УДК 621.455

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОБОЕВ В ТРАКТЕ ПОДАЧИ РАСХОДА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2019 г. Д. А. Каширин^{1, *}, С. А. Семенихин¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)"

(НИИ ПМЭ МАИ), Москва, Россия *e-mail: kashirinrock93@vandex.ru

Поступила в редакцию 03.04.2019 г. После доработки 19.04.2019 г. Принята к публикации 25.04.2019 г.

При отработке конструкции высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) возникает множество технически сложных вопросов по обеспечению электрической прочности его узлов [1]. Среди всех элементов наиболее критичным, в части возникновения электрического пробоя, является газоэлектрическая развязка (ГЭР) в магистрали подачи ксенона в разрядную камеру ВЧИД. Помимо наличия высокого напряжения и давления газа, достаточных для развития пробоя, здесь могут присутствовать, вследствие наличия плазмы в газоразрядной камере (ГРК), внешние ионизаторы – электроны, ионы, заряженные микро и макрочастицы. При этом возникновение пробоя в газоэлектрической развязке приводит не только к разрушению ее элементов, но и способствует "несанкционированному поджигу" высокочастотного разряда в камере двигателя. В статье рассматриваются вопросы разработки газоэлектрических развязок для высокочастотных ионных двигателей малой мощности. Получена экспериментальная зависимость пробойного напряжения от произведения давления на расстояние, в условиях работы ГЭР в составе ВЧИД. Сформулированы основные требования к параметрам газоэлектрической развязки, обеспечивающей работу ВЧИД в широком диапазоне изменения расхода рабочего тела – при длине диэлектрической части порядка 5 см и напряжении ~2000 В, давление внутри нее должно быть не менее 30 Торр.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель, газоэлектрическая развязка, пробой, внешние ионизаторы

DOI: 10.1134/S0002331019030099

введение

Газоэлектрическая развязка является одним из необходимых компонентов ВЧИД малой мощности, работающих при низких (0.3–0.5 мг/с) и сверхнизких (менее 0.1 мг/с) значениях расхода. В связи с чем, актуальность ее разработки определяется необходимостью создания двигателя в целом. В настоящее время появился целый ряд задач, для решения которых предполагается широкое использование малых космических аппаратов [2]. Высокочастотный ионный двигатель, являясь исполнительным органом системы управления орбитальным движением МКА, позволяет увеличить срок активного существования аппаратов и, как результат, обеспечить более эффективное их использование [3].



Рис. 1. Внешний вид ГЭР первого варианта исполнения.

В существующих моделях двигателей зарубежного производства узел развязки обычно встроен в днище разрядной камеры, что значительно усложняет конструкцию ГРК и технологию ее изготовления. В высокочастотных ионных двигателях разработки НИИ ПМЭ МАИ предполагается использование ГЭР в виде отдельного изделия. Это позволяет снизить влияние на пробой развязки не только температурного фактора, но и внешних ионизаторов.

НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Газоэлектрическая развязка предназначена для разделения между собой электрических цепей находящихся под высоким (порядка +1000...+2000 В) и нулевым потенциалом (корпус изделия) и предотвращает возникновение пробоя по газу в системе подачи рабочего тела высокочастотного ионного двигателя. Ее принцип действия основан на создании условий препятствующих возникновению "электронных" лавин в газовой среде внутри корпуса развязки при работе в составе ВЧИД.

Схематично процессы, происходящие в ГЭР при работе в составе ВЧИД, можно описать следующим образом:

- после подачи рабочего тела в объеме ГЭР создается давление *p*;

— далее подается потенциал на эмиссионный электрод $U_{\Im\Im}$;

— после зажигания разряда в ГРК на выходе ГЭР, связанном непосредственно с газовводом камеры, появляется потенциал близкий по значении к $U_{\Im\Im}$, при этом внутри ГЭР возникает электрическое поле напряженностью $E \sim U_{\Im\Im}/d$ (здесь d — расстояние между входом и выходом ГЭР находящихся под разным потенциалом (рис. 1));

 наличие плазмы в ГРК обуславливает появление внешних ионизаторов – электронов, ионов, заряженных микро и макрочастиц;

— пробой ГЭР не происходит, потому что ее параметры (давление *p* и расстояние *d*) соответствуют пробойному напряжению существенно большему чем величина $U_{\Im\Im}$, даже при наличии внешних ионизирующих факторов.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Первый вариант ГЭР ВЧИД представлял из себя фторопластовую трубку диаметром 2 мм и длиной 10–15 см (рис. 1).

При ее испытаниях отдельно от ВЧИД, в диапазоне расходов ксенона 0.5–0.1 мг/с и разности потенциалов на ее концах порядка 2000 В, пробоя развязки не наблюдалось. После установки на двигатель, при возникновении разряда в ГРК, пробой этой развязки, в аналогичном диапазоне расходов, визуально наблюдался, начиная с напряжения $U_{\rm np} \sim 900-600$ В. Подобное падение напряжения пробоя есть результат влияния внешних ионизаторов, попадающих во внутреннюю полость развязки из плазмы находящейся в объеме ГРК. Все попытки поднять $U_{\rm np}$ путем увеличения соотношения



Рис. 2. Вид зависимости закона Пашена.



Рис. 3. Схема развязки с набивкой.

длины диэлектрического участка к его внутреннему диаметру не дали практически никакого результата.

Таким образом, в условиях работы ионного двигателя малой мощности (высокое напряжение, малый расход, наличие внешних ионизаторов), нельзя использовать газоэлектрические развязки традиционного варианта исполнения, поскольку в них имеют место такие параметры среды, при которых мы фактически находимся, на кривой подобной кривой Пашена, в области пробоев (рис. 2) [4]. Чтобы их устранить, необходимо увеличить длину диэлектрической части развязки (*d*) и давление (*p*) в ней, то есть сместиться в сторону больших значений произведения *pd* [5].

На втором этапе исследований изучалась работа газоэлектрической развязки обладающей существенным гидросопротивлением, т.е. с повышенным давлением *p*. Одна из них была с набивкой из стружки титана, а другая — с дроссельным отверстием. Схемы их конструкций приведены на рис. 3 и 4, соответственно.

В обоих случаях, при работе в составе двигателя, в диапазоне расходов от 0.1 до 0.5 мг/с при $U_{\Im\Im} = 2000$ В, пробоев ГЭР не наблюдалось. Таким образом, основным путем решения проблемы пробоев газоэлектрической развязки, при работе в составе ВЧИД



Рис. 4. Схема развязки с дроссельным отверстием.



Рис. 5. Схема установки для исследований ГЭР.

малой мощности, является повышение давления в ней до уровня исключающего возникновения разряда.

Для дальнейших исследований ГЭР ВЧИД была разработана и изготовлена установка, схема которой представлена на рис. 5.

В состав данной установки входят следующие системы и элементы:

- блоки питания: катода накального типа, ускоряющего и эмиссионного электродов;
- вакуумная камера с системой откачки (до 5×10^{-5} Topp);
- высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД);
- ВЧ-генератор с согласующим устройством;
- газоэлектрическая развязка;
- датчик давления;
- датчик температуры;
- диэлектрическая вставка;
- источник смещения потенциала;
- катод накального типа для поджига разряда во ВЧИД;



Рис. 6. Схема конструкции макета.



Рис. 7. Фотография макета ГЭР.

- миллиамперметр для измерения тока утечки;

- система подачи расхода ксенона.

Напряжение пробоя газоэлектрической развязки зависит от многих факторов, в частности от материала входящих в ее состав элементов, качества изготовления корпусных деталей (шероховатости поверхности), соотношения длины и диаметра диэлектрической части. Поэтому, для повышения степени однозначности трактовки получаемых результатов и на основании имеющегося опыта испытаний лабораторных газоэлектрических развязок, был разработан базовый вариант конструкции ГЭР. Он являлся основой для создания макетов с разными значениями параметров *p* и *d*, которые изготавливались по одной технологии, с использованием одинаковых материалов.

Один из вариантов подобного макета (ГЭР-5) представлен на рис. 6. Газоэлектрическая развязка выполнена в виде блока, представляющего из себя неразборное изделие, с установленным внутри гидросопротивлением. Она состоит из входного 1 и выходного узлов 2, и диэлектрической части 3 длиной 5 см. Уплотнение ГЭР в тракте подачи расхода осуществлялось с помощью ниппельных соединений с медными прокладками. Гидросопротивление было расположено в выходном узле. Внешний вид макета приведен на рис. 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАКЕТОМ ГЭР-5

На первом этапе исследований макета ГЭР методика испытаний состояла в следующем:

– сначала определялась зависимость напряжения пробоя от давления газа при отключенном ($N_{BY\Gamma} = 0$ BT) и включенном BЧ-генераторе ($N_{BY\Gamma} = 200$ BT) при отсутствии в ГРК ВЧ-разряда (рис. 5);



Рис. 8. График зависимости напряжения пробоя от произведения давления в ГЭР на расстояние между элементами ее конструкции находящимися под разными потенциалами.

— затем, зажигался разряд в ГРК и функция $U_{np}(p)$ определялась при наличии плазмы (мощность на выходе ВЧ-генератора при этом, как и в предыдущем случае, составляла 200 Вт);

Регистрация пробоя осуществлялась по появлению тока утечки в цепи "вход ГЭР-корпус".

На графике на рис. 8 приведены полученные результаты.

Видно, что величина напряжения пробоя развязки не зависит от наличия ВЧ поля при отсутствии в ГРК ВЧ-разряда. При наличии плазмы в ГРК и мощности ВЧ-генератора 200 Вт, напряжении на эмиссионном электроде до 3000 В, в диапазоне расходов 0.5–0.1 мг/с пробой ГЭР зафиксировать не удалось. Точка на графике с координатами (pd = 225 Торр·см; $U_{np} = 2800$ В) соответствует расходу 0.1 мг/с. При более меньших расходах ксенона ВЧ-разряд в ГРК становится нестабильным и гаснет до достижения пробойного напряжения.

При испытаниях ГЭР также снималась газодинамическая характеристика изделия – зависимость давления внутри развязки от расхода ксенона. Она представлена на рис. 9. Сопоставление полученных графиков на рис. 8 и рис. 9 показывает, что, начиная с давления порядка 25–30 Торр, пробой развязки не происходит даже при 3000 В. Сверху уровень давления в ГЭР ограничивается параметрами используемого регулятора расхода – критическим перепадом давления на нем, при котором расходная характеристика остается неизменной. Таким образом, можно сделать вывод,



Рис. 9. График зависимости давления внутри развязки от расхода ксенона.

что для выполнения своего функционального назначения при использовании в составе ВЧИД малой мощности, при напряжениях уровня 2000 В, газоэлектрическая развязка длиной ~5 см должна иметь гидросопротивление, обеспечивающее создание в ГЭР давления выше 30 Торр.

В дальнейшем предполагается продолжить эти исследования при более меньших значениях произведения *pd* снизив величину гидросопротивления. При этом планируется более детально изучить влияние на напряжение пробоя не только мощности ВЧ-поля и наличия ВЧ-разряда, но и температуры развязки и ее положения относительно корпуса ГРК.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЭР

На основании проведенных исследований газоэлектрических развязок различного исполнения даны рекомендации по конструкции ГЭР модульного исполнения, применяющихся в ионных двигателях малой мощности, работающих при уровне напряжений до 2000 В. При этом газоэлектрическая развязка длиной ~5 см должна иметь гидросопротивление, обеспечивающее создание в ГЭР давления выше 30 Торр.

Установлено, что величина напряжения пробоя развязки не зависит от наличия ВЧ поля при отсутствии в ГРК ВЧ-разряда.

Определены направления дальнейших исследований ГЭР.

Полученные результаты испытаний лабораторных образцов и макета развязки могут быть использованы при разработке штатных образцов ГЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Гришин Р.А., Кожевников В.В., Плохих А.П., Попов Г.А., Хартов С.А. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 2. С. 4–14.
- 2. *Макриденко Л.А., Боярчук К.А.* Микроспутники. Тенденции развития. Особенности рынка и социальное значение // Вопросы электромеханики. 2005. Т. 102. С. 12–27.
- 3. Звездин И. Малые космические аппараты: перспективы рынка // Взлет № 1. 2005. С. 50–55.
- Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений// Конспект лекций. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 137 с.
- Гопанчук В.В., Потапенко М.Ю. Исследование условий газоэлектрического пробоя в проточной части электрических изоляторов систем подачи рабочего тела электроракетных двигателей // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. В. 4. С. 131–137.

Study of Electrical Breakdowns in the Propellant Feed Line of a Low-Power Radio-Frequency Ion Thruster

D. A. Kashirin^{*a*}, * and S. A. Semenikhin^{*a*}

^aResearch Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (RIAME MAI), Moscow, Russia *e-mail: kashirinrock93@yandex.ru

During the development and optimization of radio-frequency ion thrusters (RIT), a lot of technically complicated problems on ensuring the electrical strength of their components emerge. Among all elements, the gas-electric isolator in the xeпоп feed line to the RIT discharge chamber is the most critical one in terms of the occurrence of electrical breakdown. In addition to the high voltage and gas pressure sufficient for the development of breakdown, the external ionizers-electrons, ions, charged micro and macro particles-may be present in such isolator due to the presence of plasma in the gas discharge chamber. Thus, the occurrence of breakdown in the gas-electric isolator can not only lead to the destruction of its elements, but also contribute to the "unauthorized ignition" of the radio-frequency discharge in the thruster chamber. The article considers development of gas-electric isolators for low power radio-frequency ion thrusters. An experimental dependence of the breakdown voltage on the product of pressure and distance is obtained under the conditions of gas-electric isolator operation as a part of RIT. The basic requirements to the parameters of gas-electric isolator, which ensures the operation of RIT in a wide range of propellant flow rates, are formulated for the length of the dielectric part of about 5 cm and voltage of ~ 2000 V, the pressure inside it must be at least 30 Torr.

Keywords: radio-frequency ion thruster (RIT), gas-electric isolator, breakdown, external ionizers