Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Кафедра Техника высоких напряжения электроизоляционная и кабельная техника

Самостоятельно устанавливаемый образовательный стандарт

Направление подготовки бакалавров 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Учебная дисциплина

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Курс лекций

д.т.н. профессор Ю.Н. Бочаров Ю.Н., д.т.н., профессор В.В.Титков, к.т.н., доцент А.П. Ненашев, д.т.н., профессор Кривошеев С.И. к.т.н., доц. Сухичев М.И.

Санкт-Петербург 2018

Разделы курса

-Основы физики электрического пробоя газовых, жидких и твердых диэлектриков

-Основные виды изоляции и изоляционных конструкций установок высокого напряжения

-Испытания и измерения на высоком напряжении

- Перенапряжения в сетях ВН и защита от перенапряжений

Краткое историческое введение

Применение высокого напряжения как метода увеличения передаваемой мощности и снижении потерь при транспорте электроэнергии

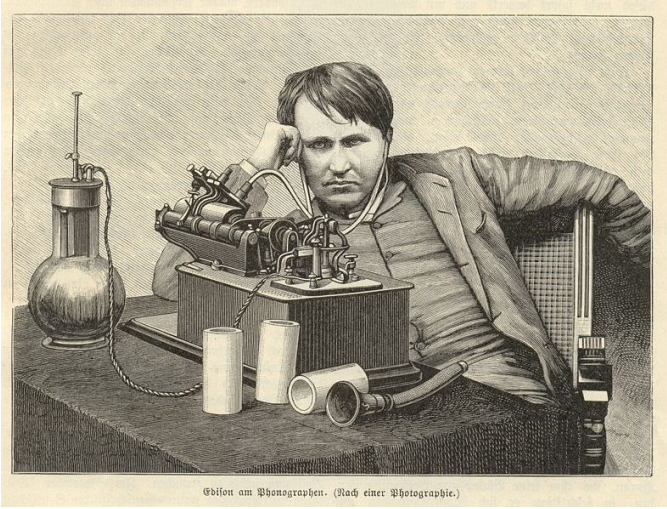
(1) $P = UI$ -передаваемая мощность

(2) $P_{пр} = I^2 R_{пр}$ - потери мощности в проводах сопротивлением Rпр

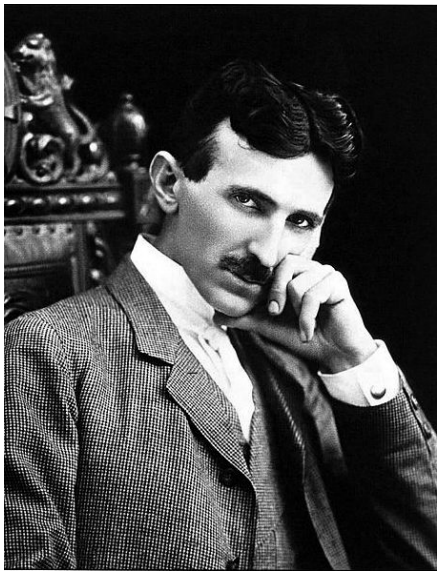
(3) $P_{пр} = \frac{P^2}{U^2} R_{пр}$

При передаваемой мощности P=const потери↓ при U↑

«Война токов» нач. 1881 г. Окончание 2007

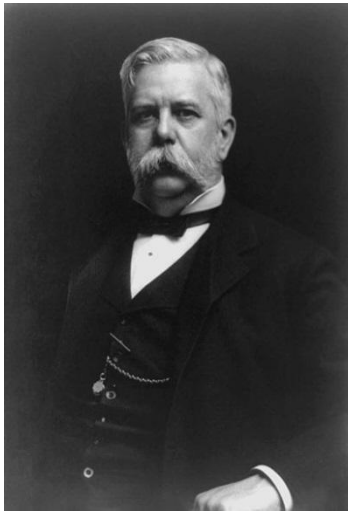


Т.А. Эдисон – разработчик систем передачи электроэнергии постоянным током



Н.Тесла

Теоретически обосновал и практически внедрил передачи переменным током с использование производственных мощностей фирмы Вестинггауз



1879 патент на трехпроводную систему передачи постоянным токои - 110/0/+110 (Эидисон)

1882 – первые электростанции постоянного тока (Эдисон) в Англии и США

1881 демонстрация первого мощного трансформатора для преобразования переменного тока (Л.Голлар, ДЖ.Гиббс)

1882 Первая линия электропередачи 500 В в Массачусетс, США (Вестингауз)

1882 Изобретение многофазного мотора переменного тока (Тесла)

1888 Изобретение счетчика электроэнергии переменного тока (Тесла)

1891 Демонстрация трехфазной системы М.О. Доливо-Добровольского фирма AEG 175 км 8,5 кВ

1893 «Ниагарский проект» Баффало, США (Тесла,Вестигауз)

1912 Россия, Московская губерния ВЛ 30 кВ 1915 – ВЛ 70 кВ

Современная шкала напряжений в РФ:
6 , 10 , 35 кВ – трехфазные сети с изолированной нейтралью
110 , 220 , 330 , 500 , 750 (1150) кВ – трехфазные сети с заземленной нейтралью

Инфраструктура высоковольтного энергоснабжения

Воздушные линии электропередачи ВЛ

1

2

Кабельные линии электропередачи КЛ

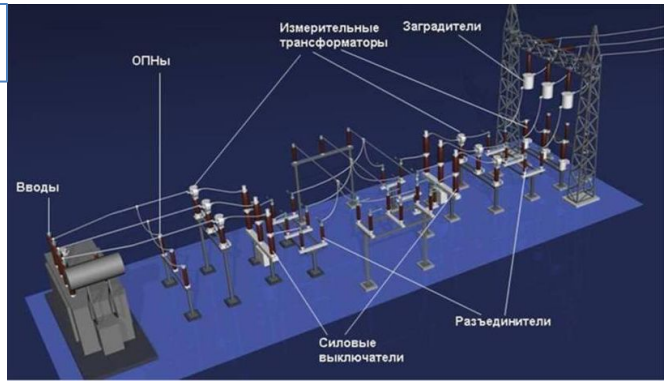
3

4

Преобразовательные подстанции

5

6



Электрический разряд: основные определения

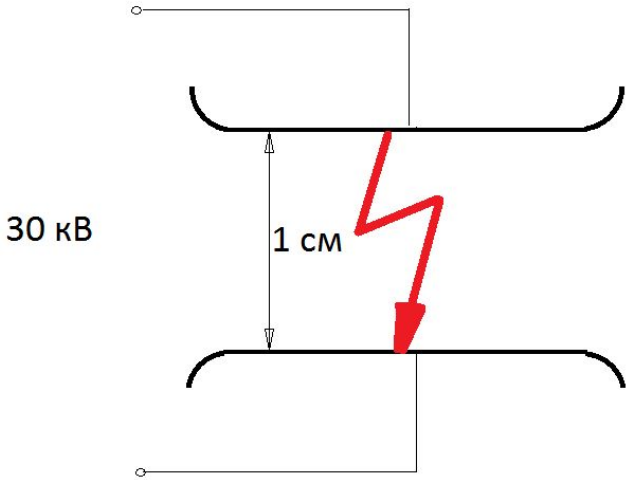
Самостоятельный разряд – разряд, протекающий в отсутствии искусственных ионизующих факторов

Начальное напряжение (Uн) – напряжение обеспечивающее условия самостоятельного разряда

Разрядное напряжение (Up) – напряжение, обеспечивающее существование разряда данного вида (искра, корона и т.д.)

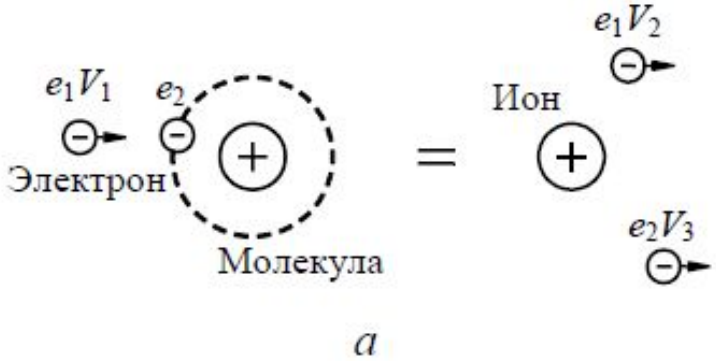
Пробивное напряжение (Uп) – напряжение, обеспечивающее разряд в промежутке, сопровождающийся образование электропроводящего канала

Напряжение пробоя воздушного промежутка длиной **1 см** при нормальных условиях в однородном электрическом поле составляет **30**

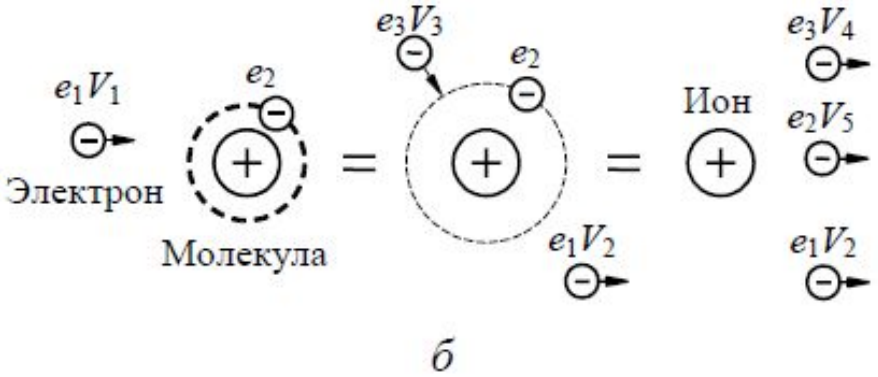


Электрическая прочность воздуха **30 кВ/см**

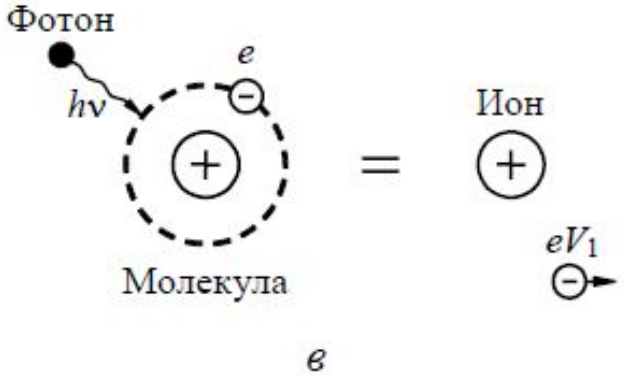
Ионизационные процессы в объеме газа



Ионизация электронным ударом



Ступенчатая ионизация



Фотоионизация

Энергия ионизации (Wi) и возбуждения

Энергии диссоциации и ионизации

Молекула	Энергия диссоциации, эВ	Атом	Энергия ионизации, эВ
O_2	5,17	O	13,6
N_2	9,77	N	14,5

Энергетические условия ионизационных реакций

Непосредственная ионизация электронным ударом

$$\frac{m_e v_e^2}{2} > W_i, \qquad v_e, m_e$$ - скорость и масса электрона

Ионизация возбужденной молекулы

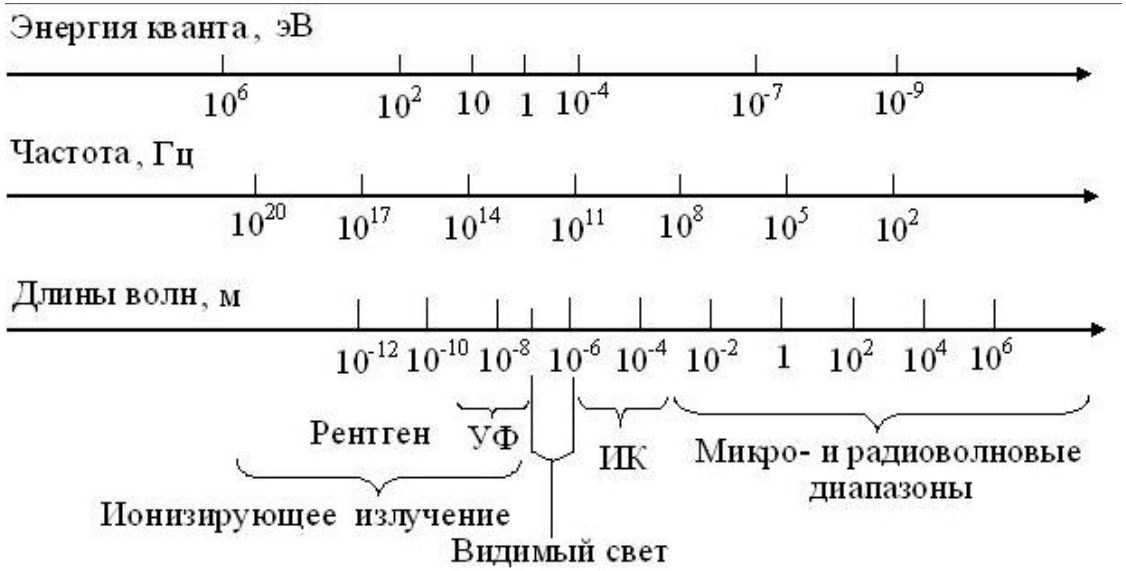
$$\frac{m_e v_e^2}{2} > W_i - W_a$$

Фотоионизация $h\nu > W_i$

ν - частота излучения

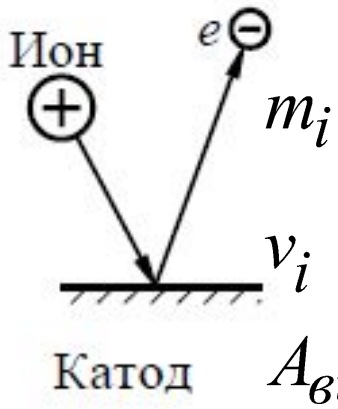
$h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ *Дж* $\cdot c$ -постоянная -Планка

Из возбужденного состояния $h\nu > W_i - W_a$



Поверхностная ионизация (Эмиссия электронов из катода)

1) Бомбардировка поверхности катода положительными ионаи



Энергетическое условие

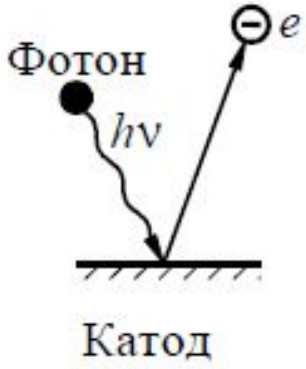
$$\frac{m_i v_i^2}{2} > A_{вых}$$

- масса иона

- скорость иона

$A_{вых} = 4 - 5\ e \cdot V$ - работа выхода электрона из металла

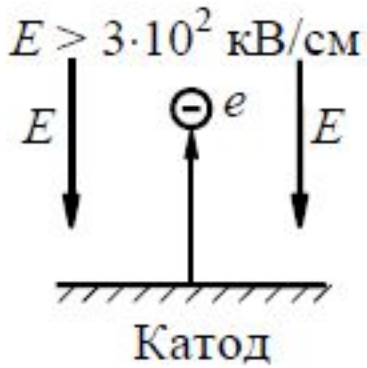
2) Фотоэмиссия с катода



Энергетическое условие

$$h\nu > A_{вых}$$

3) Автоэлектронная эмиссия

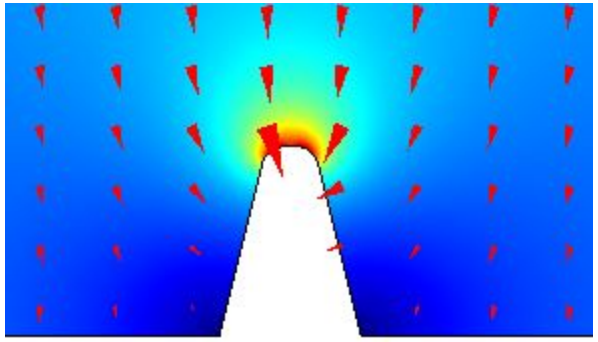


Плотность тока автоэлектронной эмиссии изменяется в широких пределах, достигая $10^8 - 10^{10}\ A/м^2$,

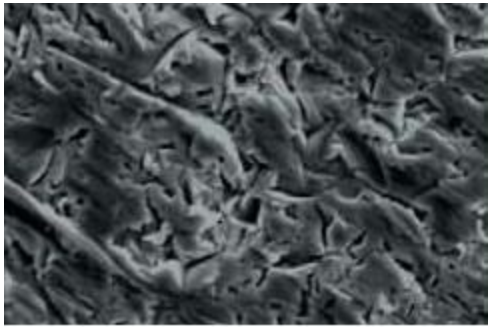
Это соответствует E =10 кВ/см - 1000 кВ/см

Необработанные электроды

Обработанные (полированные) электроды

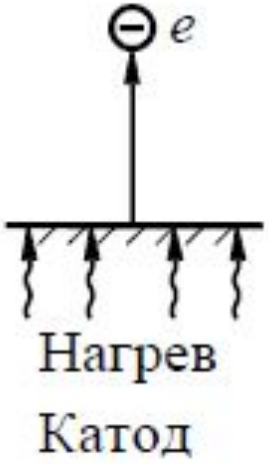


Усиление электрического поля на поверхности микровыступа

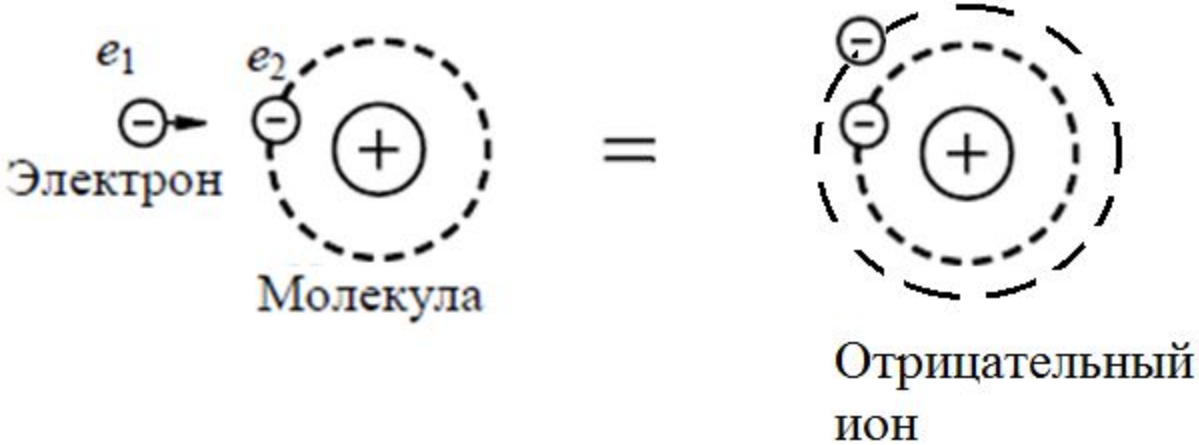


Микрофотография поверхности меди увеличение 2000х

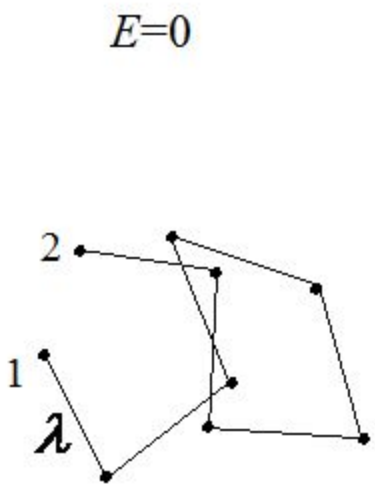
4) Термоэлектронная эмиссия

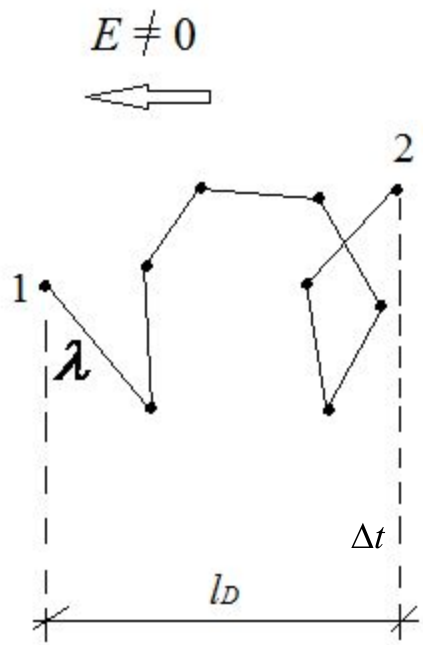


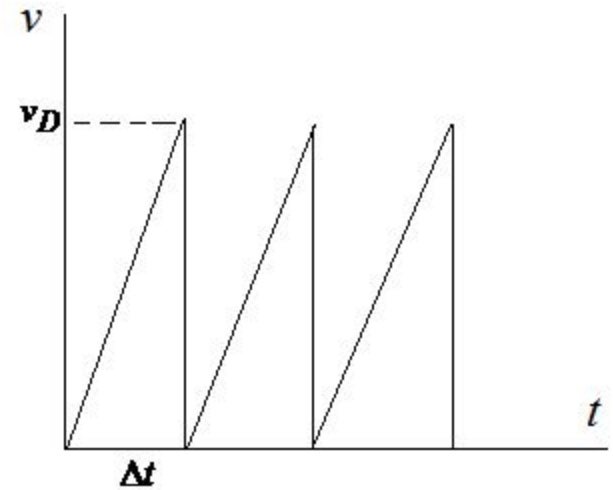
5) Образование отрицательных ионов захватом электрона молекулой (прилипание) – характерно для некоторых молекул – O_2 , H_2O, SF_6 (элегаз)



Газ в электрическом поле. Дрейф заряженных частиц







$$m\frac{v_D}{\Delta t} = qE \qquad \Delta t = \frac{\lambda}{v_T}$$

Скорость дрейфа

$$v_D = 0$$

$$v_D = \frac{l_D}{t_2 - t_1}$$

λ – длина свободного пробега

v_T – «тепловая» скорость частицы

$$v_D = \frac{q\lambda}{mv_T}E$$

$$v_D = K \cdot E$$

K – коэффициент подвижности

Воздух

Ионы К= *2,2 – 2,5* см^2/(В·с)

Электроны К= *220 – 250* см^2/(В·с)

Для напряженности электрического пробоя воздуха дрейфовые скорости составляют:

Электроны $2 \cdot 10^5$ м/с Ионы $2 \cdot 10^3$ м/с

Ионизация электронным ударом . Электронная лавина

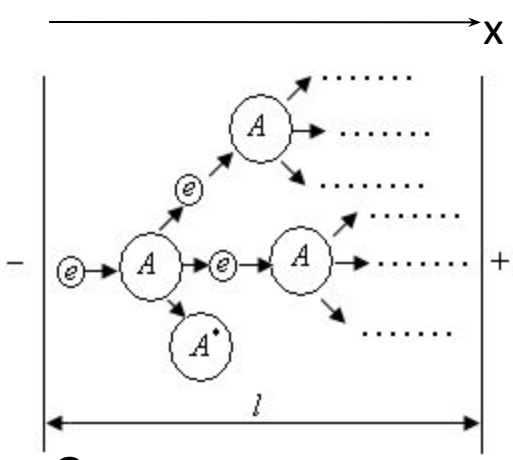


Схема формирования лавины электронов

N_e - число электронов в лавине

α - коэффициент ударной ионизации число ионизаций, совершаемых одним электроном на единице длины пути вдоль электрического поля

Уравнение числа электронов в лавине

(1) $$\frac{dN_e(x)}{dx} = \alpha N_e(x)$$

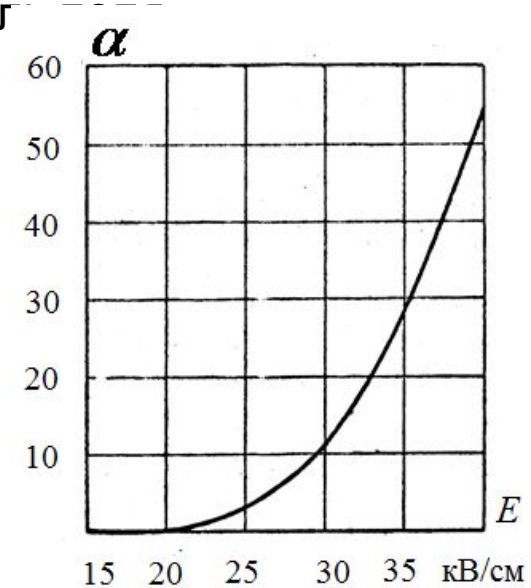
x – расстояние пройденное лавиной вдоль

(2) $$N_e(x) = e^{\alpha x}$$

(3) $$\boxed{\frac{\alpha}{p} = Ae^{-\frac{Bp}{E}}}$$ - формула Таунсенда

где A = 8,5 1/см ·мм рт. ст, B = 250 в/см·мм рт. ст для E/p = 20–150 в/см·мм рт. ст. и A = 14,6 1/см ·мм рт. ст, B = 365 в/см ·мм рт. ст для E/p = 150–160 в/см ·мм рт. ст.

Напряженность пробоя воздуха E = 30 кВ/см при этом $\alpha = 10$ 1/см



Коэффициент ударной ионизации в воздухе при нормальных условиях