

УДК 621.384.653

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ГАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

И.Г. Игнатъев, канд. физ.-мат. наук

Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, 40000, ул.

Петропавловская, 58, Сумы, Украина

e-mail: igignatew@gmail.com

Для расчета пробивного напряжения высоковольтных структур наиболее универсальным является статистический метод, основанный на численном моделировании вероятности пробоя системы газоизолированных электродов (законе роста). Метод был адаптирован автором для высоковольтных ускорителей прямого действия и совершенствовался на протяжении более чем двадцати лет.

В статье рассмотрено применение метода расчёта рабочего напряжения высоковольтной газоизолированной структуры на основе закона роста (преобразования масштаба).

Путем анализа расчетных и экспериментальных данных для электростатического ускорителя на напряжение 2 мегавольта проведена верификация метода для случая газовой изоляции на основе бинарной смеси азота N_2 и гексафторида серы (элегаза) SF_6 .

Для ускорителя «СОКОЛ» Института прикладной физики Национальной Академии наук Украины рассчитан оптимальный состав смеси.

Погрешность расчёта составляет величину порядка точности измерения напряжения на высоковольтном электроде ускорителя.

Предлагаемый метод расчёта электрической прочности в дальнейшем предполагается использовать для оптимизации высоковольтной структуры электростатических ускорителей с целью повышения надёжности работы установки.

Ключевые слова: электрический пробой, высоковольтная структура, электростатический ускоритель, азот, гексафторид серы.

**I. G. Ignat'ev, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics),
Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of
Ukraine,
58, Petropavlivska St., 40000 Sumy, Ukraine
e-mail: igignatew@gmail.com**

STUDY OF ELECTRICAL BREAKDOWN OF GAS ISOLATION AT AN ELECTROSTATIC ACCELERATOR

Breakdown voltage of high-voltage structures is generally calculated with a statistic method based on numerical modeling of a breakdown probability in a gas-insulated electrode system. The method was adjusted by the author to the direct voltage accelerators and has been improved for more than twenty years.

The article considers a method for calculating the operating voltage of high-voltage gas isolation for a 2 MeV proton accelerator. The method was verified for gas isolation with a binary nitrogen (N_2) and sulfur hexafluoride (SF_6) mixture, through analysis of calculated and experimental data for the 2 MeV electrostatic accelerator.

The best composition of the mixture for the "SOKOL" accelerator at Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Ukraine has been calculated.

Calculation accuracy is the order of accuracy of voltage measurement at the high-voltage electrode of the accelerator.

The suggested method for calculating the insulation strength is expected to be further used in enhancing high-voltage structure of electrostatic accelerators in an effort to improve their operational reliability.

Keywords: breakdown voltage, electrostatic generator, accelerator, nitrogen, sulfur hexafluoride.

Введение

Основная цель оптимизации газоизолированных высоковольтных структур электростатических генераторов (ЭГ) или по другому определению электростатических ускорителей (ЭСУ) [1] – получение максимально возможного пробивного напряжения при ограниченных габаритах конструкции, что достигается при помощи изменения геометрии электродов и состава изолирующего газа [2-6].

Так как оптимизация путем экспериментального макетирования дорогостояща и трудоёмка, обычно проводятся соответствующие расчёты. Но как правило расчеты пробивного напряжения имеют высокую погрешность (достигающую 50%), что является следствием использования эмпирических и полуэмпирических методов, недостаточно учитывающих физическую природу процесса газового разряда. В результате или необоснованно увеличивается стоимость установки или снижается надёжность её работы.

Для расчета пробивного напряжения ЭГ наиболее универсальным является статистический метод, основанный на численном моделировании вероятности пробоя системы газоизолированных электродов (законе роста) [2]. Метод был адаптирован автором для высоковольтных ускорителей прямого действия [6,7] и совершенствовался на протяжении более чем двадцати лет.

В данной статье путем анализа расчетных и экспериментальных данных рассмотрена верификация метода для случая газовой изоляции на основе бинарной смеси азота N_2 и гексафторида серы (элегаза) SF_6 .

1 Численное моделирование функции распределения пробивного напряжения системы газоизолированных электродов

Закон роста для газовой изоляции. Считаем, что вероятность пробоя газовой среды в однородном электрическом поле хорошо описывается двойным экспоненциальным распределением [3]:

$$F(E) = 1 - \exp\left(-\exp\frac{E-\eta}{\gamma}\right),$$

(1)

где E – напряженность электрического поля на поверхности электродов; η – мода распределения; γ – мера статистического разброса.

Параметры η , γ определяются экспериментально (например в системе электродов Роговского) для плоских электродов с площадью поверхности A_0 , которую далее будем называть базовой площадью. Как показано в [8], выражение (1) не может быть непосредственно использовано для расчета электрической прочности газовой изоляции многоэлементных систем, создающих неоднородное поле.

Рассмотрим электрический пробой газоизолированной системы (рис. 2), состоящей из N электродов с заданными на них потенциалами U_n , $n = 1 \dots N$ на заземленную поверхность.

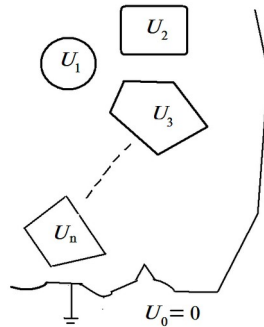


Рис. 1 Система электродов.

Так как пробивные напряжения распределены около среднего значения случайным образом [5], то можно считать, что пробой происходит взаимно - независимо.

Тогда вероятность пробоя системы определяется законом роста (преобразования масштаба) в форме [7]:

$$F(U_1 \dots U_N) = 1 - \exp - \sum_{n=1}^N \frac{1}{A_0} \int_{A_n} \exp \frac{E(A_n) - \eta}{\gamma} dA, \quad (2)$$

где $E(A_n)$ – распределение напряженности электрического поля по поверхности A_n электрода с номером n .

Выражение (2) является обобщением (1) для многоэлементной системы. В большинстве ЭГ потенциалы $U_1 \dots U_N$ связаны между собой функциональной зависимостью, например линейной (в случае если они задаются делителем напряжения). Поэтому можно свести

многопараметрическую зависимость (2) к задаче одного параметра $U = \max\{U_1 \dots U_N\}$ и находить вероятность пробоя системы $F(U)$.

Алгоритм расчёта пробивного напряжения ЭГ. Представленный далее алгоритм реализован в виде численного кода LapUbr.

1. По экспериментальным данным [2] (система из двух электродов, однородное поле) определяем η , γ , зависящие от давления и состава газа, материала электродов, степени шероховатости их поверхности. Для элегаза при $A_0 = 10 \text{ см}^2$ и электродов, выполненных из нержавеющей стали (полированные, чистота обработки поверхности порядка 0,32):

$$\eta = 51P_{20}K,$$

$$\gamma = P_{20}K,$$

$$K = 0,41 + 0,59(1 - \exp(-0,05f)),$$

где P_{20} – давление изолирующего газа, приведенное к 20° С, МПа; η , γ – в МВ/м; K – коэффициент, зависящий от состава газа; f – содержание элегаза в смеси с азотом, %.

2. Находим распределение $E(A_n)$ напряженности по всем поверхностям электродов при заданном U . В данной работе $E(A_n)$ рассчитывалось при помощи численного кода Laplas2D [9-11], реализующего метод интегральных уравнений (МИУ). По сравнению с конечно-разностными методами МИУ имеет более высокую точность при расчете напряженности электрического поля на поверхностях.

3. Из (2) находим вероятность пробоя $F(U)$.

Расчет повторяется для всего заданного диапазона изменения U .

4. Окончательно пробивное напряжение (пятидесятипроцентный квантиль функции распределения пробивного напряжения системы, то есть напряжение $U_{\Pi} = U_{50}$ при котором $F(U) = 0,5$ [2,5]) определяется аппроксимацией из зависимости $F(U)$.

5. Рабочее напряжение (это напряжение, при котором количество пробоев не превышает 1 - 2 в час):

$$U_{РАБ} = 0,9 \cdot U_{\Pi}.$$

Апробация метода. Описанная выше методика прошла апробацию для различного типа устройств высокого напряжения, в том числе и ЭГ (результаты представлены в [7]).

Отличие экспериментальных результатов и расчета при помощи (2) не превышает величину погрешности эксперимента (обычно это 5-10 %). Дальнейшее увеличение точности расчета может быть достигнуто совершенствованием методики экспериментов по нахождению параметров η , γ функции распределения.

2 Расчетные и экспериментальные данные по электрической прочности электростатического ускорителя «Сокол» с газовой изоляцией на основе бинарной смеси N_2+SF_6

Ускоритель «Сокол» (рис. 2) имеет стандартную для электростатических ускорителей конфигурацию (рис. 3): кондуктор 1 (радиус $r = 215$ мм, длина $L=490$ мм) и опорная изолирующая колонна 2 (внешний диаметр - $D=400$ мм). Они соосны баку (сосуду высокого давления) 3, имеющему радиус $R=500$ мм. Зазор между кондуктором и баком $B=410$ мм. Колонна образована $N=44$ градиентными кольцами (диаметры сечений 12 мм, расстояния между центрами сечений $H=25$ мм).

Все указанные выше элементы высоковольтной структуры изготовлены из нержавеющей стали. При помощи делителя напряжения потенциал равномерно распределен по электродам системы:

$$U_n = (N - n + 1) \frac{U}{N},$$

где U - потенциал кондуктора (максимальный потенциал системы), $n=1...N$.

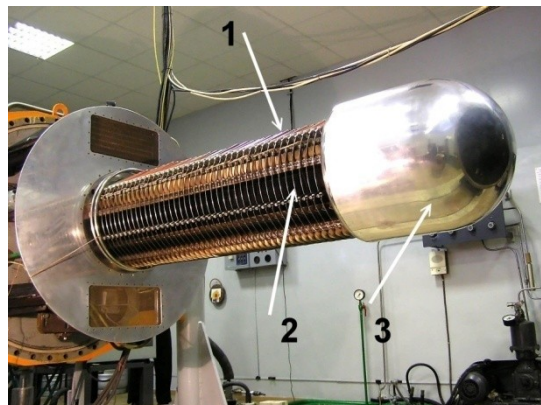


Рис. 2. Общий вид высоковольтной структуры ЭГ «Сокол» (бак снят). 1,2 – опорная изолирующая колонна с кольцами, 3 – кондуктор.

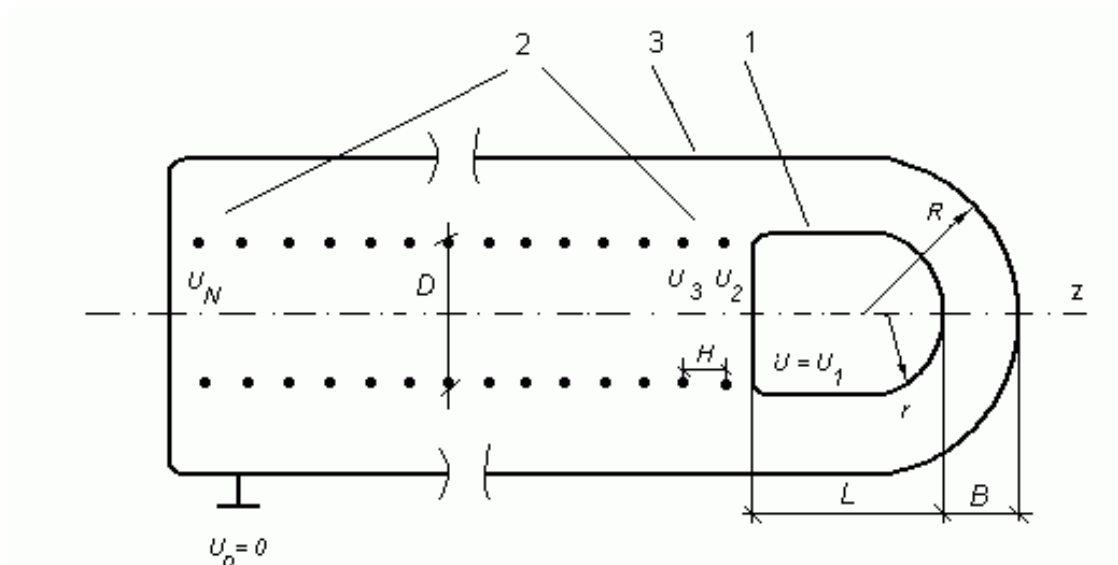


Рис. 3. Расчетная схема ЭГ «Сокол».

При помощи решения интегрального уравнения (2) рассчитывался пробой с кондуктора и градиентных колец колоны на заземленный бак.

На рис. 4 представлены экспериментальные \blacksquare \bullet \blacktriangle и расчетные \square \circ \triangle зависимости $U_{РАБ}$ (P_{20}) при разном содержании SF_6 .

Для достижения рабочего напряжения $U_{РАБ} = 2$ МВ расчётное содержание SF_6 должно быть не менее $f = 5$ % (рис.4).

Напряжение определялось штатным роторным вольтметром ускорителя [12], содержание элегаза при помощи прибора D - 87727 фирмы DILO [13].

Эксперимент проводился согласно методике, описанной в [14].

Данные расчёта и эксперимента расходятся не более чем на 5 %. Это величина порядка погрешности эксперимента.

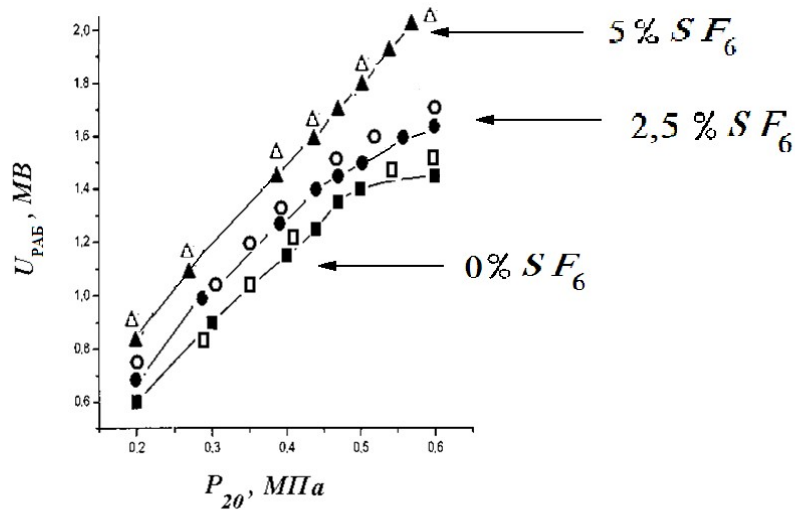


Рис. 4 Расчётные и экспериментальные данные зависимости рабочего напряжения от давления смеси газов при разном содержании элегаза.

Выводы

Согласно данным расчёта и эксперимента для бинарной смеси $SF_6 + N_2$ при предельно допустимом эксплуатационном давлении приведенному к $20^\circ C$ $P_{20} = 0,5$ МПа электрическая прочность ЭГ «Сокол» достигает величины $U_{RAB} = 2$ МВ. Такое напряжение удовлетворяет требованиям, предъявляемым к работе Аналитического ускорительного комплекса ИПФ НАН Украины [12].

Метод расчёта электрической прочности на основе закона роста в дальнейшем предполагается использовать для оптимизации высоковольтной структуры ЭСУ с целью повышения надёжности работы установки.

Работа выполнена в рамках соглашения о сотрудничестве между Национальной Академией наук Украины и Национальным центром научных исследований Франции (CNRS) № II-28-18 «Разработка детекторных систем для экспериментов на ускорителях и технологий для физики ускорителей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ускорение заряженных частиц. Терминология, вып. 89. – М.: Наука. – 1977. – 56 с.
2. Hauschild W., Mosch W. Statistical Techniques for High - voltage Engeniring. – London – 2019. – 312 p.

3. Резвых К.А., Романов В.А., Дельнов В.Н., Глотов А.И. Развитие расчетной модели пробивного потенциала «модуль электрической прочности газа» // Труды XVIII Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям (г. Обнинск, Россия, 20 - 22 октября 2010 г.). – 2011. – С. 114 – 131.
4. Rezvykh K.A. and Romanov V.A. Conditioning and monitoring of cleanness of high voltage system with gaseous insulation //Proceedings of XXIV Russian Particle Accelerator Conference RUPAC 2014. (Sankt-Petersburg, RU, 6 - 10.10 2014). – 2014. – P. 206 – 208.
5. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Под ред. И.П. Верещагина. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 700 с.
6. Игнатьев И.Г. Моделирование электрического поля в электростатических ускорителях с целью оптимизации их высоковольтной структуры: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01: защищена 29.04.93 / Игорь Геннадьевич Игнатьев: Сумы, – 1993. – 132 с. – Библиогр.: с. 115.
7. Ignatiev I.G. Electrophysics of electrostatic charged particle accelerators. High-voltage structure research. (Digest of articles). – Lambert Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland, – 2016. – 88 p.
8. 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., Vol. A423. – 1999. – P. 203 –212.
9. Пономарёв А.Г. Пономарёв А.А. Формирование пучков ионов в ядерном сканирующем микронзонде: монография. Сумы: Коллаж-принт. – 2019. – 368 с.
10. Игнатьев И.Г. Расчет пробивного напряжения систем газоизолированных электродов //Вестник Сумского государственного университета, серия «физика, математика, механика», №10 (56) – 2003. – С. 70 – 73.
11. Игнатьев И.Г., Мирошниченко В.И., Сторожко В.Е. Расчет пробивного напряжения газоизолированной высоковольтной структуры электростатического ускорителя. /Тезисы докладов IV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, (Харьков, 27.02 – 03.03 2006 г.). – 2006. – с. 68.
12. Buhay O.M., Drozdenko A.A., Zakharets M.I., Ignat'ev I.G., Kramchenkov A.B., Miroshnichenko V.I., Ponomarev A.G., Storizko V.E. Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility// Physics Procedia., V.66. – 2015. – P. 166 – 176.
13. Сайт фирмы DILO
http://eknis.net/uploads/files/DILO_SF6_brochure_RU_11.pdf
14. Резвых К.А., Романов В.А. Испытания напряжением и расчет пробивного напряжения газовой изоляции высоковольтного ускорителя //Электричество. – 1988. – №12. – С. 10 –16.

