

Опыт оптимизации высоковольтной структуры электрического перезарядного ускорителя ЭПП-15

К.А.Резвых, В.А.Романов

ГНЦ РФ–Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия

В конце 1950 гг. Р. Г.Херб отмечал, что одним из самых общих правил, касающихся электростатических генераторов, является невозможность сколько-нибудь приемлемой экстраполяции их характеристик [1]. Прежде всего вследствие сложности проблемы попытки повысить пробивное напряжение структуры за счет снижения максимальной напряженности поля E_{\max} на поверхности электродов были малоуспешны [2–6]. В то же время были получены обнадеживающие результаты [7–9] и особенно путем увеличения диаметра бака [10,11].

Модернизация ускорителя ЭГ-2,5. Из результатов испытания статическим напряжением одноконечного ускорителя ЭГ-2,5 и его модификации ЭГ-3 [12] можно видеть, что в пробое участвует поверхность электродов с эффективной площадью S_{eff} при напряженности $E \geq 0.8 E_{\max}$, что главными факторами пробоя являются E_{\max} и S_{eff} . Пробивные напряжения подчинялись функции распределения минимальных. Кроме того, в статистическом эксперименте была обнаружена двухвершинная плотность распределения вероятности пробивного напряжения. Оказалось, что в обеих испытанных структурах электростатическое поле было сконцентрировано в двух областях (на вершине кондуктора и на стыке кондуктора с колонной), причем области были разделены цилиндрической “мертвой” зоной длиной 400 мм, в которой отсутствовали следы пробоя. Можно предположить, что электростатическое поле объединяет соседние поверхности электродов всего лишь в два параллельно включенных элемента со своими параметрами E_{\max} и S_{eff} .

В структуре ЭГ-3 пробивные напряжения двух элементов отличались на 3%. Далее было показано, что, если один из элементов принять за базовый, то пробивное напряжение другого может быть вычислено посредством системы из нескольких уравнений. Расчетная величина отличалась от среднего пробивного напряжения системы, полученного в эксперименте, не более чем на 1%. Развитый метод сохраняет малую погрешность, если расчет напряженности поля и измерения пробивного напряжения в базовом эксперименте имеют точность до 1% и если остальные факторы пробоя различаются незначительно.

Модернизация ускорителя ЭПП-15. На первом этапе предполагается заменить в колонне градиентные кольца круглого поперечного сечения диаметром 30 мм в соответствии с патентом Российской Федерации № 2063107 с приоритетом от 25.09.92. “Объединенное градиентное кольцо” [13].

Общий экранирующий электрод для трех секций внутренней структуры опорной колонны обеспечивает высокую поперечную и продольную электрическую прочность колонны, повышенную надежность работы ускорителя, облегчает изготовление наружного электрода с малыми отклонениями от расчетных размеров. Втрое уменьшается необходимое количество электродов сложного поперечного сечения в комбинированной колонне, а также стоимость изготовления и суммарная масса наружных электродов. Отдельный электрод имеет массу 6,5 кг, что допустимо при ручном снятии и перемещении электродов вдоль поверхности колонны.

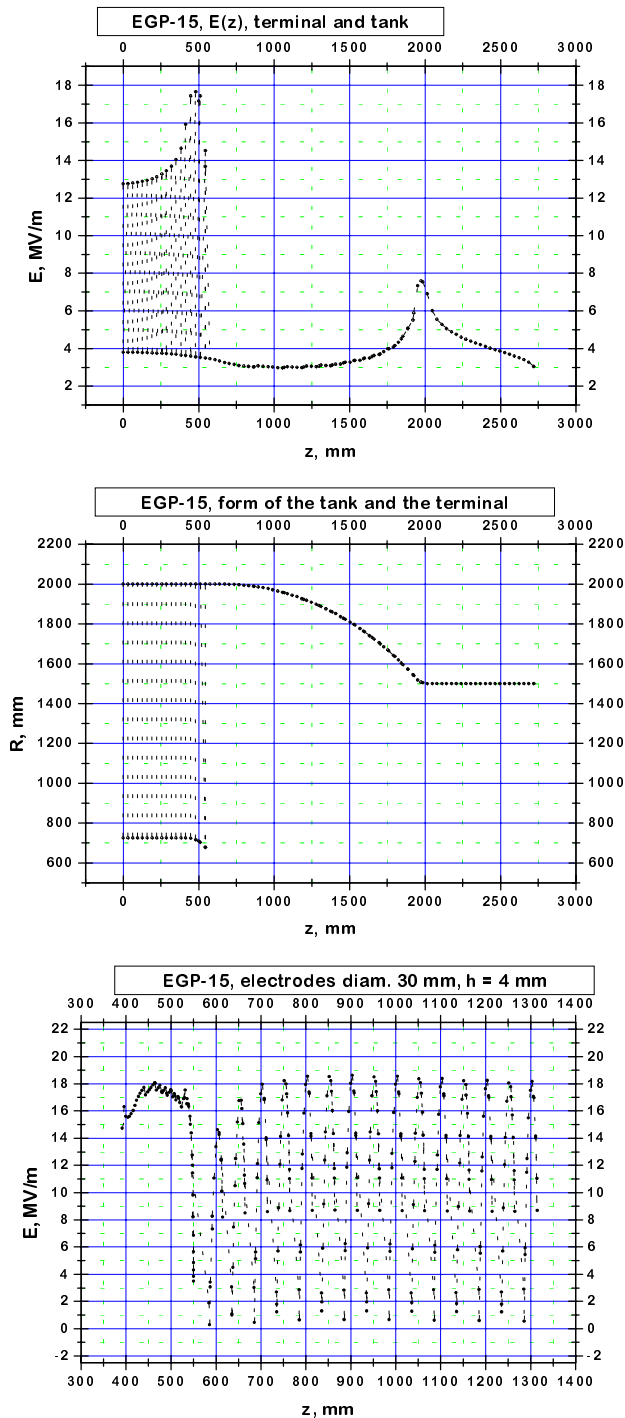


Рис. 1, 2, 3

На рис.1-3 представлены форма бака и распределение поля для исходной структуры ускорителя ЭГП-15; измененное поле и картина эквипотенциальных линий показаны на рис. 4,5. Сравнение вариантов проведено для смесей $N_2+20\% CO_2$ и $N_2+20\% CO_2 + 10\% SF_6$ и давления 1,1 МПа абс.

В результате внедрения объединенного градиентного кольца (ЭГП - 15-1) напряженность на колонне снижается с 19 до 14,8 МВ/м. При этом слабым звеном изоляционной системы становится кондуктор и энергия W_{dsp} , рассеиваемая на одной секции твердой изоляции после пробоя на бак, уменьшается относительно рассеиваемой энергии в исходной конструкции W_{init} вдвое. Возрастает надежность работы внутренней структуры колонны и трубки.

На втором этапе (ЭГП-15-2) предполагается оптимизировать форму кондуктора подобно тому, как нами разработано для ускорителя ЭГП-8-1 РНЦ "Курчатовский институт". Напряженность на поверхности кондуктора уменьшается с 17,4 до 14,9 МВ/м. Расчетное пробивное напряжение при этом увеличится на 12,6%.

Электрическую прочность системы, как правило, определяет внешняя изоляция, а не внутренняя. Форма объединенного градиентного кольца выбрана так, чтобы повышение радиальной электрической прочности не вызывало возникновения пробоев внутри колонны. Относительной электрической прочностью $k_{strn.int}$ внутреннего промежутка будем называть отношение пробивного напряжения U_{br} к тому постоянному напряжению, которое будет приложено к промежутку в момент пробоя внешней изоляции при напряжении $U_{br syst}$

$$k_{strn.int} = \frac{U_{br}}{U_{syst} / n_{ser}}$$

Здесь n_{ser} – количество последовательно соединенных промежутков вдоль делителя напряжения колонны.

Таблица. Результаты оптимизации ускорителей ЭГП-15 и ЭГП-10-1 [14]

Ускоритель	E_{max} , MV/m	E_{max}/U , 1/m	$U_{br}(N_2+CO_2)$, MV	$U_{br}(10\%SF_6)$, MV	W_{dsp}/W_{init}	U_{br}/U_{init}	$k_{strn.int}$
ЭГП-15	19,0	2,19	7,0	9,5	1	1	4
ЭГП-15-1	17,4	2,04	6,8	9,5	0,4	1	2,1
ЭГП-15-2	14,9	1,75	7,71	10,7	1,3	1,13	2,1
ЭГП-10-1	22,0	2,75	5,0	6,9	1	1	4
ЭГП-10-2	18,3	2,29	6,0	8,5	1,4	1,23	2,1

На первом этапе оптимизации (ЭГП-15-1) закладывается резерв электрической прочности колонны; максимальная в структуре ускорителя напряженность

снижается на 7,5%, но пробивное напряжение неизменно. Здесь проявляется та закономерность разряда в газе, что с уменьшением кривизны поверхности одновременно с максимальной напряженностью снижается и пробивная напряженность.

Приближенная оценка рассеиваемой энергии базируется на экспериментальных результатах, полученных для ускорителей МР (10 - 17 МВ) и ЭГ-2,5 (2,5-4,6 МВ). Пробои с кондуктора, с третьего кольца и между колец колонны [15] сопровождалась импульсными перенапряжениями на ближайшем к пробую опорном изоляторе колонны с кратностями k_{term} , k_{col} , k_{int} , равными 20, 80 и 2. Возможны и более высокие кратности.

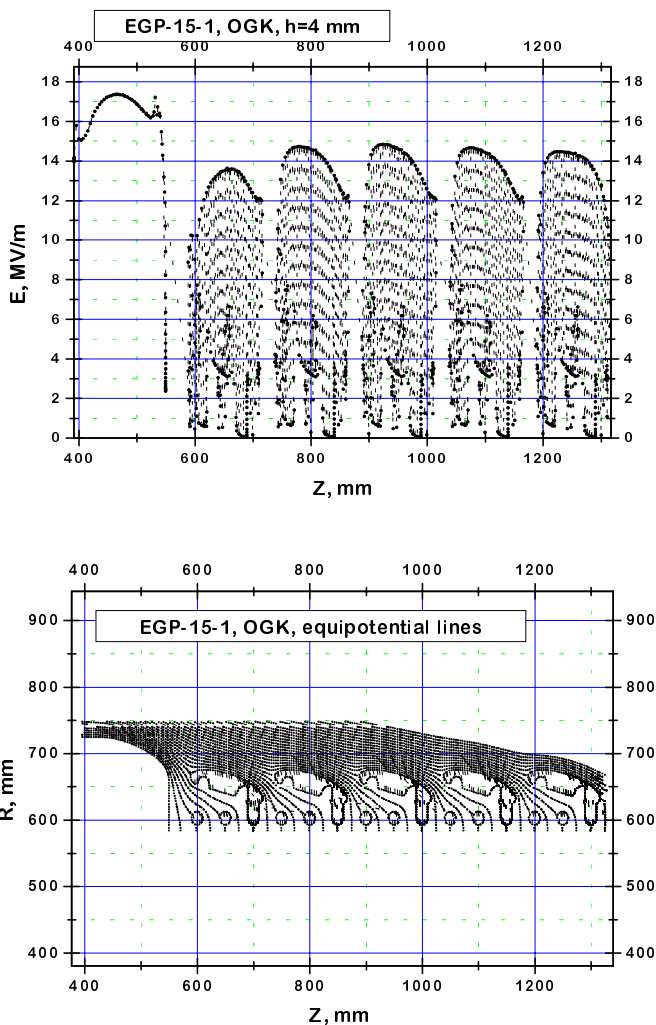


Рис. 4, 5

Рассеиваемая энергия зависит от вероятностей пробоя :

$$W_{dsp} = A (p_{term} k^2_{term} + p_{col} k^2_{col} + p_{int} k^2_{int}) U^2_{br.syst} ,$$

где A – константа, пропорциональная емкости одной секции опорного изолятора колонны, p_{term} , p_{col} , p_{int} – вероятности каждого вида пробоя в изоляционной системе с пробивным напряжением $U_{br.syst}$.

При статическом пробое высоковольтной конструкции все промежутки включены параллельно и пробивается слабейший. При оценке рассеиваемой энергии будем считать, что вероятности пробоя промежутков зависят от формальной расчетной оценки пробивного напряжения реального *электрода* (например U_{col} или U_{term}), которая соответствует параметрам E_{max} и S_{eff} . Указанные вероятности были вычислены для конструкций ЭГ-2,5 и ЭГ - 3 [12] как отношение среднего числа кратеров на данном электроде к общему числу кратеров. Поскольку продольная прочность между кольцами в эксперименте [12] превышала величину $k_{strn.int} = 1,55$ ниже приведены значения вероятности пробоя колонны для системы, в которой возможны только два вида пробоев.

U_{col}/U_{term}	0,88	1,00	1,15,
p_{col}	0,63	0,5±0,05	0,18.

Расчеты пробивного напряжения и рассеиваемой энергии позволяют прогнозировать электрическую прочность и надежность сложных изоляционных систем.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований РАН (код проекта 96-02-17294а).

Литература

1. Herb R.G. Handbuch der Physik, Bd.44, Berlin: Springer-Verlag, 1959 (Ускорители, М.: Госатомиздат, 1962, с. 126).
2. Kiss A., Koltay E., Szalay A. // Nucl. Instr. Meth., 1967, v.46, p. 130-135.
3. Purser K.H. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1974, v. 122, p. 159-178.
4. Tait N.R.S. // Nucl. Instr. Meth., 1984, v. 220, p. 54-62.
5. Wagner P., Letournel M. // Rev. Sci. Instr., 1986, v. 57, №5, p. 715-717.
6. Munzer H. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1988, v. A268, p. 353-355.
7. Chick D.R., Petrie D.P.R. // Proc. Inst. Electr. Eng., 1956, v. 103, 18, № 8, p. 132-154.
8. Rezvykh K.A., Romanov V.A. // Nucl. Instr. Meth., 1983, v. 216, p. 11-14.
9. Letournel M. et. al. // Nucl. Instr. Meth., 1984, v. 220, p.10-13.
10. Bromley D.A. // Nucl. Instr. Meth., 1974, v. 122, p.23.
11. Романов В.А. и др. Труды IX Всесоюзного совещания по обмену опытом эксплуатации и усовершенствования электростатических ускорителей, 22-24 ноября 1988 г., Обнинск: ФЭИ, 1991, с. 147-151.
12. Резвых К.А., Романов В.А. // Электричество, 1988, № 12, с. 10-19.
13. Резвых К.А., Романов В.А., Шишков В.И. // Бюллетень изобретений, 1996, № 18, с. 197.
14. Matthes H., Weibrecht R. // Revue de Physique Appliquee, 1977, т. 12, p. 1327-1329.
15. Rose P.H., Milde H. // IEEE Trans., 1971, NS-18, pt 1, p. 63-67.