

*В. В. Гопанчук, М. Ю. Потапенко*

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ  
В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ  
СИСТЕМ ПОДАЧИ РАБОЧЕГО ТЕЛА  
ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Представлены результаты исследования условий возникновения электрического пробоя газа в диэлектрических изоляторах тракта подвода рабочего тела (ксенона) к аноду перспективных высокоимпульсных электрореактивных двигателей повышенной мощности, предназначенных для ориентации и стабилизации космических аппаратов.*

*The results of study of conditions of origination of electrical breakdown of gas in dielectric insulators of anode propellant (xenon) supply lines of prospective high-impulse increased-power electric thrusters intended for spacecraft orientation and stabilization are presented.*

**Ключевые слова:** электрический пробой газа, электрореактивный двигатель, электрический изолятор.

**Key words:** Gas Breakdown, Hall or Stationary Plasma Thruster, Electrical Insulator.

Исследования электрических пробоев в газах при низких давлениях в магистралях подачи рабочего тела (РТ) представляют интерес при разработках электрореактивных двигателей (ЭРД), в особенности ЭРД повышенной мощности, обеспечивающих высокие скорости истечения (удельный импульс), достигаемые на режимах с большими напряжениями разряда. В связи с этим должны быть обеспечены достаточные запасы электрической прочности различных элементов электрических цепей конструкции ЭРД. Одним из наиболее критичных элементов конструкции ЭРД является электрический изолятор (газоэлектрическая развязка), предназначенный для электрической разобщенности разных участков магистрали подачи РТ, которые при работе находятся под различными потенциалами, и обеспечения достаточной электрической прочности конструкции, в частности анодного тракта ЭРД.

На возникновение электрического пробоя оказывают влияние основные параметры: давление газа, расстояние между электродами и состав рабочего газа, а также множество других факторов: рабочая температура, электрический потенциал электродов, конфигурация и геометрическая форма электродов, материал изолятора и т.д.

В данной работе представлены результаты исследования пробоя газа в газоэлектрической развязке при проведении испытаний в условиях, имитирующих эксплуатационные условия ЭРД. Цель работы – изучение влияния расстояния между электродами, рабочей температуры и расхода ксенона на пробойные характеристики двух вариантов конструкции газоэлектрических развязок ЭРД, обеспечивающих высокие удельные импульсы с рабочим диапазоном напряжения разряда до 1000 В, и оценка запасов ее электрической прочности.

Газоэлектрическая развязка ЭРД представляет собой трубчатый изолятор из керамики, например из  $Al_2O_3$ , размещаемый в разрыве трубопровода подачи РТ и герметично соединенный с его концевыми металлическими частями, образуя соединения типа «металл – керамика». При работе ЭРД в проточной части газоэлектрической развязки газ находится при низком давлении. В общем случае напряжение пробоя в газах описывается законом Пашена [1]

$$U = \frac{a \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + b},$$

где  $U$  – напряжение пробоя;  $p$  – давление;  $d$  – расстояние между плоскими электродами;  $a$  и  $b$  – постоянные, зависящие от состава газа.

График зависимости  $U(p \cdot d)$  называется кривой Пашена, по которой может быть определен минимум напряжения газового пробоя.

Конструктивная схема базовой газоэлектрической развязки, используемой в двигателе, работающем при напряжении разряда 300 В и расходе ксенона до 6 мг/с [2], представлена на рисунке 1. Газоэлектрическая развязка содержит два керамических изолятора цилиндрической формы, герметично соединенных с подводящей и отводящей частями магистрали подачи РТ, а также между собой через токопроводящую металлическую деталь цилиндрической формы (проставка), которая при работе ЭРД находится под плавающим потенциалом.

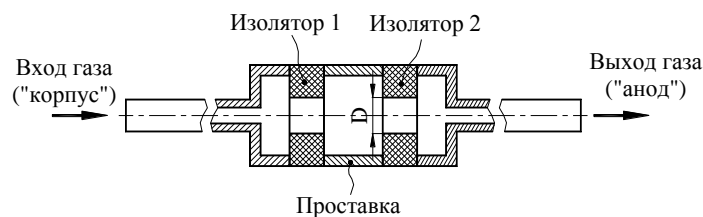


Рис. 1. Схема базовой газoeлектрической развязки двигателя

Повышение электрической прочности базового варианта газoeлектрической развязки может быть достигнута повышением давления в газовом промежутке, образованном при помощи двух изоляторов, за счет размещения на выходе из второго изолятора дроссельной шайбы. Вариант такой конструкции (рис. 2) был апробирован при разработке экспериментальной модели высокоимпульсного ЭРД, работающего на мощности до 2,3 кВт, напряжении разряда до 1250 В и расходе ксенона до 5,4 мг/с [3].

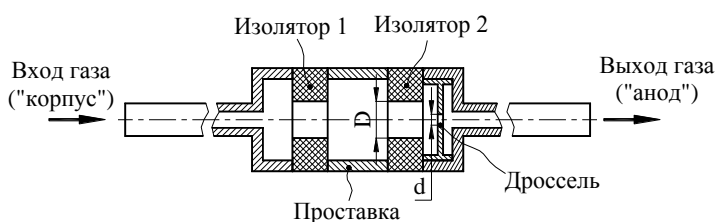


Рис. 2. Схема модифицированной газoeлектрической развязки экспериментального высокоимпульсного ЭРД

Отличительная особенность конструкции данной развязки — наличие на выходе дроссельной шайбы с отверстием диаметром  $d$ , которое меньше диаметра внутреннего отверстия в изоляторах  $D$  и меньше проходного отверстия магистрали подачи рабочего тела, обеспечивающей перепад давления [4].

Исследования условий электрического пробоя в проточной части керамических изоляторов проводились на представленных ниже вариантах газoeлектрической развязки.

1. Газoeлектрическая развязка №1 (рис. 3) отличается от базовой использованием одного изолятора с центральным осевым отверстием, но большей длиной, равной суммарной длине двух изоляторов, применяемых в базовой газoeлектрической развязке. Кроме того, за пределами газового промежутка изолятора, в отводящей части магистрали подачи РТ выполнено дроссельное отверстие диаметра  $d < D$ .

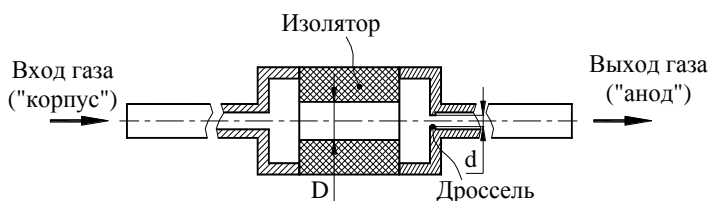


Рис. 3. Схема газoeлектрической развязки №1

2. Газoeлектрическая развязка №2 (рис. 4) отличается от базовой использованием дополнительного изолятора 3 с центральным осевым отверстием, размещенного во внутренней полости тракта между двумя изоляторами, который изолирует внутреннюю металлическую поверхность проставки.

Исследования проводились в условиях высокого вакуума при статическом давлении в вакуумной камере не более  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. Проверка электрической прочности выполнялась пробойной установкой Instek GPI-745A. Время выхода на режим в каждой точке измерения составляло 10 с, а длительность выдержки пробойного напряжения — 60 с. Вероятность возникновения электрического пробоя оценивалась по появлению тока утечки, а возникновение

пробоя контролировалось по возрастанию тока утечки. Фиксирование электрического пробоя осуществлялось пробойной установкой при достижении максимальной величины тока утечки 10 мА.

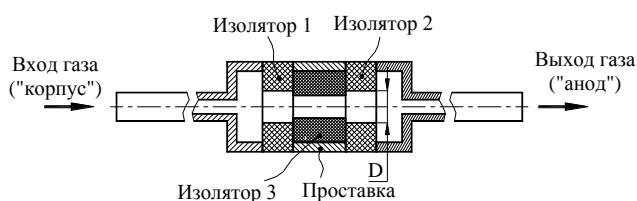


Рис. 4. Схема газoeлектрической развязки №2

Схема измерения напряжения электрического пробоя представлена на рисунке 5.

Температурный режим обеспечивался внешним нагревателем. Задаваемая температура контролировалась «хромель-капелевой» термопарой. При измерениях задаваемое значение температура развязок поддерживалась с точностью  $\pm 2^\circ\text{C}$  от требуемого значения.

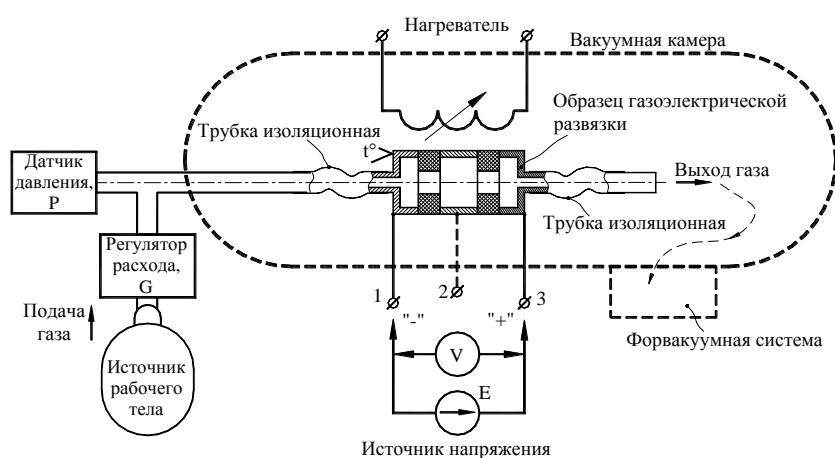


Рис. 5. Схема измерений напряжения пробоя

Исследования проводились для развязки №1 в диапазоне температур от 20 до  $250^\circ\text{C}$ , а для развязки №2 от 20 до  $400^\circ\text{C}$ . Пробойные характеристики образцов исследовались в диапазоне расходов газа до 6 мг/с. При этом расход ксенона изменялся от 0 с шагом 0,25 мг/с.

Для газoeлектрической развязки №1 были определены зависимости напряжений пробоя от расхода ксенона до 2 мг/с, которые представлены в виде модифицированных кривых Пашена на рисунке 6. При расходах ксенона более 2 мг/с электрические пробои происходили во всем диапазоне температур.

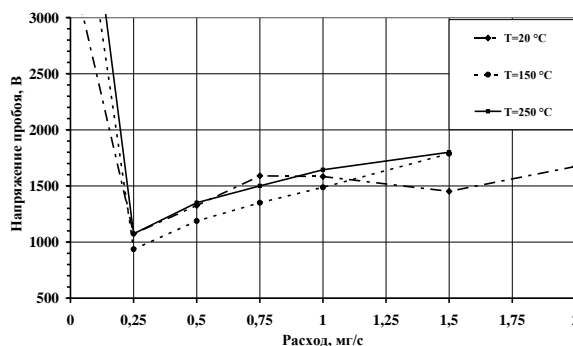


Рис. 6. Зависимость напряжения пробоя от расхода и температуры для газoeлектрической развязки №1

При температуре  $20^\circ\text{C}$  и расходе 1,0 мг/с зафиксирован пробой — Упр.  $\approx 1200$  В. После первого пробоя зафиксировано повышение температуры развязки примерно на  $5^\circ\text{C}$ , в результате чего выросло давление на входе в развязку, после чего увеличилось пробойное напряжение до 1800 В,

при этом верхняя граница расхода газа при пробое снизилась до 1,0 мг/с при температурах 100 и 125 °С и до 1,5 мг/с при температурах от 150 до 250 °С.

При температуре 100 °С и выше наличие пробоев не влияло на температуру газозлектрической развязки.

Результаты испытаний газозлектрической развязки №2 представлены в виде модифицированных кривых Пашена на рисунке 7.

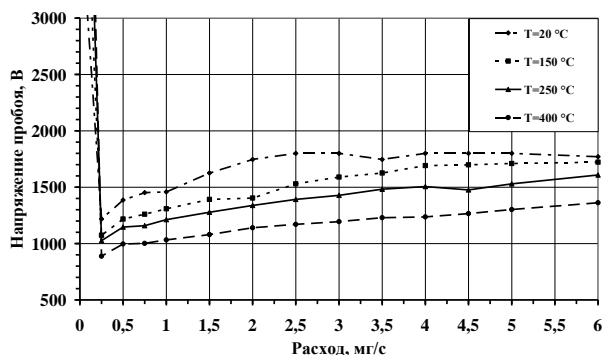


Рис. 7. Зависимость напряжения пробоя от расхода и температуры для газозлектрической развязки №2

На расходах, близких к максимальной границе, были зафиксированы электрические пробои до температуры 125 °С, которые, вероятно, происходили снаружи газозлектрической развязки, так как с уменьшением расхода при температурах 100 и 125 °С происходил рост пробойного напряжения, что свидетельствует о нахождении в «левой» ветви кривой Пашена, что, видимо, было обусловлено негерметичностью соединений газозлектрической развязки.

Пробои внутри развязки были зафиксированы при температуре:

20 °С — начиная с 2 мг/с и составляет  $U_{\min \text{ пр.}} = 1218 \text{ В}$ ;

100 °С — начиная с 2,5 мг/с и составляет  $U_{\min \text{ пр.}} = 1200 \text{ В}$ ;

125 °С — начиная с 3 мг/с и составляет  $U_{\min \text{ пр.}} = 1194 \text{ В}$ .

При больших температурах пробои внутри развязки происходили во всем диапазоне расходов от 0,25 до 6,0 мг/с.

В процессе работы исследовано влияние расстояния между электродами в сочетании с конфигурацией проточной части изоляторов, рабочей температуры и расхода газа на электрическую прочность газозлектрических развязок, используемых в магистралях подачи газа ЭРД. Определено, что для повышения минимального значения напряжения пробоя необходимо увеличивать расстояние между электродами (средняя скорость изменения 16 В/мм). Повышение температуры или уменьшение расхода рабочего газа приводит к снижению напряжения пробоя. По результатам исследований газозлектрических развязок определена возможность расширения области их применения в составе ЭРД и установлено, что оба варианта обеспечивают рабочую область при напряжениях разряда до 600 В (с обеспечением 30 % запаса), при расходах до 2 мг/с и температурах до 250 °С для образца №1, а при расходах до 6 мг/с и температуры до 400 °С для образца №2. Определены пороги электрической стойкости исследованных газозлектрических развязок. Исходя из сравнительного анализа, можно сделать вывод о том, что при высоковольтных режимах работы ЭРД предпочтительней применять газозлектрическую развязку №2.

#### Список литературы

1. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: учеб. руководство. М., 1987.
2. Kozubsky K., Kudriavtsev S. et al. Study of Gas-Electrical Terminal in SPT // IEPC-99–062, 26th International Electric Propulsion Conference, Kitakyuschi, Japan, 1999.
3. Manzella David H., Jacobson David T. et al. High Voltage SPT Performance // AIAA-2001–3774, 37th Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, 2001.
4. Патент РФ №2191289, кл. 6 Н 05Н 1/54, F 03Н 1/00.

#### Об авторах

В. В. Гопанчук — ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград.

М. Ю. Потапенко — инженер ФГУП ОКБ «Факел», асп., РГУ им. И. Канта, mira-world@yandex.ru

## **Authors**

V. Gopanchuk – Leader Designer SPT EDB Fakel, Kaliningrad.  
M. Potapenko – engineer EDB Fakel, PhD student, IKSUR.