

M. V. Kubrikov, V. Yu. Zhuralev

SOFTWARE FOR REALISATION OF MATHEMATICAL MODEL OF REVERSING DIAPHRAGM-SEPARATORS OF FUEL TANKS

In the article we present a model of reversing metallic separators of long fuel tank engine units of space vehicles, the model is based on usage of the energy principle.

Keywords: thin-walled diaphragm-separator, fuel tank, reversing, shell.

© Кубриков М. В., Журавлев В. Ю., 2010

УДК 629.76/78.001.63

И. А. Максимов, А. Б. Надирадзе

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований по определению условий возникновения разрядных процессов в высоковольтном оборудовании космических аппаратов. Даны критерии для формирования системы граничных условий, реализация которых может привести к развитию разрядных процессов.

Ключевые слова: разрядный процесс, негерметичный приборный отсек, пробой, параметры плазмы, вольтамперная характеристика.

Как показывает опыт натурной эксплуатации космических аппаратов (КА), наличие плазмы в области высоковольтного оборудования (ВВО), является негативным фактором и может привести к нарушению нормального функционирования аппаратуры и КА в целом.

С точки зрения возможности возникновения электрических разрядов наибольший интерес представляют величины давления газа и параметры плазмы внутри негерметичного приборного отсека (НГПО) в области размещения высоковольтного оборудования.

Параметры плазмы, проникающей в НГПО, определяются конструкцией и площадью вентиляционных отверстий, взаимным расположением и типом используемых стационарных плазменных двигателей (СПД). По оценкам, приведенным в [1], при использовании двигателей типа СПД-100, СПД-70 концентрация плазмы внутри НГПО составляет $10^4 \dots 10^6 \text{ см}^{-3}$ при средней энергии ионов 10–30 эВ.

В настоящее время известно несколько физических явлений, которые потенциально могут приводить к сбоям в работе бортовой аппаратуры (БА), некоторые из них рассмотрены автором в [2; 3].

Первоначально проведем оценку величины паразитных токов, наводимых на элементах электрических схем высоковольтной БА, в случае проникновения плазмы СПД.

Механизм возникновения паразитных токов обусловлен протеканием электронных и ионных токов через поверхность проводников, контактирующих с плазмой. При этом величина тока определяется зондовой характеристикой «контакта» и параметрами окружающей плазмы.

Проведенные в [4] оценки показывают, что при давлении $p = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ торр. внутри НГПО, имеющего характерные размеры 1–2 м, реализуется бесстолкновительное движение частиц газа. Поэтому токи утечки можно оценивать исходя из классической теории электрического зонда в плазме.

Классическая теория электрического зонда в плазме [2] дает следующую зависимость полного тока J , текущего на зонд:

$$J = S(j_e - j_i), \quad (1)$$

где S – площадь поверхности зонда; j_e, j_i – плотность электронного и ионного тока.

При постепенном уменьшении отрицательного потенциала зонда, т. е. при удалении по оси абсцисс вправо из области «А», происходит экспоненциальное увеличение электронного тока (участок «В» на рис. 1). На этом участке полный ток, текущий на зонд, обусловлен как электронами, так и ионами. При переходе в область положительных потенциалов – участок «С» зондовой характеристики – ионы перестают попадать на зонд. Здесь ток, текущий на ток, обусловлен только электронами.

Согласно выражению (1), при указанных выше значениях концентрации, ионная компонента тока при напряжении 100 В – 1 кВ может достигать 1–100 мкА/см², а электронная – 0,1–100 мА/см². Эти токи весьма существенны и могут оказывать заметное негативное влияние на работу БА, как в качестве помеховых сигналов, наводимых в электрических схемах, так и в качестве инициатора разрядных процессов.

Условие возникновения разряда является многопараметрической функцией, а физика разряда настолько сложна и многообразна, что, несмотря на большое количество работ по ее исследованию, единый подход к описанию исследуемых в рамках данной работы эффектов на основе только теоретических изысканий было определить весьма сложно.

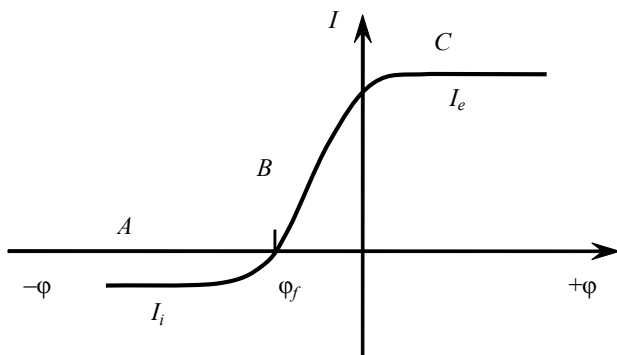


Рис. 1. Типичная вольтамперная характеристика электрического зонда в плазме

Поэтому для более точного определения условий возникновения разрядных процессов, изучения физики наблюдаемых процессов и разработки на этой основе методов и средств защиты КА было необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований, реализованных совместно специалистами ОАО «ИСС» и ГОУ ВПО Московского авиационного института.

Первая часть экспериментов проводилась без включения источника плазмы. Измерялись вольтамперные характеристики разрядных промежутков при давлении $(1-5) \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. в диапазоне напряжений 0–3 кВ. Было установлено, что во всем диапазоне напряжений между электродами, при различной комбинации электродов и полярности включения пробоев не наблюдается. Ток между электродами был ниже разрешающей способности измерительных приборов (0,1 мкА).

Вторая часть экспериментов была направлена на определение вольтамперных характеристик разрядных промежутков. По результатам предварительных измерений было установлено, что объемный пробой возникает при условии наличия плазмы при положительном (относительно корпуса разрядной камеры) напряжении на электродах [3; 4]. Причем противозлектроды в любых комбинациях практически не влияют на форму вольтамперной характеристики и напряжение пробоя.

Согласно полученным экспериментальным данным, горение дуги происходит при напряжении на электродах от 100–150 до 700–800 В и выше. Максимальный ток разряда составил ~50 мА. Мощность, выделяемая при разряде, изменяется в пределах 1–400 Вт/см², что является более чем достаточным для сильного нагрева электрода и испарения диэлектрика. Анализ этих данных позволяет предположить, что механизм возникновения самостоятельного разряда – тепловой.

По мере увеличения тока через электрод происходит его нагрев (об этом свидетельствует отжиг электрода «Антенна» и наличие на его поверхности каплеподоб-

ных образований) тепло передается прилегающему к электроду диэлектрику (фторопласт), который начинает испаряться. За счет испарения диэлектрика давление вблизи электрода повышается настолько, что становится возможной ионизация частиц электронами, ускоренными полем электрода. Появление дополнительных носителей заряда приводит к лавинообразному увеличению тока, тепловыделения и, соответственно, скорости испарения. В результате этих процессов замыкается петля положительной обратной связи, что проявляется в виде падающей вольтамперной характеристики. Тепловой механизм косвенно подтверждается неустойчивым характером горения дуги и ростом давления в РК, наблюдаемым при возникновении разряда.

Механизм пробоя, по результатам предварительного анализа, заключается в следующем.

С ростом напряжения и тока происходит нагрев электрода за счет выпадающих на него электронов. Нагрев электрода сопровождается нагревом прилегающего к нему диэлектрика (фторопласт, керамика). В результате нагрева увеличивается газовыделение диэлектрика, давление вблизи анода повышается. Ускоренные электроны взаимодействуют с облаком частиц газа, выделяемого диэлектриком, в результате чего образуются дополнительные носители заряда. При достижении некоторых критических значений напряжения и тока происходит пробой, сопровождающийся резким увеличением тока и температуры анода (диэлектрика). Давление вблизи анода значительно увеличивается, о чем говорят результаты измерения давления в разрядной камере во время пробоя.

Как отмечалось выше, критическое напряжение зажигания разряда для рассматриваемых условий находится в диапазоне от 100 В и выше, а критическое значение тока является сложной функцией от таких параметров, как концентрация плазмы, электрофизические параметры прилегающего диэлектрика, геометрии, площади и материала электродов, и определяется экспериментально для каждого конкретного случая. Для разработчиков бортовой радиоэлектронной аппаратуры и КА необходимо учитывать, что если в электрических цепях прибора есть напряжение более 100 В, тогда при определенных условиях возможно развитие разрядных процессов.

Необходимо отметить, что наблюдавшиеся в экспериментах пробой, являются чрезвычайно сложными физическими явлениями, объяснение которых сопряжено с разрешением множества противоречивых данных.

По косвенным данным, в условиях, реализованных в эксперименте, температура электродов могла достигать 550–600 °С и выше, о чем свидетельствует отожженное состояние медных электродов типа «Антенна».

Фотографии образцов, подвергшихся действию разряда, приведены на рис. 2.

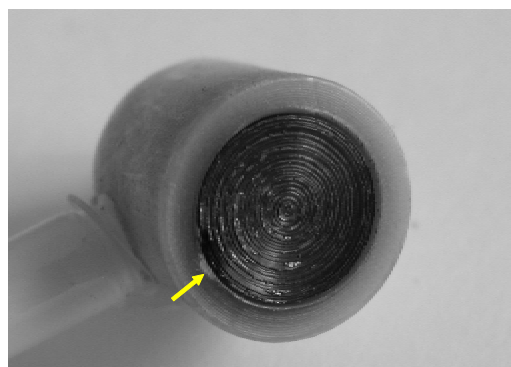
На фотографиях видно, что диэлектрик, примыкающий к электроду, носит ярко выраженные следы испарения материала. Испарение, скорее всего, происходило с мест, непосредственно примыкающих к электроду (рис. 2, а). Более удаленные точки получают меньше тепла и не испаряются.

Следующим шагом необходимо провести адаптацию вышеприведенных условий возникновения пробоя к ре-

альной ситуации с учетом возможных физических условий и существующих параметров электрических схем и конструкции БА.



а



б

Рис. 2. Следы испарения диэлектрика на электродах:
а – «Острие»; б – «Диск-3» (места интенсивного испарения показаны стрелками)

Очевидно, что приведенные выше условия необходимо учитывать при проектировании и изготовлении КА, а также при проведении его наземной экспериментальной отработки.

Библиографические ссылки

1. Расчетная модель для оценки проникания плазмы электроракетных двигателей в приборные отсеки космического аппарата / В. В. Иванов [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 3. Красноярск, 2006. С. 49–52.
2. Механизмы воздействия плазмы электроракетных двигателей на работу бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. В. Иванов [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 3. Красноярск, 2007. С. 87–91.
3. Максимов И. А., Иванов В. В. Разработка и экспериментальная отработка критериев стойкости высоковольтного оборудования к воздействию плазмы, формируемой стационарными плазменными двигателями : науч.-техн. отчет ОНТ250-654-08. НПО ПМ. Железнодорожск, 2008. С. 38, инв. № 13386.
4. Воздействие плазмы электроракетных двигателей на бортовое высоковольтное оборудование / В. В. Иванов [и др.] // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию запуска на орбиту навигационного КА «Космос-192» и 25-летию запуска первого КА «Глонасс» (10–14 октября 2007, г. Железнодорожск). Железнодорожск, 2007. С. 117–119.

I. A. Maksimov, A. B. Nadiradze

DETERMINATION OF CONDITIONS OF DISCHARGE PROCESSES OCCURANCE, INITIATED BY LOW TEMPERATURE PLASMA OF SC STATIONARY PLASMA THRUSTERS

The article dwells upon results of experimental researches on conditions determination of discharge processes occurrence in high – voltage SC equipment and presents criteria for formation of system of the boundary conditions, which can, in case of realization, lead to development of discharge processes.

Keywords: discharge process, unpressurized instrument module (UIM), breakdown, plasma parameters, voltage – current characteristic.

© Максимов И. А., Надирадзе А. Б., 2010