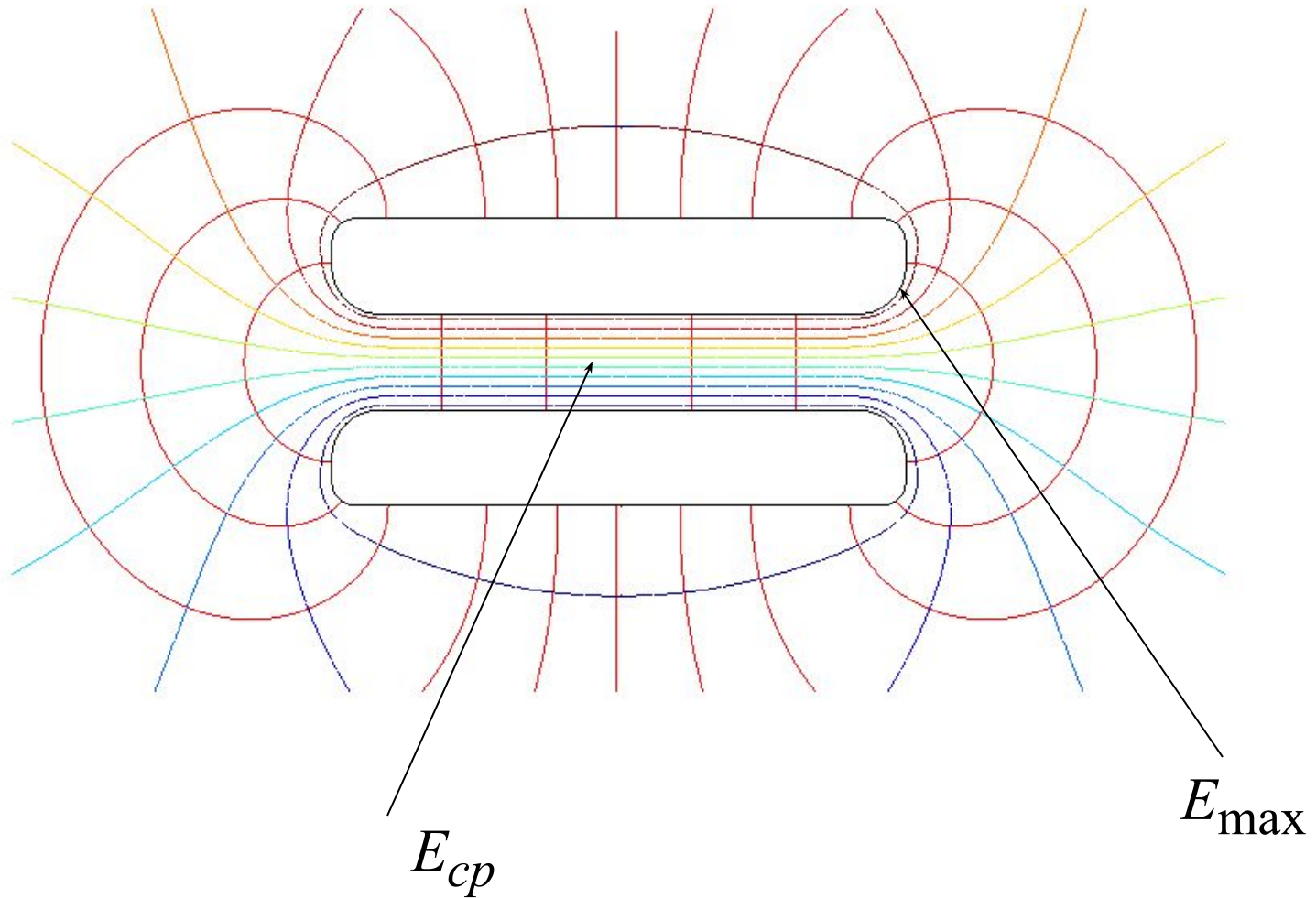
$$U_{np2} = E_{np} \cdot S$$

Разряд в неоднородном электрическом поле

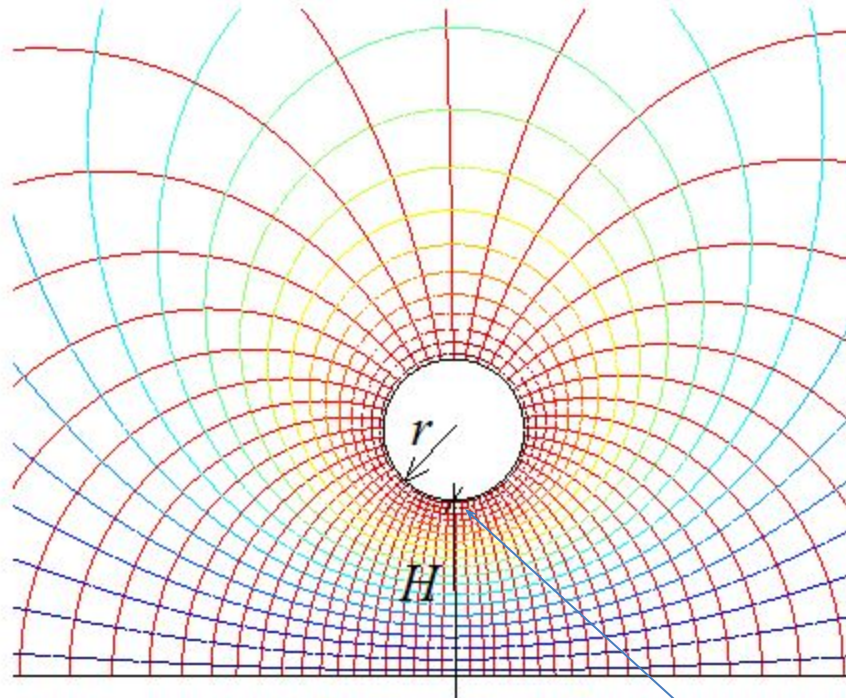


Картина квазиоднородного электрического поля

$$E_{cp} = E_{max}$$



Цилиндрический провод над плоскостью



$$E_{cp} = \frac{U}{H}$$

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{2(H+r)}{r}}, \quad r \ll H$$

$$E_{\max} = \frac{0.9U}{r \ln \frac{r+H}{r}}, \quad r \approx H$$

$E_{\max}$

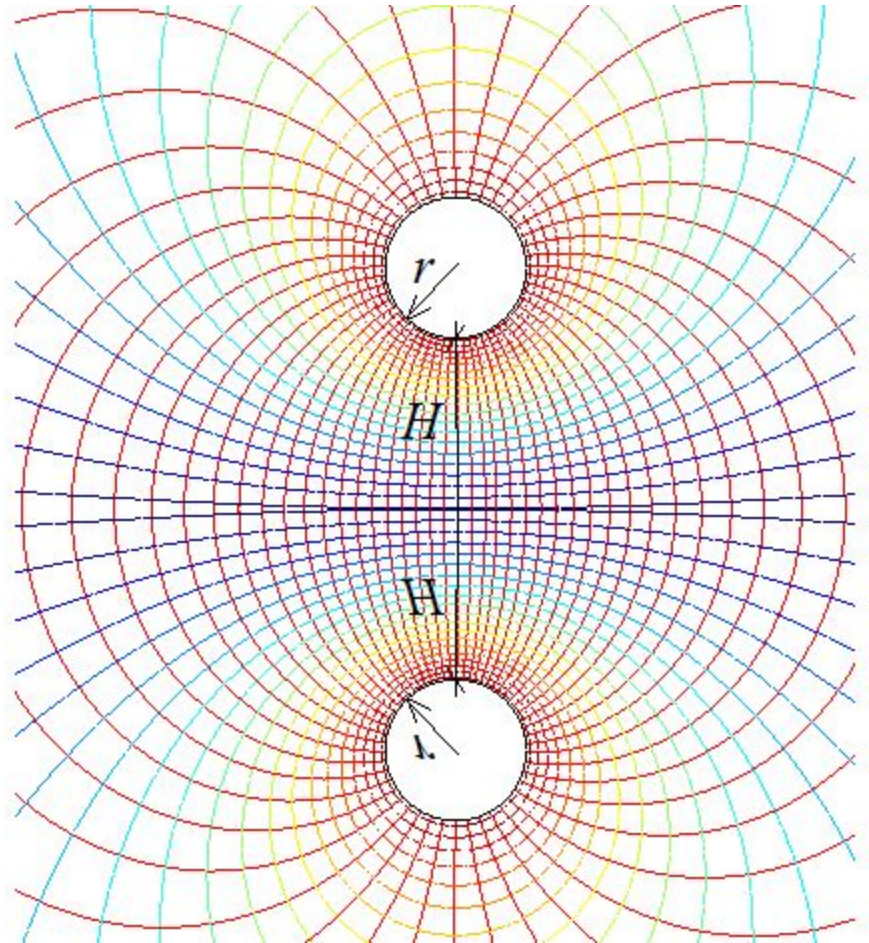
Два параллельных цилиндрических провода



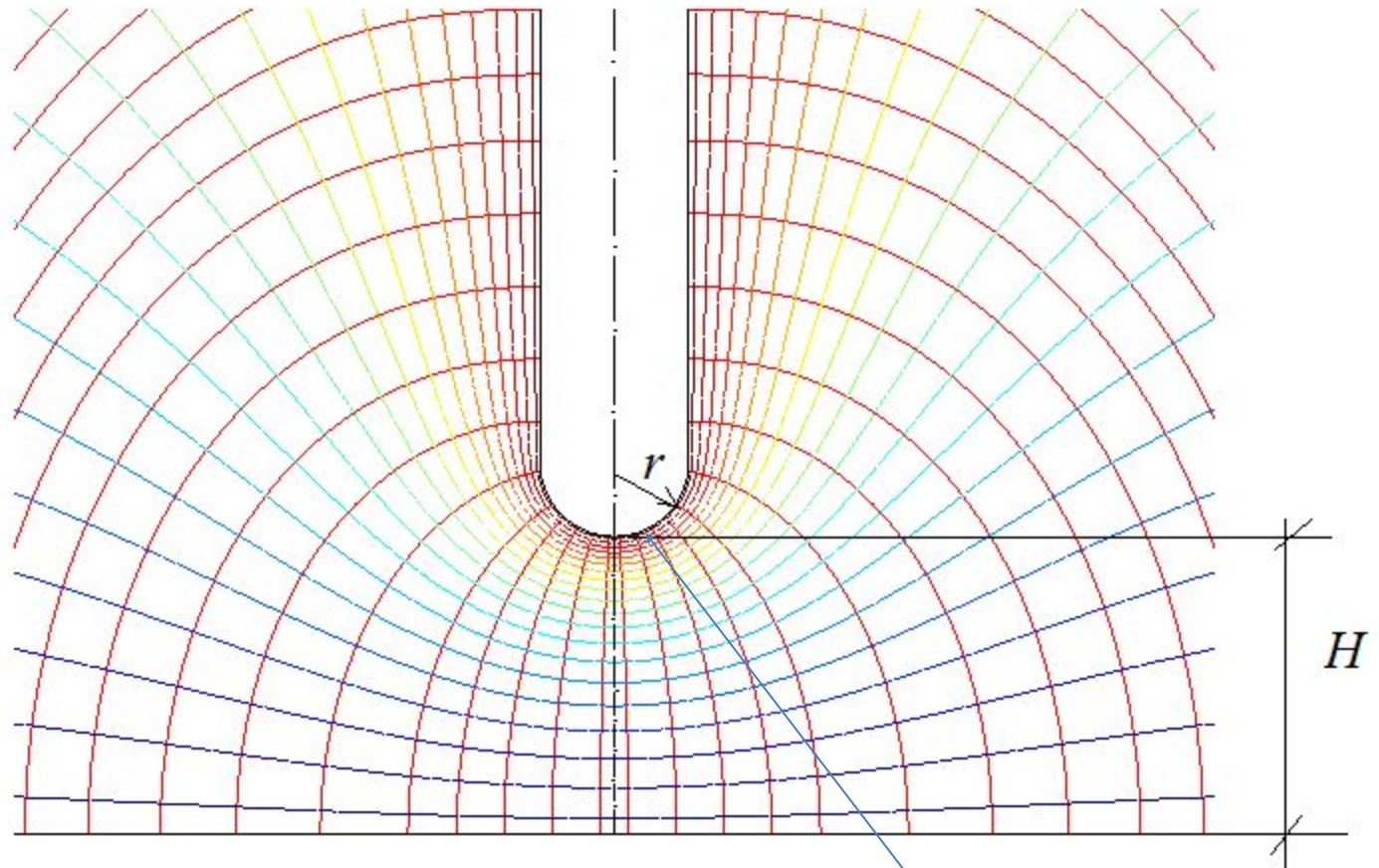
$$E_{cp} = \frac{U}{2H}$$

$$E_{\max} = \frac{U}{2r \ln \frac{4(H+r)}{r}}, \quad r \ll H$$

$$E_{\max} = \frac{0.45U}{r \ln \frac{r+2H}{r}}, \quad r \approx H$$



Стержень плоскость

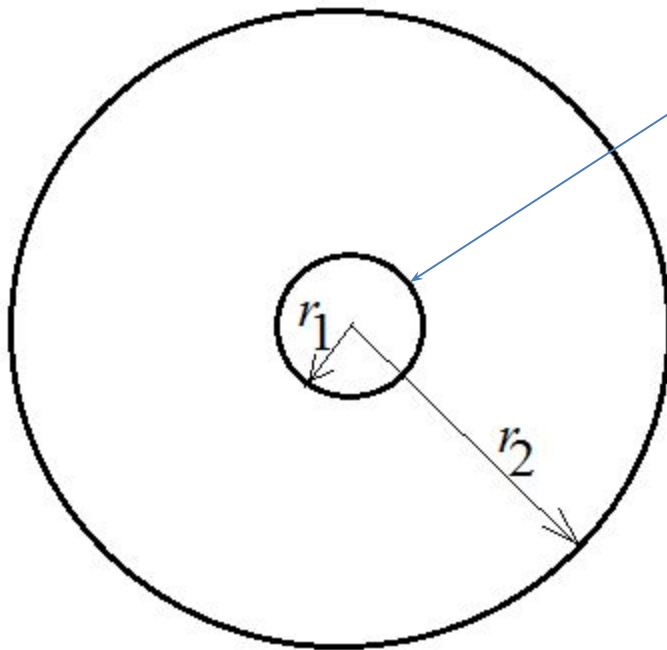


$$E_{cp} = \frac{U}{H}$$

$$E_{\max} \cong \frac{U}{r \ln \frac{4H}{r}}, \quad r \ll H$$

$E_{\max}$

Коаксиал



$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1)$$

$$E_{cp} = \frac{U}{r_2 - r_1}$$

$$E_{\max} = \frac{U}{r_2} \frac{\varepsilon}{\ln \varepsilon}, \quad \varepsilon = \frac{r_2}{r_1} \quad (k1)$$

Коэффициент
неоднородност
и полей

$$K_n = \frac{E_{\max}}{E_{cp}}$$

Таблица 1

Поле	K_n
Однородное	1
Слабо неоднородное	<2
Резко неоднородное	>2