

УДК 537.5 [621.3]

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ SF<sub>6</sub> НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРО- И ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

© 2011 г.

Д.А. Глушков<sup>1,2</sup>, И.В. Черных<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

danyaGL@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлена математическая модель и результаты расчета электрической прочности промежутка между движущимися контактами высоковольтного коммутационного аппарата в присутствии остаточного ионизованного газа. Учен турбулентный характер движения газа при околосвуковых скоростях на основе  $k-\epsilon$  модели. Совместный анализ электрического и газодинамического полей, а также методика оптимизации конструкции (профиля сверхзвукового сопла) на основе генетических алгоритмов позволяют количественно оценить влияние различных параметров на процесс восстановления электрической прочности промежутка после погасания электрической дуги.

*Ключевые слова:* коммутационный аппарат, электрическая прочность, течение газа, генетические алгоритмы, оптимизация, турбулентность,  $k-\epsilon$  модель.

### Введение

Исследование процессов, происходящих при воздействии на газовый диэлектрик электрического поля при течении газа в сложной геометрии, представляет теоретический и практический интерес вследствие широкого использования сжатого SF<sub>6</sub> (элегаза) в качестве изолирующей среды в высоковольтных энергетических и электрофизических установках, активной среды газоразрядных лазеров и среды гашения электрической дуги в высоковольтной коммутационной технике. Настоящее исследование относится к последнему из перечисленных приложений.

Как отмечал И.М. Бортник [1], проблема расчета восстанавливающейся электрической прочности промежутка дугогасительного устройства теоретически почти не разработана. В данном случае на проблемы развития пробоя газа в нормальных условиях налагаются проблемы учета движения газа, причем при скоростях, близких к звуковым, и в турбулентном режиме, высокой температуре газа, неравномерно распределенной по промежутку его плотности. Присутствие в промежутке остаточного ионизованного газа влияет как на динамику газодинамических процессов, так и на распределение электрического поля в промежутке.

### Физико-химические процессы при разложении SF<sub>6</sub> в газовом разряде

С ростом температуры газа происходит процесс термического разложения SF<sub>6</sub> и для диапазона температур 300–3000 К газ будет содержать 35 компонентов, включая молекулы SF<sub>6</sub> в основном и возбужденном состоянии, ионы, молекулярные продукты термического разложения – SF<sub>5</sub>, SF<sub>4</sub>, SF<sub>3</sub>, SF<sub>2</sub>, SF, F<sub>2</sub>, S<sub>2</sub> – как в основных, так и в возбужденных состояниях, а также атомарные S и F. Между указанными компонентами будут протекать процессы с упругими столкновениями, возбуждения, ионизации и диссоциативной ионизации, захвата электрона, отрыва электронов от отрицательных ионов, рекомбинации. Все эти реакции приводят к изменению электрической прочности: если при температуре 300–1500 К электрическая прочность составляет 89 кВ/(мм·МПа), то при температуре 2000 К – 50 кВ/(мм·МПа), при температуре более 2500 К – около 20 кВ/(мм·МПа) [2].

### Метод анализа электрической прочности промежутка

Анализ электростатического поля и поля давлений выполнялся на основе критерия пробоя  $\xi$ , исходя из стримерного механизма развития раз-

ряда в газе [3]. А именно, отношение давления газа  $p^n$  ( $n = 0.88$ ) в данной точке к напряженности поля  $E$  не должно снижаться ниже критического значения  $\xi_{CR}$ .

### Модель и результаты расчета газодинамических процессов

Расчет параметров течения газа в диапазоне околозвуковых скоростей обычно проводится на основе решения уравнений Эйлера для сжимаемой жидкости. Неучет вязкости в таких расчетах приводит к получению некорректных решений (например, к срыву потока – отрыв потока от стенки сопла) в сверхзвуковых областях течения [4]. Учет механизмов, ответственных за диссипацию энергии потока (вязкости и турбулентности), делает постановку задачи более корректной и приводит к изменению характера течения. Расчетная модель высоковольтного аппарата показана на рис. 1. Для сокращения времени счета трехмерная геометрия сведена к двумерной, задача дается в осесимметричной постановке.

На рисунке обозначено: 1 – неподвижный контакт; 2 – подвижный контакт; 3, 4 – изоляционные сопла; 5, 6 – система экранов. Геометрические параметры сопла 3 определяются по результатам оптимизации.

Navier–Stokes). Учет турбулентного характера движения среды выполнен в рамках  $k$ – $\epsilon$  модели турбулентности [5]. Решение поставленной задачи проводилось численно в пакете COMSOL 4.0a. Дискретизация расчетной области проводилась по методу конечных элементов. Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений применялся обобщенный метод минимальных невязок (GMRES) [6].

На рис. 1 отмечены области возможного перехода потока в сверхзвуковой режим. Совместное исследование поля скоростей потока и поля давлений показывает, что в области сопла подвижного контакта 2 течение становится сверхзвуковым. Это сопровождается соответствующим снижением давления и, следовательно, возможным снижением электрической прочности газа в рассматриваемой области.

На рис. 2 показано распределение давления газа и поле скоростей потока для момента времени, предшествующего открытию основного сопла. Скорости газа приведены в числах Маха, давление – относительно статического давления.

Выполненные расчеты позволяют выявить критические области промежутка, в которых существует возможность возникновения ионизационных процессов, что может привести к электрическому пробую.

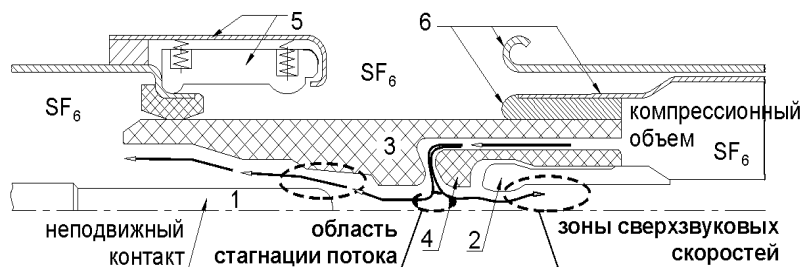


Рис. 1

Модель расчета поля потока основана на уравнениях гидродинамики вязкой жидкости с применением RANS-подхода (Reynolds Averaged

Методика оптимизации конструкции на основе генетических алгоритмов [7] позволяет установить связь между геометрическими параметра-

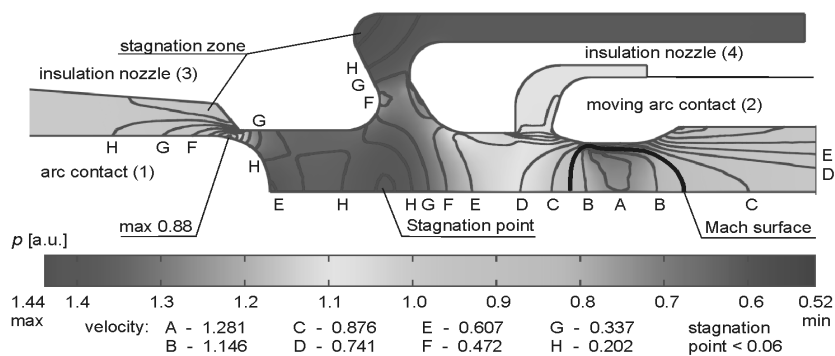


Рис. 2

ми сопла 3 и целевым параметром расчета – выдерживаемым (при заданном давлении и расстоянии между контактами) напряжением.

*Список литературы*

1. Бортник И.М. // Изв. РАН. Энергетика. 1993. №5. С. 52–62.
2. Robin-Jouan Ph., Yousfi M. // Plasma Science and Technology. 2007. Vol. 9, No 6. P. 690–694.
3. Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1997.
4. Park S.-K., Park K.-Y., Choe H.J. // Computer Physics Communications. 2007. Vol. 177. P. 729–737.
5. Wilcox D. Turbulence modeling for CFD. DSW Industries, Inc. 1994. 460 p.
6. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. Philadelphia: SIAM, 2000. 540 p.

**THE ANALYSIS OF DIELECTRIC STRENGTH SF<sub>6</sub> ON THE BASIS OF CALCULATION OF ELECTRIC AND GAS-DYNAMIC FIELDS AND THE DESIGN OPTIMIZATION OF HIGH-VOLTAGE GAS CIRCUIT BREAKERS BASED ON THE GENETIC APPROACH**

*D.A. Glushkov, I.V. Chernych*

A mathematical model and the results of calculation of the electric strength of the gap between the moving contacts of a high-voltage switchgear in the presence of residual ionized gas are presented. Based on the  $k$ - $\epsilon$  model, the turbulent nature of the gas at near-sonic velocities is taken into account. Joint analysis of the electric and gas-dynamic fields, as well as the design optimization technique (for the supersonic nozzle profile) based on genetic algorithms make it possible to quantify the effect of different parameters on the recovery of electric strength after a period of extinction of the arc.

*Keywords:* switchgear, high voltage circuit breakers (Switchgear), electrical strength, gas flow, genetic algorithms, optimization, turbulence,  $k$ - $\epsilon$  model.