

Расчетная математическая модель пробивного напряжения и формы газового разряда в промежутках ускорителя

К.А. Резвых, А.И. Глотов, В.А. Романов
ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия

Расчет пробивного напряжения U_{br} методом базы [1, 2] состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью результатов базового эксперимента $U_{br}(p_{20}, E_{max}/U, S_{eff}, R_{av}, L)$, где p_{20} – давление газа, приведенное к 20° С, E_{max}/U – максимальная напряженность поля на единицу приложенного напряжения, S_{eff} – эффективная площадь электродов, R_{av} – радиус средней кривизны поверхности, L – расстояние между электродами, вычисляется асимптотическая пробивная напряженность в однородном поле, играющая роль собственной внутренней электрической прочности газа в данных условиях. На втором этапе собственная прочность пересчитывается для геометрии заданного промежутка.

Расчетная методика предполагает предварительное приведение базового пробивного напряжения к стандартным условиям. Для этого используются три константы, три отношения (relation) пробивных напряжений U_{br} : к напряжению пробоя в нормирующем газе N_2 – k_{rel} , к напряжению при 100%-ном кондиционировании (conditioning) – k_{ctm} , к напряжению при положительной полярности $U_{br.pos}$

$$k_{pol} = \frac{U_{br.neg}}{U_{br.pos}} \cdot$$

Формализация экспериментальных результатов со времени открытия полярного эффекта (Ф. Пашен, 1889 г.) вызвала наибольшие трудности. Ряд авторов рассматривают лишь случай $k_{pol} < 1$, отбрасывая аномальные пробои, малые (до 0,4 МПа) и большие (1,5 – 2 МПа) давления газа. Как показано в работе [3], величина коэффициента k_{pol} , а также наличие и отсутствие пространственных зарядов в промежутке зависят от одних и тех же параметров: давления газа и коэффициента неоднородности поля k_{non} (отношение максимальной и средней напряженностей электростатического поля).

С помощью теоретической модели¹ полярного эффекта в виде функции

$$k_{pol} = F(p_{20}, k_{non})$$

удалось оценить полярный эффект, а также систематизировать электрические явления в газе при давлениях выше 0,01 МПа. Развитию модели посвящена данная работа.

Теоретическая модель полярного эффекта

В слабо неоднородном поле коэффициент полярности $k_{pol} \leq 1$.

Сильно неоднородным называется поле с коэффициентом неоднородности $k_{non} > k_{ldr}$, где k_{ldr} – пороговое значение, выше которого в промежутке коронный разряд предшествует искровому и в промежутке начинается положительный лидерный (leader) пробой. При этом коэффициент $k_{pol} > 1$. Возрастающая неоднородность способствует появлению, а возрастающее давление – исчезновению пространственных зарядов. Объединение двух зависимостей: $k_{pol}(p_{20})$ при $k_{non} = const$ и $k_{pol}(k_{non})$ при $p_{20} = const$ было названо теоретической моделью (рис. 1, 2).

Границы зон на шкале неоднородности поля

Границы средней области на рис. 2, обозначенные k_{uni} , k_{ldr} , названы порогами, так как они фиксируют смену механизма пробоя. Главным признаком нижнего порога k_{uni} и порога $p_{max.uni}$ (рис. 1) является скачок коэффициента полярности, например в SF_6 при давлении 0,25 МПа от 1 до 0,64 и при давлении 0,5 МПа от 0,97 до 0,72, если в промежутке «шар – плоскость» $k_{non} = 1,14$ и $k_{non} = 1,29$. В этом случае $k_{uni} = 1,14$ и $p_{max.uni} = 0,5$ МПа.

Можно заметить, что облучение промежутка ртутной лампой (рис.8 работы [4]) начинает изменять (увеличивать) напряжение аномального положительного и аномального отрицательного пробоя при вполне определенной величине коэффициента неоднородности. Следовательно, данная неоднородность поля есть условие возникновения пространственного заряда (charge) и может быть названа пороговым коэффициентом заряда k_{ch} соответствующей полярности (табл. 1).

¹ Концепция теоретической модели была изложена в докладе на XIII международной конференции по электростатическим ускорителям, 25 – 28 мая 1999 г., Обнинск.

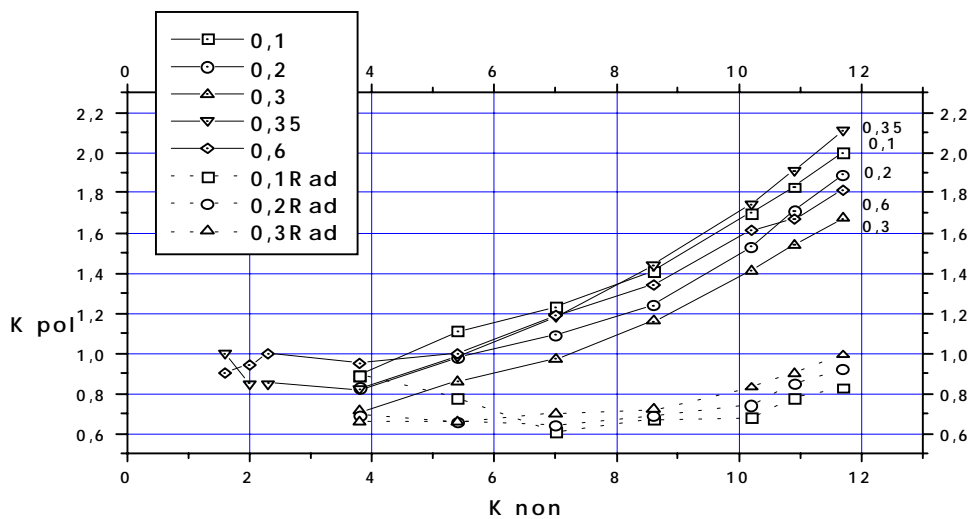


Рис. 3. Зависимость коэффициента полярности от неоднородности поля. Азот, промежуток «шар–плоскость», $R = 2,5$ мм, данные из работы [4]. Цифры на кривых обозначают давление в МПа.

- - - - при облучении ртутной лампой, — — — без облучения.

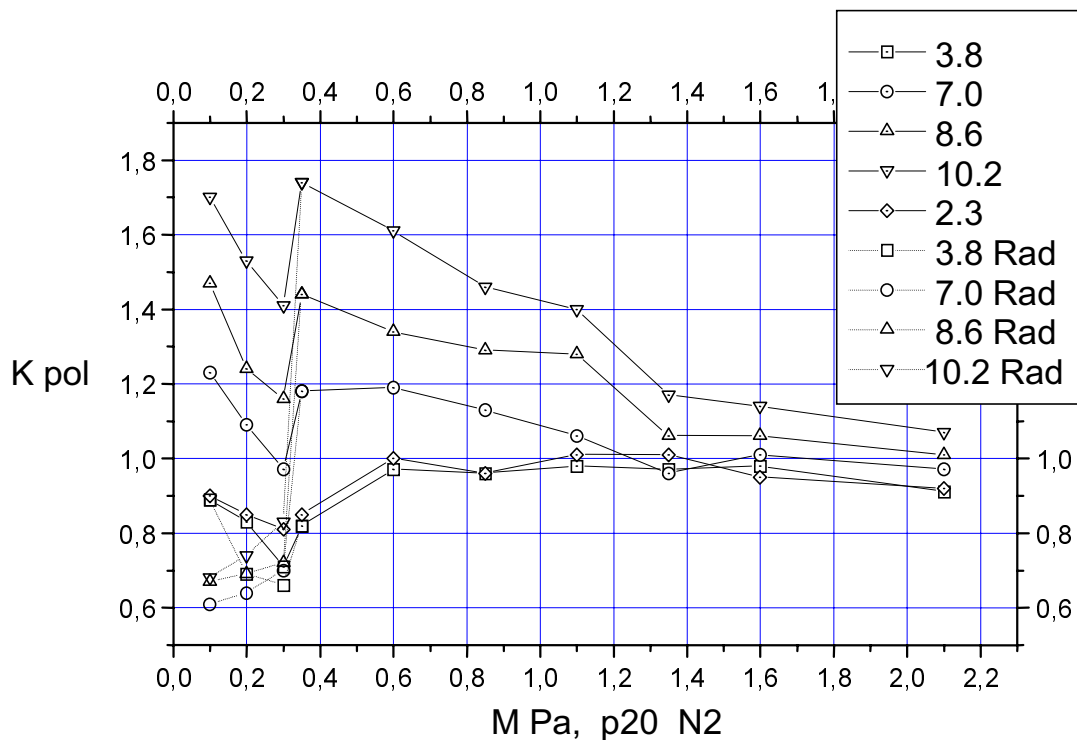


Рис. 4. Зависимость коэффициента полярности от давления газа. Азот, промежуток «шар–плоскость», $R = 2,5$ мм [4]. Цифры на кривых обозначают величину коэффициента неоднородности поля.

- - - - при облучении ртутной лампой, — — — без облучения.

С увеличением промежутка L и неоднородности поля (рис. 3) газовый разряд из зоны аномального положительного пробоя переходит в зону положительного лидера. Тогда порог k_{ldr} можно рассматривать в качестве порога исчезновения положительного $k_{ldr, pos}$ или отрицательного $k_{ldr, neg}$ пространственных зарядов.

Таблица 1. Зависимость порогов k_{ch} и k_{ldr} на шкале неоднородности поля при $p_{20} = const$, $R_{ш} = 2,5$ мм.

p_{20} , МПа,	0,1 N ₂	0,2	0,3	0,35	0,6	0,85	1,1	1,35	1,6 N ₂	0,1 Air	0,6 Air
$k_{ch, pos}$	5,0	3,4	2,7	–	–	–	–	–	–	5,0	–
$k_{ldr, pos}$	4,6	5,5	7,2	–	–	–	–	–	–	–	–
$k_{ldr, pos, Rad}$	14,0	12,0	11,6	–	–	–	–	–	–	–	–
$k_{ch, neg}$	–	–	–	–	5,0	5,4	6,2	–	–	–	9,0
k_{ldr}	–	–	–	–	5,5	6,2	6,6	–	7,0	4,2	7,0

Из табл. 1 можно видеть, что для азота (N₂) и воздуха (Air) зоны аномального и лидерного пробоев перекрываются. Погрешность определения порогов около 10 %.

Границы зон на шкале давления. Эффективная геометрия пространственного заряда

Средняя зона на рис. 1 имеет коэффициент $k_{pol} < 1$. Порог максимального давления $p_{max, uni}$ определяется по скачку коэффициента полярности. Порог максимального давления в неоднородном поле $p_{max, non}$, иллюстрируемый на рис. 4, и порог p_{micro} , отмечающий переход к положительному лидерному пробую под влиянием микрогеометрии поверхности, фиксируем в экспериментах по величине $k_{pol} = 1$.

Порог возникновения пространственного заряда в аномальном пробое p_{ch} , подобно пороговому коэффициенту k_{ch} , соответствует началу влияния облучения промежутка на пробивное напряжение. При этом в работе [4] плотность тока с электрода была около 1 мкА/см². В неблагоприятных для образования заряда условиях облучение не изменяет пробивного напряжения.

Окончание аномального пробоя газа фиксируем по резкому спаду, провалу (recession) пробивного напряжения соответствующей полярности с помощью порога p_{res} .

Таблица 2. Зависимость порогов возникновения p_{ch} и исчезновения p_{res} пространственных зарядов на шкале давления p_{20} при $k_{non} = const$ и радиусе шара $R_{ш} = 2,5$ мм в промежутке «шар – плоскость».

k_{non}	2,3 N ₂	2,7	3,4	5,0	5,4	6,2	6,6 N ₂	5,0 Air	9,0 Air
$p_{ch, pos}$	–	0,30	0,20	0,10	–	–	–	0,1	–
$p_{res, pos}$	–	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,6	–
$p_{ch, neg}$	–	–	–	0,6	0,85	1,1	–	–	0,6
$p_{res, neg}$	–	–	–	1,35	1,35	1,35	1,35	–	0,85

Согласно табл. 1 и 2, пороги заряда k_{ch} , $p_{ch, pos}$, $p_{ch, neg}$ в воздухе и азоте очень подобны. Пороги спада заметно отличаются. Зоны существования положительного пространственного заряда в воздухе шире, а отрицательного заряда уже, чем в азоте.

Помимо порогов спада, в сильно неоднородном поле существует порог исчезновения зарядов в результате повышения давления – $p_{max, non}$. Кроме заряда аномальных пробоев, в промежутке одновременно существуют другие заряды.

Замечательный факт – независимость порогов спада от увеличения длины промежутка «шар-плоскость». Эффективная геометрия пространственного заряда неизменна снаружи и «изнутри», так как коронный разряд прекращается на шаре при неизменном давлении. Облако зарядов имеет некоторую закономерную, повторяющуюся форму. Рассмотрение порогов спада для промежутков «стержень – плоскость» и «два параллельных цилиндра против плоскости» [5] позволяет сделать вывод: два параметра, хотя бы слабо описывающие эффективную форму пространственного заряда – это радиус R_{av} средней (average) кривизны поверхности коронирующего электрода и коэффициент неоднородности поля k_{non} , если он возрастает в 3–8 раз. Эмпирические формулы имеют вид

$$p_{res, pos} = 0,350 R_{av}^{-0,256} k_{non}^{0,147}, \quad \sigma = 18,4 \%, \quad R_{av} = 0,22 - 2,5 \text{ мм}, \quad k_{non} = 2,7 - 100,5, \text{ N}_2;$$

$$p_{res, pos} = 1,251 R_{av}^{-0,328} k_{non}^{-0,194}, \quad \sigma = 22,3 \%, \quad R_{av} = 0,02 - 12,5 \text{ мм}, \quad k_{non} = 2,0 - 318,1, \text{ воздух};$$

$$p_{res, pos} = 0,475 R_{av}^{-0,495} k_{non}^{-0,0903}, \quad \sigma = 31,2 \%, \quad R_{av} = 0,25 - 30,0 \text{ мм}, \quad k_{non} = 2,6 - 142,3, \text{ SF}_6;$$

где σ – среднее квадратическое отклонение экспериментальных результатов от эмпирической кривой.

Заключение

Теоретическая модель полярного эффекта позволяет систематизировать электрические явления в газе относительно двух переменных. Создается наглядная картина газового разряда, которая помогает пользователю выбрать базовый эксперимент для расчета пробивного напряжения в том диапазоне параметров, в котором оценивается электрическая прочность.

Облучение увеличивает пробивное напряжение промежутка только в зоне аномальных пробоев.

Наличие пространственных зарядов в промежутке удалось локализовать по двум переменным теоретической модели полярного эффекта.

В общем виде оценено влияние геометрии пространственного заряда на порог спада положительного пробивного напряжения для воздуха, азота и элегаза.

Список литературы

1. Резвых К.А. – Труды XII междунар. конф. по электростатическим ускорителям, Обнинск: изд. ГНЦ РФ ФЭИ, 1999, с. 256-262.
2. Rezvykh K.A., Romanov V.A. Gases breakdown voltage calculation for the case of accelerator nonuniform fields by the method of base, //Nucl. Instr. Meth., A423(1999)203-212.
3. Резвых К.А., Готов А.И. Количественная оценка влияния полярности на пробивное напряжение газовых промежутков ускорителя. Препринт ФЭИ-2842, Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2000, с.29.
4. Gänger B. //Archiv für Elektrotechnik, 1940, Bd 34, S. 633–652.
5. Богданова Н.Б., Попков В.И. // Электричество, 1973, № 8, с. 27-34.