

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.527.9

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ГАЗОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ  
В ГЕОМЕТРИИ ЗАЩИТНЫХ РАЗРЯДНИКОВ  
И КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ**

© 1998 г. И. Н. Сорокин, В. В. Широков

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 12.05.97 г.

После доработки 06.08.97 г.

Приведены экспериментальные результаты по исследованию электрической прочности газовых зазоров в геометрии кольцевых аксиальных защитных разрядников ускорительной трубки и газовых зазоров высоковольтной формулирующей линии в геометрии коаксиальных цилиндров. Исследования проводились при давлениях элегаза до 1.2 МПа, площадях электродов до 2.73 м<sup>2</sup>, постоянных напряжениях до 1.0 МВ.

Выяснение электрической прочности высоковольтных промежутков в сжатом газе в зависимости от их числа и от площади электродов при разных давлениях газа важно для разработчиков высоковольтных электрофизических установок.

При разработке единичного элемента высоковольтной части комплекса встречных электрон-позитронных пучков (ВЛЭПП) для работы на постоянном напряжении 1.15 МВ требовалось оценить электрическую прочность газовых промежутков защитных разрядников ускорительной трубки клистрона [1] и прочность газовых промежутков коаксиальной формулирующей линии [2].

Для защиты элементов ускорительной трубки клистрона от энергии, выделяемой в пробое [3], разрядники устанавливаются параллельно каждой из секций ускорительной трубки, находящихся под одинаковым напряжением, задаваемым с помощью резистивного делителя.

Формирующая пятиметровая линия каждого клистрона имеет площадь высоковольтных электродов ≈ 5.5 м<sup>2</sup>. Энергия, запасаемая в емкостях линии при напряжении 1.15 МВ, составляет ≈ 700 Дж. Исследования зависимости прочности газовых зазоров от площади электродов и давления элегаза во многом определяли стоимость высоковольтной части комплекса.

Перед проведением экспериментов все поверхности электродов и изоляторов, находящиеся в экспериментальном объеме, тщательно протирались. Перед заполнением элегазом экспериментальный объем откачивался на форвакуум. Дополнительная очистка элегаза в процессе проведения экспериментов не проводилась. Постоянное напряжение отрицательной полярности от каскад-

ного генератора подавалось на испытываемый объект через ограничительное сопротивление.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПРОЧНОСТИ ГАЗОВЫХ ЗАЗОРОВ  
АКСИАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ  
РАЗРЯДНИКОВ**

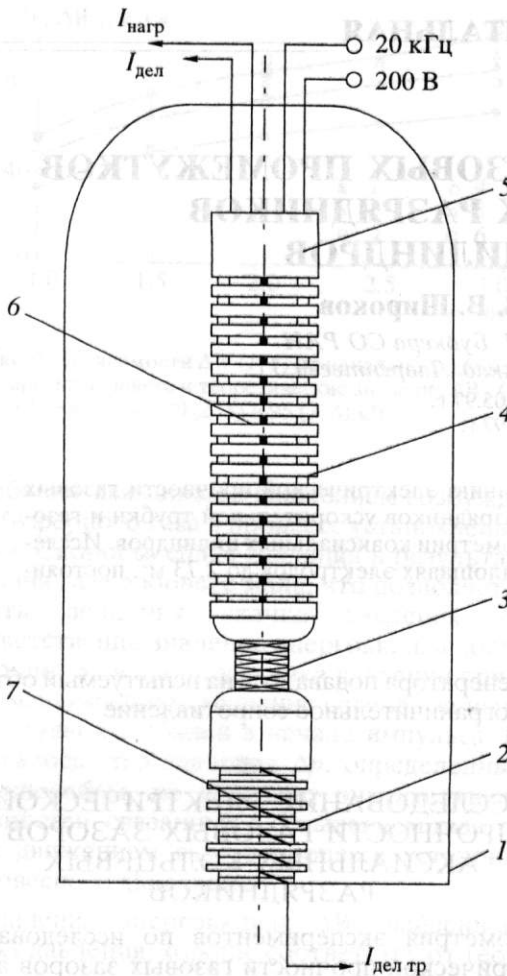
Геометрия экспериментов по исследованию электрической прочности газовых зазоров аксиальных кольцевых защитных разрядников приведена на рис. 1.

Разрядники устанавливались на колбе ускорительной трубки. Материал разрядников – нержавеющая сталь. Форма электродов защитных кольцевых газовых разрядников ускорительной трубки показана на рис. 2 и выбирается с учетом необходимости ослабления электрического поля в месте стыка электрода с поверхностью изолятора в газе.

Фокусирующие электроды трубки были сняты и трубка заполнялась элегазом. Элегаз внутри и снаружи колбы трубки находился под одинаковым давлением.

В экспериментах с газовыми разрядниками максимальный разброс в величине зазора  $\delta$  составлял ±0.2 мм. Пробивное напряжение определялось как среднее значение от величин напряжения двадцати последовательных пробоев (для 14 последовательно включенных разрядников – среднее от десяти последовательных пробоев). Коэффициент вариации (процентное отношение среднеквадратичной ошибки измерения к среднему значению напряжения) не превышал 6%.

Максимально запасаемая энергия, не ограничиваемая ограничительным сопротивлением, выделяемая при пробоях, равнялась 17 Дж. Энергия,



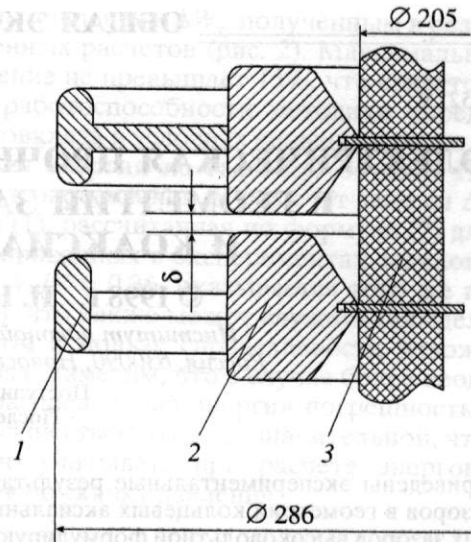
**Рис. 1.** Геометрия экспериментов по исследованию электрической прочности зазоров газовых разрядников на постоянном напряжении. 1 – сосуд испытательного объема; 2 – ускорительная трубка; 3 – ограничительное сопротивление; 4 – каскадный генератор; 5 – высоковольтные трансформаторы питания каскадного генератора; 6 – резистивный делитель каскадного генератора; 7 – резистивный делитель ускорительной трубки;  $I_{\text{нагр}}$  – ток нагрузки каскадного генератора,  $I_{\text{дел тр}}$  и  $I_{\text{дел}}$  – токи высоковольтных делителей ускорительной трубки и каскадного генератора соответственно.

запасенная в емкостях каскадного генератора, рассеивалась в малоиндуктивном ограничительном сопротивлении 20 Ом.

Зависимость пробивной напряженности поля для разного числа последовательно включенных разрядных промежутков по 2.5 мм от давления газа приведена на рис. 3.

Наряду с нелинейной зависимостью роста пробивной напряженности от давления газа электрическая прочность промежутков с ростом числа разрядников падает.

Экспериментальные данные можно проинтерполировать с помощью двухпараметрической



**Рис. 2.** Единичный элемент ускорительной трубки. 1 – охранный электрод, служащий для создания квазиоднородного поля в районе разрядников; 2 – электрод защитного разрядника; 3 – изолятор секции ускорительной трубки;  $\delta$  – величина зазора в защитных разрядниках.

функции распределения вероятности пробоев Вейбулла [4]:

$$F_1(U_{\text{пр}}) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U_{\text{пр}}}{U_{01}} \right)^\alpha \right]. \quad (1)$$

Возьмем значение параметра распределения  $\alpha = 11$  и значение 63%-ного квантиля для одного разрядника  $U_{01}$  равным прочности одного разрядника, полученной в эксперименте при давлении элегаза 0.7 МПа. Она составила 361 кВ/см. Тогда значение 63%-ного квантиля  $U_{0N}$  для  $N$  разрядников определяется как:

$$\frac{U_{0N}}{U_{01}} = N^{-1/11}. \quad (2)$$

Для двух, семи и четырнадцати разрядников максимальное отличие значения 63%-ного квантиля, рассчитанного по (2), от экспериментального значения электрической прочности составляет 6% (для двух разрядников).

Напряженная площадь электродов одного разрядника (площадь поверхности, на которой  $E_{\text{макс}} \geq E \geq 0.9E_{\text{макс}}$ ) составляет  $\approx 50 \text{ см}^2$ .

На рис. 4 приведены зависимости пробивной напряженности газовых зазоров от суммарной напряженной площади электродов последовательно включенных разрядников для разных давлений элегаза.

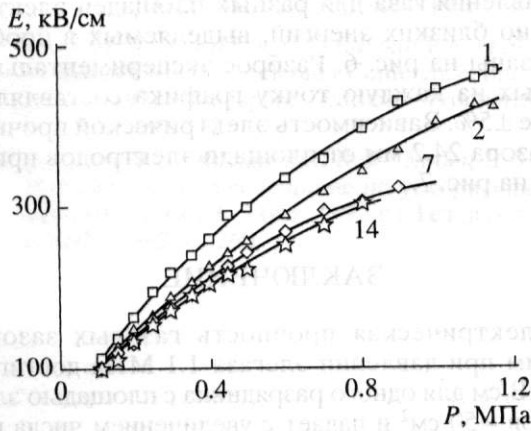


Рис. 3. Зависимость электрической прочности газовых промежутков кольцевых разрядников от давления газа. Количество последовательно включенных разрядников обозначено цифрами у кривых.

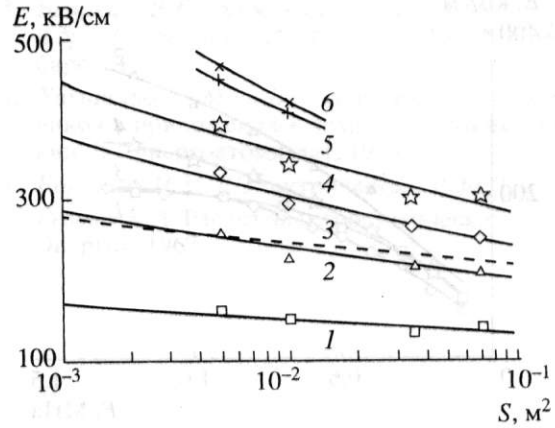


Рис. 4. Зависимость электрической прочности газовых промежутков в геометрии разрядников от площади электродов при различных давлениях газа: 1 – 0.2; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8; 5 – 1.0; 6 – 1.15 МПа. Пунктирной линией обозначена аппроксимация данных [5] для 0.4 МПа.

### ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГАЗОВЫХ ЗАЗОРОВ В ГЕОМЕТРИИ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ

Для выбора величины газовых зазоров высоковольтной формирующей линии были проведены эксперименты с зазорами в геометрии коаксиальных цилиндров, находящихся в сжатом газе (рис. 5). Внутренний цилиндр, находившийся под постоянным отрицательным напряжением, набирался из пластин высотой 1300 мм и площадью 1800 см<sup>2</sup>. Пластины закреплялись на каркасе Ø1080 мм и гальванически соединялись между собой. Каркас закреплялся на опорном изоляторе, выдерживающем максимально полученное напряжение без пробоев. Диаметр внешнего сплошного электрода 1190 мм.

Конструкция установки позволяла менять величину испытываемого высоковольтного газового зазора и площадь высоковольтных электродов зазора, одновременно приближая (или удаляя) все (или отдельные) высоковольтные пластины к заземленному внешнему цилиндрическому электроду.

Рабочая площадь электродов в эксперименте определялась суммарной площадью пластин, установленных с зазором  $\delta$  к внешней обечайке. Зазор между остальными пластинами и обечайкой был немного больше. В конце каждого эксперимента визуально контролировалось отсутствие следов пробоев на поверхности удаленных пластин. Разброс в величине испытываемого зазора не превышал  $\pm 1.5$  мм. Форма пластин определяла коэффициент перенапряжения.

В эксперименте зазор менялся от 10 до 30 мм. Значение коэффициента перенапряжения на краю

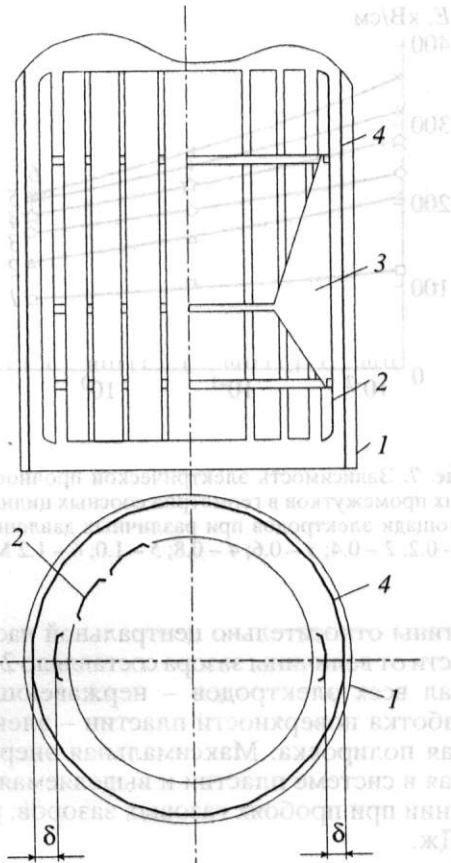


Рис. 5. Геометрия экспериментов по исследованию электрической прочности газовых зазоров в геометрии коаксиальных цилиндров на постоянном напряжении. 1 – сосуд испытательного объема; 2 – пластины наборного внутреннего цилиндрического высоковольтного электрода; 3 – каркас для крепления пластин; 4 – наружный (“земляной”) цилиндрический электрод;  $\delta$  – величина испытываемого газового зазора (на рисунке показан вариант испытания зазоров двух пластин).

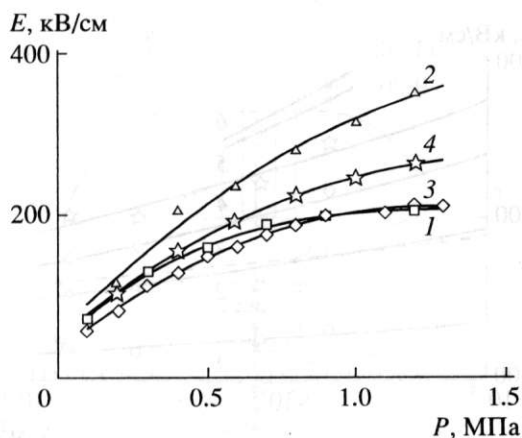


Рис. 6. Зависимость электрической прочности газового промежутка 13.2 мм в геометрии соосных цилиндров от давления газа при площадях внутренних электродов  $2.73 \text{ м}^2$  (1),  $0.0055 \text{ м}^2$  (2) и газового промежутка 24.2 мм при площадях внутренних электродов  $2.37 \text{ м}^2$  (3),  $0.18 \text{ м}^2$  (4).

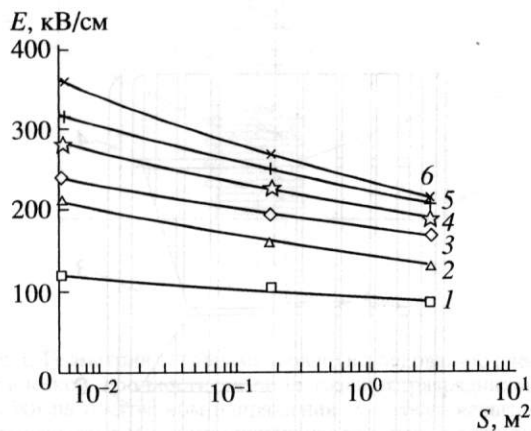


Рис. 7. Зависимость электрической прочности газовых промежутков в геометрии соосных цилиндров от площади электродов при различных давлениях газа: 1 – 0.2; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8; 5 – 1.0; 6 – 1.2 МПа.

пластины относительно центральной части в зависимости от величины зазора составляло 2–10%. Материал всех электродов – нержавеющая сталь. Обработка поверхности пластин – электрохимическая полировка. Максимальная энергия, запасаемая в системе пластин и выделяемая без ограничений при пробоях газовых зазоров, равнялась 260 Дж.

Дополнительно было проведено несколько экспериментов с электродами в виде полированных дисков профиля Роговского [6] из нержавеющей стали площадью  $0.0055 \text{ м}^2$ , которые устанавливались друг против друга на одну из пластин и на внешнюю обечайку.

Результаты эксперимента по исследованию зависимости электрической прочности зазоров

от давления газа для разных площадей электродов, но близких энергий, выделяемых в пробое, показаны на рис. 6. Разброс экспериментальных данных на каждую точку графика составлял не более  $\pm 5\%$ . Зависимость электрической прочности зазора 24.2 мм от площади электродов приведена на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрическая прочность газовых зазоров 2.5 мм при давлении элегаза 1.1 МПа достигает 400 кВ/см для одного разрядника с площадью электродов  $\approx 50 \text{ см}^2$  и падает с увеличением числа разрядников. Экспериментальная зависимость изменения величины пробивной напряженности поля с увеличением количества разрядников хорошо аппроксимируется функцией Вейбулла. Знание зависимости электрической прочности защитных разрядников от давления газа и числа разрядников позволяет провести последовательную тренировку ускорительной трубки без потери прочности и надежно защитить элементы трубки от энергии, выделяемой при пробое трубки.

Для различных давлений газа с ростом площади электродов разброс значений электрической прочности высоковольтных газовых зазоров уменьшается. Пробивные напряженности уменьшаются и стремятся как бы к одной величине, хотя и более плавно, чем в зависимости от числа (площади) разрядников. Увеличение электрической прочности зазоров с ростом давления газа меньше для электродов большей площади.

В эксперименте для малых площадей электродов газовых зазоров (рис. 4) получено большее значение электрической прочности, чем в эксперименте, результаты которого приведены на рис. 7. В экспериментах с разрядниками и коаксиальными цилиндрами кроме отличавшихся величин газовых зазоров существенно отличалась и энергия, запасаемая в системе электродов и выделяемая без ограничений при пробоях.

Падение электрической прочности газовых зазоров с увеличением площади электродов нельзя объяснить только увеличением энергии, запасаемой в емкости электродов и выделяемой в пробое. В эксперименте с коаксиальными цилиндрическими цилиндрами основной энергозапас осуществлялся в емкости всего сборного электрода, а не одной пластины или диска, на которые шел пробой.

Для газового зазора формирующей линии с большой площадью электродов даже для давлений элегаза 1.2 МПа электрическая прочность газовых зазоров не больше 200 кВ/см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arapov L.N., Avrakhov P.V., Balakin V.E. et al. // Third European Particle Accelerator Conference: Intern. conf., Berlin, 1992. Singapore: Editions Frontieres, 1992. V. 1.1. P. 330-332.*
2. *Балакин В.Е., Каситский В.Ф., Кобец В.В. и др. // 12-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц 3-5 окт. 1992 г.: Тез. докл. Дубна: ОИЯИ, 1992. С. 260.*
3. *Балакин В.Е., Кожемякин А.В., Мигинская Е.Г. и др. // Препринт ИЯФ СО РАН 97-8. Новосибирск, 1997.*
4. *Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. Л.: Энергоатомиздат, 1989.*
5. *Бортник И.М. // Электричество. 1974. Т. 12. С. 20.*
6. *Резвых К.А. Расчет электростатических полей. М.: Энергия, 1967.*