

Математическая модель полярного эффекта при пробое газовых промежутков ускорителя

К.А. Резвых, А.И. Глотов

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия

Определение наибольшего рабочего напряжения и проблема защиты твердой опорной изоляции ускорителей от волн перенапряжения остаются актуальными. Защитные искровые разрядники снижают уровень перенапряжений и рассеивают энергию пробоя в изолирующем газе. В то же время система последовательно соединенных разрядников включена параллельно промежутку «кондуктор–бак» и не должна ограничить наибольшее рабочее напряжение ускорителя.

Очевидно, что пробой начинается с электрода, который находится при наиболее слабой полярности напряжения. Например, в слабо неоднородном поле – на отрицательном электроде, в сильно неоднородном – на положительном [1, 2]. Но, как можно видеть из рис. 1 [3], и это правило нарушается в структуре высоковольтного ускорителя при высоких давлениях газа.

Количественные рекомендации относятся к коэффициенту отрицательной полярности

$$k_{pol} = U_{br.neg} / U_{br.pos},$$

где $U_{br.neg}$, $U_{br.pos}$ – пробивные отрицательное и положительное напряжения. В среде шестифтористой серы SF_6 в работе [4], с.37, предложено принимать коэффициент отрицательной полярности равным 0,9. Для генератора Ван-де-Граафа [3] имеем

$$k_{pol} = 0,95 p_{20}^{0,024}, \quad \sigma = 0,6\%, \quad p_{20} = 0,25 - 1,6 \text{ МПа}, \quad N_2 + 50\% \text{ CO}_2,$$

$$k_{pol} = 0,80 p_{20}^{-0,003}, \quad \sigma = 3,7\%, \quad p_{20} = 0,25 - 0,85 \text{ МПа}, \quad SF_6,$$

где p_{20} – абсолютное давление в МПа, приведенное к 20° С; σ – среднее квадратическое отклонение экспериментальных результатов от эмпирической кривой. Указанная выше оценка для элегаза на 12% завышает отрицательное пробивное напряжение. Такая погрешность при выборе защиты ускоряющей трубки или габаритов и стоимости оборудования напряжением 1 МВ и более представляется не вполне оправданной.

Теоретическая модель полярного эффекта для пробивного напряжения газового изолятора предложена в работах [5, 6] впервые. Модель представляет известные типы газового разряда в удобном для пользователя виде. Создание математической модели, кроме того, предполагает

- установить аргументы, от которых зависит коэффициент k_{pol} , и определить силу их воздействия,
- найти в общем виде предельные значения аргументов (пороги), в которых механизм пробоя сохраняется неизменным,
- провести верификацию расчетных формул.

До сих пор казалось, что тесная связь явлений полярности с присутствием пространственного заряда в изоляционном промежутке предопределяет серьезные вычислительные трудности.

Коэффициенты полярности

В поле, близком к однородному, полярный эффект и пространственный заряд отсутствуют. Можно предположить, что в неоднородном поле коэффициент полярности будет зависеть от тех же параметров, что и пробивное напряжение при той и другой полярностях. То есть полярный эффект в газовом диэлектрике до некоторой степени будут отражать формулы вида

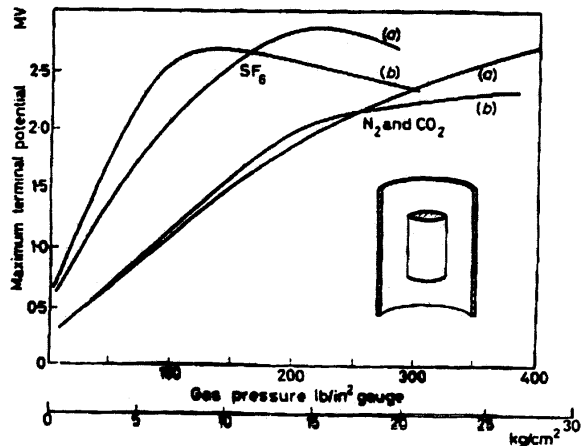


Рис. 1. Постоянное пробивное напряжение между кондуктором генератора Ван-де-Граафа и его баком давления: (а) – отрицательное, (б) – положительное напряжение.

$$k_{pol} = F\left(\frac{E_{max}}{U}, S_{eff}\right) \text{ при } p_{20} = const,$$

где E_{max}/U и S_{eff} – максимальная напряженность электростатического поля, отнесенная к расчетной разности потенциалов U , и эффективная площадь электродов, на которой $E \geq 0,8 \times E_{max}$.

Сравнение двух семейств кривых, образующих теоретическую модель полярного эффекта, (рис.3, 4 из работы [6]):

$$\begin{aligned} k_{pol} &= F(k_{non}) \text{ при } p_{20} = const, \\ k_{pol} &= F(p_{20}) \text{ при } k_{non} = const, \end{aligned}$$

показывает, что первое семейство для использования в расчетах, так как в нем отсутствуют крутые спады и подъемы. Эмпирические зависимости оказались существенно различными для областей слабо (weak) и сильно (strong) неоднородных полей, а также в присутствии облучения (Rad). Приведем примеры формул, взятые из работы [5], стр. 20-23, где давление в мегапаскалях указывается в первых скобках.

Воздух, смеси N_2/CO_2

$$k_{pol.weak}(0,1) = 0,958 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-0,0273} (S_{eff})^{-0,0156}, \sigma = 3 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,01 - 0,5 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 3000-0,3 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.str}(0,1) = 1,146 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{0,0489} (S_{eff})^{0,0133}, \sigma = 6,5 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,01 - 0,63 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 3000-2,9 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.weak}(1,1) = 0,943 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-0,00929} (S_{eff})^{0,00338}, \sigma = 3,6 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,01 - 1,3 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 3000-0,04 \text{ см}^2.$$

Азот

$$k_{pol.weak}(0,1) = 0,960 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-0,0010} (S_{eff})^{-0,0014}, \sigma = 2,9 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,005 - 0,5 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 90800-0,3 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.weak.Rad}(0,1) = 421,6 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{6,738} (S_{eff})^{0,967}, \sigma = 5,5 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,43 - 0,48 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 0,39-0,3 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.str}(0,1) = 0,0201 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-4,260} (S_{eff})^{-0,666}, \sigma = 3 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,43 - 0,5 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 0,39-0,3 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.weak+2}(1,1) = 0,907 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-0,0894} (S_{eff})^{-0,0335}, \sigma = 8,9 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,005 - 1,3 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 90800-0,04 \text{ см}^2.$$

SF_6

$$k_{pol.weak}(0,5) = 0,811 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{0,0476} (S_{eff})^{0,0205}, \sigma = 7,8 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,01 - 0,13 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 3000-0,2 \text{ см}^2;$$

$$k_{pol.weak}(1,0) = 0,670 \left(\frac{E_{max}}{U}\right)^{-0,0072} (S_{eff})^{0,0384}, \sigma = 8,2 \%, \quad \frac{E}{U} = 0,01 - 0,16 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 3000-0,3 \text{ см}^2.$$

Пороги на шкале неоднородности поля

Пороговые величины также можно выразить через параметры промежутка. При недостатке данных приводятся отдельные значения порогов.

Воздух, смеси N_2/CO_2

$$k_{uni} = 1,420 L^{0,192} (R_{av})^{-0,109}, \sigma = 2,4 \%, \quad L = 1-27 \text{ мм}, \quad R_{av} = 2,5-22 \text{ мм}.$$

$$k_{ch.pos} = 5,0, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr.pos} = 4,2, \quad (k_{pol} = 1), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1 \text{ МПа}.$$

$$k_{ch.pos} = 5,0, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1 \text{ МПа}.$$

$$k_{ch.neg} = 9,0, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,6 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr} = 7,0, \quad (k_{pol} = 1), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,6 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr} = 5,45 (p_{20})^{1,29}, \sigma = 18 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad 0,6 < p_{20} < 2,1 \text{ МПа}.$$

Можно видеть, что пороги аномального и лидерного пробоев перекрываются. В этом нет противоречия. Разные пространственные заряды воздействуют на пробой как бы независимо и не перемешиваются.

Азот

$$k_{ch.pos} = 1,38 (p_{20})^{-0,560}, \sigma = 0,2 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1-0,3 \text{ МПа}, \quad p_{20} < 0,35 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr.pos} = 16,2 (p_{20})^{0,573}, \sigma = 13,5 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1-0,3 \text{ МПа}, \quad p_{20} < 0,35 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr.pos.Rad} = 9,24 (p_{20})^{-0,177}, \sigma = 2 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,1-0,3 \text{ МПа}, \quad p_{20} < 0,35 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr.pos} = 6,34 (p_{20})^{0,245}, \sigma = 2 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,6-1,6 \text{ МПа}, \quad p_{20} > 0,35 \text{ МПа}.$$

$$k_{ch.neg} = 5,89 (p_{20})^{0,347}, \sigma = 2,7 \%, \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad p_{20} = 0,6-1,1 \text{ МПа}, \quad p_{20} > 0,35 \text{ МПа}.$$

$$k_{ldr.dc} = 6,43 (p_{20})^{0,218}, \sigma = 6,2 \%, \quad (k_{pol} = 1), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad 0,35 < p_{20} < 2,1 \text{ МПа}.$$

SF₆

$$k_{uni} = 2,120 L^{0,470} (R_{av})^{-0,481}, \quad \sigma = 12,8 \%, \quad L = 6-267 \text{ мм}, \quad R_{av} = 9,5-191 \text{ мм}.$$
$$k_{ldr} > 7,5.$$

В известных авторам экспериментах с SF₆ положительный лидерный пробой не был достигнут.

Пороги на шкале давления газа

$$p_{max.uni} = 0,191 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-0,371} (S_{eff})^{-0,166}, \quad \sigma = 0,8 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,01-0,5 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 3000-229 \text{ см}^2.$$

$$p_{ch.pos} = 0,1 \text{ МПа}, \quad (k_{non} = 5), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad L = 11 \text{ мм}, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,455 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{wave} = 1,018 \times 10^8 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{16,29} (S_{eff})^{7,53}, \quad \sigma = 14,3 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 50,0-0,2 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,00003-1,6 \text{ см}^2.$$

$$p_{rcs.pos} = 0,6 \text{ МПа}, \quad (k_{non} = 5), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad L = 11 \text{ мм}, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,455 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{rcs.pos} = 1,251 (R_{av})^{-0,328} (k_{non})^{-0,194}, \quad \sigma = 22,3 \%, \quad R_{av} = 9,02-12,5 \text{ мм}, \quad k_{non} = 2,0-318,1.$$

$$p_{ch.neg} = 0,6 \text{ МПа}, \quad (k_{non} = 9), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad L = 21 \text{ мм}, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,429 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{rcs.neg} = 0,85 \text{ МПа}, \quad (k_{non} = 9), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad L = 21 \text{ мм}, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,429 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{max.non} = 3,00 \times 10^{-6} \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-8,95} (S_{eff})^{-5,37}, \quad \sigma = 41,4 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,12-0,47 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 5,7-0,35 \text{ см}^2.$$

$$p_{knee} = 2,24 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-0,0450} (S_{eff})^{-0,121}, \quad \sigma = 29 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,0046-0,11 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 10000-101 \text{ см}^2.$$

$$p_{micro} = 3,83 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{0,377} (S_{eff})^{0,123}, \quad \sigma = 3 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,01-0,1 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 3000-11 \text{ см}^2.$$

Можно проверить, что погрешность формулы для $p_{rcs.pos}$ составляет около 30 %.

N₂

$$p_{max.uni} = 0,530 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-0,231} (S_{eff})^{-0,0546}, \quad \sigma = 34 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,005-1,2 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 90800-0,04 \text{ см}^2.$$

$$p_{ch.pos} = 15,5 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{6,30}, \quad \sigma = 13 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,46-0,54 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{wave} = 10,71 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{2,80} (S_{eff})^{1,342}, \quad \sigma = 9,1 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,42-4,2 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4-0,004 \text{ см}^2.$$

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

$$p_{ch.neg} = 1,82 \times 10^{-7} \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-19,1} (S_{eff})^{-5,37}, \quad \sigma = 5,3 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,44-0,455 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{rcs.neg} = 1,35 \text{ МПа}, \quad (k_{non} = 9), \quad R_{av} = 2,5 \text{ мм}, \quad L = 21 \text{ мм}, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,429 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,4 \text{ см}^2.$$

$$p_{max.non} = 3,82 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-26,43}, \quad \sigma = 6,9 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,43-0,45 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 0,004 \text{ см}^2.$$

SF₆

$$p_{max.uni} = 1,6 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{0,771} (S_{eff})^{0,0153}, \quad \sigma = 9,2 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,01-0,5 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 3000-1 \text{ см}^2.$$

$$p_{wave.pos} = 0,493 \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{1,6} (S_{eff})^{0,56}, \quad \sigma = 46,3 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,037-4,2 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 56-0,004 \text{ см}^2.$$

$$p_{wave.neg} = 1,015 \times 10^{-5} \left(\frac{E_{max}}{U} \right)^{-4,67} (S_{eff})^{0,250}, \quad \sigma = 19,7 \%, \quad \frac{E_{max}}{U} = 0,16-0,2 \text{ мм}^{-1}, \quad S_{eff} = 19,6-6,2 \text{ см}^2.$$

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

После того как коэффициент полярности и большинство из пороговых величин описаны формулами, модель можно назвать математической.

Следует заметить, что в зоне существования пространственного заряда при аномальном пробое существует еще один порог – порог p_{wave} волнообразного отклонения пробивного напряжения от закона подобия [5]:

$$p_{ch} < p_{wave} < p_{rcs}.$$

Это означает, что в начале аномального пробоя, до порога волны, эффективная форма пространственного заряда близка к форме электрода. С повышением напряжения плотность заряда возрастает, и он образует свою собственную форму. Пространственный заряд и эффективная площадь электродов суть главные причины отклонений от закона Пашена.

Верификация расчетных формул при отсутствии пространственного заряда

В воздухе и смеси N_2/CO_2 (50/50 %) для промежутка «шар - плоскость» и радиусов шара 25 мм [7], 31; 8 и 9,5 мм [8] экспериментаторы не обнаружили полярный эффект. Полагая экспериментальное значение $k_{pol.exp} = 1$, определим по формулам расчетное (calculate) значение k_{calc} и таким образом оценим погрешность расчета:

$$\delta k_{pol} = \frac{k_{calc} - k_{pol.exp}}{k_{pol.exp}} 100\%.$$

Таблица 1. Погрешность расчетных значений коэффициента полярности.

p_{20} , МПа,	0,1	0,35	0,6	0,85	1,1	1,6	2,1
$k_{calc}(R25,L28)$	0,993	1,003	0,926	0,9995	0,97	0,97	1,006
$\delta k_{pol}(R25)$	-0,7%	+0,3%	-7,4%	-0,05%	-3%	-3%	+0,6%
$k_{calc}(R32,L51)$	0,991	1,006	0,943	1,001	0,98	0,98	1,025
$\delta k_{pol}(R32)$	-0,9%	+0,6%	-5,7%	+0,1%	-2%	-2%	+2,5%
$k_{calc}(R9,5,L51)$	0,990	0,97	0,926	0,97	0,97	0,96	0,951
$\delta k_{pol}(R9,5)$	-1,0%	-3%	-7,4%	-3%	-3%	-4%	-5%
$k_{calc}(R9,5,L25)$	0,992	0,979	0,916	0,973	0,965	0,959	0,955
$\delta k_{pol}(R9,5)$	-0,8%	-2,1%	-8,4%	-2,7%	-3,5%	-4,1%	-4,5%
Примечание	$p_{max.uni}$	$k_{pol} = \max$	$p_{res.pos}$	$k_{pol} < 1$	$k_{pol} < 1$	$k_{pol} < 1$	$\sim p_{micro}$

Расчетные значения обнаруживают полярный эффект 0,92-0,97, который значительно меньше эффекта 0,67 в элегазе при 1 МПа. Расчетная погрешность указывает на области однородного поля, аномального и лидерного пробоев. Во всяком случае, расчет по точности не уступает эксперименту.

Верификация формул при наличии пространственного заряда и давлении 0,1 МПа

Согласно математической модели полярного эффекта, в расчетном и базовом промежутках должны совпадать давления и коэффициенты неоднородности поля. При прогнозировании электрической прочности существенное значение имеет открытие Ульмана [9]. Если в цилиндрическом конденсаторе последовательно уменьшать радиус внутреннего электрода R_1 , то пробивное напряжение U_{br} имеет U-образную форму. Левая ветвь кривой возникает после начала коронного разряда и обязана пространственному заряду. Быстрый подъем напряжения происходит в результате изменения формы короны. Стримерная, или «язычковая», корона переходит в непрерывную [10].

U-образная кривая возникает во всех случаях при отрицательной полярности. Явление было зафиксировано Ульманом в воздухе при атмосферном давлении, при сравнительно больших радиусах цилиндра (3–10 мм) и состоит в том, что кривая-буква «U» рвется при положительной полярности. Правая ветвь продолжает снижаться до порогового коэффициента неоднородности поля, который мы назовем $k_{pos.strim}$ – порогом положительной стримерной короны. Ниже порога пробивное напряжение внезапно возрастает в 1,5–2 раза (непрерывная корона часто возникает скачком), выходя на продолжение левой ветви «U». Порог $k_{pos.strim}$ можно связать с условиями на поверхности электрода посредством эмпирической зависимости

$$k_{pos.strim} = 0,689 \left(\frac{E}{U}\right)^{-2,96} S^{-1,48}, \quad \sigma = 38\%, \quad \frac{E}{U} = 0,02-0,43 \text{ мм}^{-1}, \quad S = 9,4-1 \text{ см}^2.$$

Явление Ульмана прямо относится к прогнозу электрической прочности. Задержку непрерывной короны в слабо неоднородном поле можно выразить математически следующим образом. Файл экспериментальных результатов $U_{br}(R_1)$, где R_1 – радиус внутреннего цилиндра, для каждой полярности и для каждого из трех постоянных радиусов R_2 наружного цилиндра (100, 50, 30) мы разбиваем на три файла.

Критерием деления служит степень неоднородности поля: сильно неоднородное поле (непрерывная форма короны) – левая ветвь U-образной кривой (для $R_2=100$)

$$U_{br.str} = 82,0 (k_{non})^{0,160}, \quad \sigma = 2,7\%, \quad k_{non} = 7,9-20,4;$$

слабо неоднородное поле (стримерная форма короны и стримерный пробой в отсутствии пространственного заряда) – правая ветвь U-образной кривой вплоть до вершины максимума напряжения (на примере $R_2 = 100$)

$$U_{br.weak} = 188,6 (k_{non})^{-0,109}, \quad \sigma = 3,5\%, \quad k_{non} = 1,9-6,9;$$

квазиоднородное поле (стримерный пробой) – продолжение правой ветви U-образной кривой от максимума U_{br} до нуля (для $R_2 = 100$)

$$U_{br.str} = 75,6 (k_{non})^{0,925}, \sigma = 9,0 \%, k_{non} = 1,9-1,2.$$

Причина задержки непрерывной короны состоит в том, что для создания и поддержания устойчивого облака пространственного заряда требуется достаточно высокая энергия $W = u \times i$ в разряде. В слабо неоднородном поле, к которому относится случай $R_2 = 100$, коронирующая площадь электродов велика, поэтому требуется повышенная разность потенциалов «и». Эффективная площадь снижается вместе с уменьшением радиуса внутреннего цилиндра. При достижении порога

$$k_{non} > k_{pos.strim}$$

необходимая энергия в разряде достигнута

$$W > W_{min},$$

вспыхивает непрерывная корона. Разное поведение положительного и отрицательного пробивных напряжений вынуждает отказаться от формализации полярного эффекта на атмосферном давлении и при вычислениях выбирать базовый эксперимент при той полярности, которая нужна в расчете.

Верификацию методики проведем с помощью промежутка «стержень с шаровым окончанием $R = 2$ мм – плоскость» [9] и результатов испытаний протонного ПУ150 и электронного ЭУ150 ускорителей [11] с двумя вариантами скругления углов параллелепипеда ($R = 35$ мм и $R = 19$ мм) и $L = 250$ мм. В качестве базового промежутка используем цилиндрические конденсаторы с радиусами 100, 50 и 30 мм и вариантами слабо «w» (weak) и сильно «s» (strong) неоднородного поля.

Таблица 2. Погрешность расчетного пробивного напряжения промежутка с пространственным зарядом.

Структура	ПУ35	ПУ19	ЭУ35	ЭУ19	+R2мм	+R2мм	+R2мм	-R2мм	-R2мм	-R2мм
k_{non}	4,4	5,8	4,4	5,8	5,6	10,6	15,5	5,6	10,6	15,5
$U_{br.exp}$, кВ,	188	148	200	158	10,7	37	4917,74	17,74	34,2	52
S_{eff} , см ² ,	286	242	286	2420,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
k_{cdn}	0,85	0,85	0,85	0,85	1	1	1	1	1	1
база	+100w	+100w	-100str	-100str	+50str	+30str	+30str	-50str	-30str	-30str
δU_{calc} , %,	-10 %	+2 %	-0,5 %	+42 %	+40 :	-9 %	-5,2	1,2 %	+7 %	+5,7 %

Отрицательное пробивное напряжение превышает положительное вследствие коронного разряда в непрерывной форме. При положительной полярности расчетный порог $k_{pos.strim} = 24,9$, корона имеет стримерную форму.

Хотя точность измерений в работе [9] была не высока, особенно в предварительном эксперименте при отрицательной полярности (ЭУ150), из данных табл. 2 можно заключить, что в присутствии пространственного заряда достижима точность расчета напряжения до $\pm 7-9$ %. Причина низкого пробивного положительного напряжения при $k_{non} = 5,6$ в работе [9] осталась не выясненной.

Пространственный заряд как фактор газового пробоя

Формализация явлений электрической прочности газа приводит к механическому выполнению операций расчета в наиболее рациональном порядке. В слабо неоднородном поле и сжатом газе допустимо проведение расчета при одной и той же положительной полярности – с помощью коэффициента k_{pol} . В сильно неоднородном поле при давлении 0,1 МПа перехода от одной полярности к другой следует избегать. (При средних радиусах кривизны электрода 7–20 мм пространственный заряд от непрерывной короны возникает на отрицательном электроде и не образуется на положительном).

С помощью теоретической модели полярного эффекта в работе [6] удалось выявить «мелкую структуру» газового разряда в сильно неоднородном поле, а именно локализовать область существования положительного

$$p_{ch.pos} \leq p_{20} \leq p_{res.pos}$$

$$k_{ch.pos} \leq k_{non} \leq k_{ldr.pos}$$

и отрицательного пространственного заряда

$$p_{ch.neg} \leq p_{20} \leq p_{res.neg}$$

$$k_{ch.neg} \leq k_{non} \leq k_{ldr.}$$

Эксперименты Гохберга и др. (см. ссылку [23] в работе [5]) обнаружили еще более мелкую структуру. Внутри зоны существования пространственного заряда имеется еще один порог:

$$p_{ch} < p_{wave} < p_{rcs}$$

При давлении газа p_{wave} в аномальном положительном пробое начинается отклонение пробивных напряжений от закона подобия газового разряда. Название порога объясняется тем, что отклонение имеет волнообразную форму. Заряд не всегда нарушает закон подобия.

Положительный и отрицательный заряды в аномальном пробое азота (рис. 4 [6]) возникают и исчезают на фоне положительного лидерного пробоя, при $k_{pol} > 1$, до давлений 1,6 МПа. Точно так же в воздухе порог возникновения отрицательного заряда оказывается в области положительного лидерного пробоя ($p_{ldr} < p_{ch,neg}$). Можно сделать вывод, что разные электрические явления в изоляционных и защитных газовых промежутках ускорителя часто происходят одновременно, причем пространственные заряды не смешиваются.

Была сделана успешная попытка [6] количественно оценить порог p_{rcs} исчезновения пространственного заряда в аномальном пробое в зависимости от геометрии этого пространственного заряда. Известные экспериментальные результаты представлены в виде эмпирической формулы

$$p_{rcs} = A (R_{av})^a (k_{non})^b,$$

где R_{av} – радиус средней кривизны электродной поверхности, k_{non} – коэффициент неоднородности поля, A , a , b – константы.

Наконец, в данной работе введен и оценен порог существования положительной стримерной короны в атмосферном воздухе $k_{pos,stim}$. Выше порога

$$k_{non} > k_{pos,stim}$$

коронный разряд имеет непрерывную форму, и пробивное напряжение возрастает в 1,5 раза и более. При меньшей неоднородности поля пробой может происходить при низких напряжениях.

Химический состав исследованных газов не приводит к качественным изменениям обсуждаемой модели полярного эффекта. Изменяются лишь абсолютные величины порогов и коэффициента полярности.

Заключение

Теоретическая модель полярного эффекта помогает обнаружить новые возможности газовой изоляции. Пороги отмечают смену механизма пробоя, появление и исчезновение пространственного заряда, смену форм коронного разряда.

Получены в общем виде зависимости пробивного напряжения разных полярностей от геометрических и электрических параметров промежутка, включая пространственный заряд и облучение промежутка.

Погрешность метода составляет $\pm 3-4\%$ и $\pm 8-9\%$ соответственно в отсутствии и в присутствии пространственных зарядов в изоляционном промежутке.

Список литературы

1. Schumann W.O. Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung, Berlin: Verlag J.Springer, 1923, S. 216.
2. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. – М: изд. иностр. лит., 1960, с. 606, (Oxford: Clarendon Press, 1953).
3. Philp S.F. (см. ссылку [10] в работе Trump J.G. Compressed gas insulation and electric power systems, – Proceed. of the Intern. Conf. on Gas Discharges and the Electricity Supply Industry, Butterwarths, 1962, p. 348–356).
4. Бортник И. М. Физические свойства и электрическая прочность элегаза, М: Энергоатомиздат, 1988, с. 80.
5. Резвых К.А., Глотов А.И. Количественная оценка влияния полярности на пробивное напряжение газовых промежутков ускорителя. – Препринт ФЭИ-2842, Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2000, с. 30.
6. Резвых К.А., Глотов А.И., Романов В.А. Расчетная математическая модель пробивного напряжения и формы газового разряда в промежутках ускорителя. (Настоящее совещание).
7. Gänger B. //Archiv für Elektrotechnik, 1940, Bd 34, S. 633–652.
8. Philp S.F. //IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, (PAS-82), 1963, p. 356–350.
9. Uhlmann E. //Arch. für Elektrotechnik, 1929, Bd. 23, S. 323–350. (см. [2], фиг. 206, с. 389).
10. Богданова Н.Б., Попков В.И., //Электричество, 1973, № 8, с. 27-34.
11. Глотов А.И., Башмаков В.С., Никитин В.А., Романов В.А., Чалый Ю.Р., Шляпников С.В. – Труды XI Совещания по электростатич. ускорит., 27-30 ноября 1995 г., Обнинск: изд. ФЭИ, 1996, с. 205–206.