

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.3.082.72

ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ: АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОБСТВЕННУЮ ВНЕШНЮЮ АТМОСФЕРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И. В. Юмашев

В работе рассматриваются факторы влияния продуктов работы электроракетных двигателей (ЭРД) на собственную атмосферу космического аппарата (КА) – твердых пылевых частиц, отрывающихся от конструктивных элементов ЭРД в процессе эрозии и рабочего тела данных двигателей – плазмы. Представлен метод регистрации и измерения параметров пылевых частиц без вмешательства в их поток, а также приведена методика измерения коэффициента нейтрализации плазмы. В работе представлены основные расчетные соотношения, требуемые для определения электрических параметров времяпролетного детектора заряженных пылевых частиц с несобирающими нитями, а также приведена функциональная схема канала регистрации пролета пылевой частицы. Описан принцип работы данного детектора.

Ключевые слова: заряженная пылевая частица; квазинейтральная плазма; электростатическая индукция; детектор пылевых частиц; космическая пыль.

В настоящее время для осуществления межпланетных перелетов и коррекции орбиты космических аппаратов [1] представляются перспективными электроракетные двигатели. Обладая малым удельным импульсом тяги, ЭРД способны придать космическому аппарату высокую скорость за счет относительно низкого расхода газа и высокого КПД (до 80%) в купе с большой наработкой на отказ. Наличие загрязнения собственной атмосферы КА доказано в [2]. Для прогнозирования воздействия продуктов работы ЭРД на отдельные конструктивные элементы требуется разработка методов исследования прототипов двигателей в лабораторных условиях. Помимо этого, наличие техногенных частиц в собственной внешней атмосфере (СВА) космического аппарата может исказить результаты исследований, дав ложное представление о составе межпланетного пространства. Представление о поведении пылевой плазмы, а также о заряженных пылевых частицах приведено в [3].

Наличие факела двигателя, состоящего из квазинейтральной плазмы накладывает определенные ограничения на срок службы некоторых конструктивных элементов космических аппаратов. Понятие квазинейтральной плазмы подразумевает равенство количества зарядов с противоположными знаками в составе плазмы, однако не гарантирует полной их рекомбинации. Кроме этого, превалирование одной из составляющих, электронной или ионной может приводить к нежелательным эффектам.

Так, в [4] приводятся результаты исследования воздействия потока электронов на материалы солнечных панелей. При электронном облучении стекла К-208 происходят два типа разрядов: первый – «разряд микровыступ на поверхности стекла – окружающая ионизованная атмосфера», приводящий к увеличению числа и размеров микровыступов; второй – разряд, развивающийся по поверхности стекла с образованием на ней разрядных каналов. Оба разряда сопровождаются выбросом в

окружающее пространство плазмы и изменениями структуры поверхности стекла.

Попадание плазменных струй на поверхность элементов КА вызывают их эрозию, а в результате осаждения продуктов эрозии на поверхность элементов КА образуются загрязняющие плёнки [1].

Условия и методы исследования

Для проведения исследований связанных с продуктами работы ЭРД требуется установка, способная определять основные параметры составляющих факела ЭРД с минимальным влиянием на них. Требование к минимизации воздействия узлов измерителей следует из второго назначения установки – проведение разрушающего контроля элементов КА под воздействием продуктов работы конкретных образцов электрических ракетных двигателей.

Предлагаемая экспериментальная установка (рис.1) может быть условно разделена на три основные части: сборщик низкоскоростных частиц (рис. 1, поз. 2), электронно-ионный сепаратор–измеритель (рис. 1, поз. 3 и 4) и времяпролетный детектор пылевых частиц с несобирающими нитями (рис. 1, поз 5).

Исследуемый двигатель (поз. 1) создает продукты выброса, возможные траектории которых показаны пунктирными стрелками. Сборщик низкоскоростных частиц 2 предназначен для отделения для отделения ионов и пылевых частиц, обладающих малыми скоростями и не имеющих энергии, достаточной для прохождения последующих стадий установки от основного потока ионов и пыли.

Сепаратор измеритель (поз. 3 и 4) состоит из системы аксиальных электродов в виде цилиндрической поверхности и стержня, и предназначен для разделения нерекombинировавшей квазинейтральной плазмы на ионы и электроны, а так же для измерения их количества, исходя из тока. К данным электродам прикладываются потенциалы такие, что для известной скорости истечения плазмы из сопла (20..50 км/с [1]) производится полный сбор электронов и ионов без учета рекомбинации.

Времяпролетный детектор заряженных частиц 5 предназначен для определения параметров быстролетающих частиц без их сбора и состоит из нескольких плоских сеток, состоящих из параллельных нитей (рис. 2).

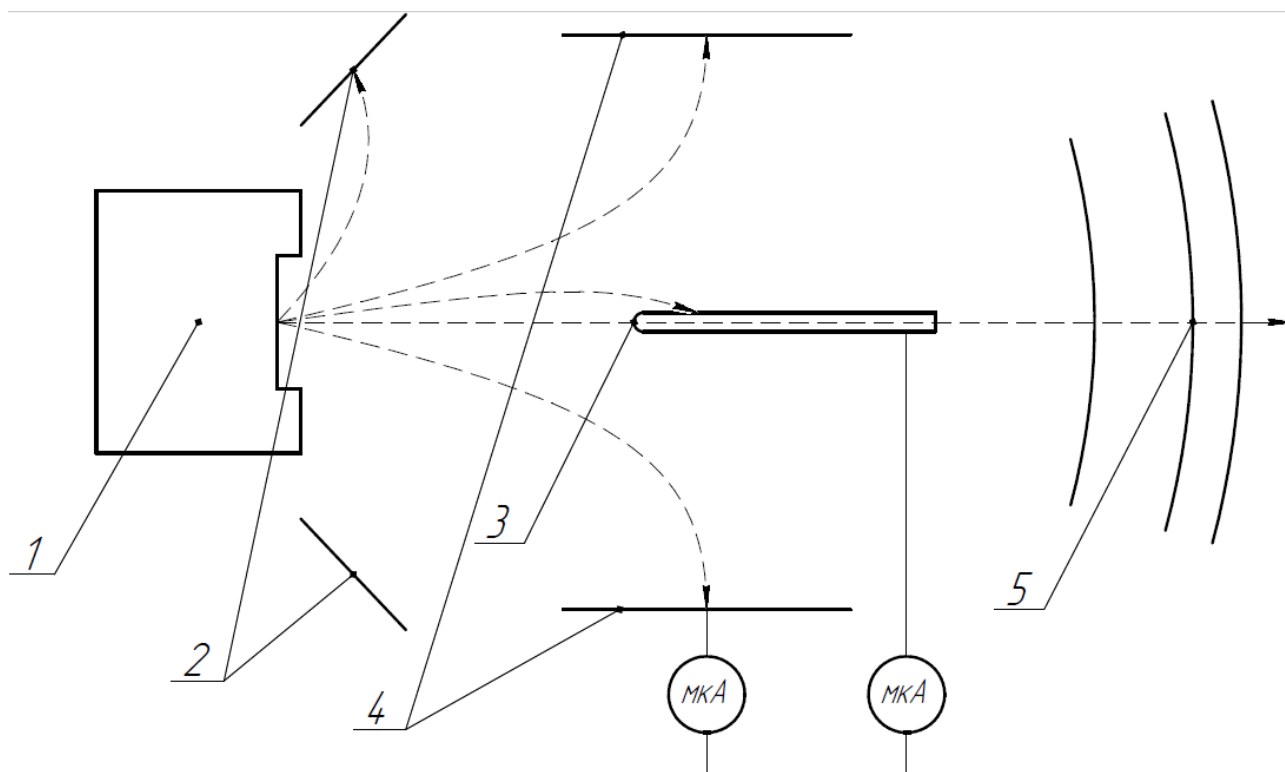


Рис. 1. Экспериментальная установка исследования состава факела ЭРД

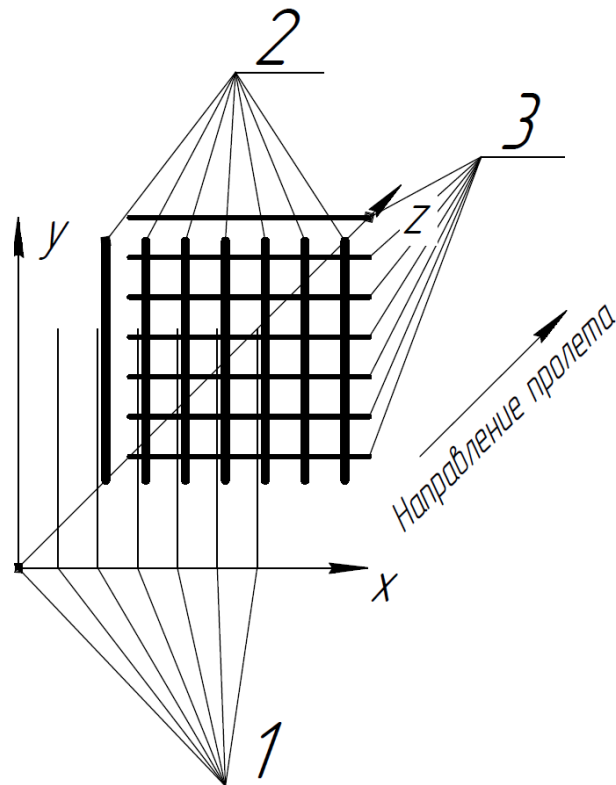


Рис. 2. Конструкция сеток времяпролетного детектора с несобирающими нитями

Данное устройство использует эффект электростатической индукции и предназначено для определения наличия заряженных частиц, подсчета их количества, измерения координаты их пролета, размеров и скорости. Старт-сетка (поз. 1) предназначена для запуска системы измерения параметров частицы. X-сетка (поз. 2) определяет относительное время пролета частицы через нее по пику импульса напряжения, наводимого на пару нитей, а также определяет абсциссу точки-проекции траектории пролета частицы на плоскость мишени. Y-сетка (поз. 3) определяет время пролета частицы через нее и ординату точки-проекции траектории, а так же закрывает временное окно измерения.

Для определения механических и электрических параметров времяпролетного детектора требуется определить индуцированный на каждую нить из пары соседних, электрический заряд. Применяв для этого свойство обратимости электрического поля как потенциального, определим потенциал, индуцированный заряженной нитью на сферическую частицу [5] радиусом R_0 :

$$q = \int_S \sigma dS = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma R_0^2 \sin \theta d\theta d\psi, \quad (1)$$

где σ – поверхностная плотность заряда сферы, θ и ψ – переменные интегрирования в сферических координатах. Электрическое изображение заряженной сферы лежит на расстоянии

$$r_{02} = \frac{R_0}{r_{01}}, \quad (2)$$

где r_{01} – расстояние от условного элементарного заряда электрического изображения до центра сферы. Учитывая, что

$$dq_2 = -\frac{\tau R_{r1} R_0}{r_{01}} d\psi, \quad (3)$$

где τ – линейная плотность заряда, а R_{r1} – радиус нити, и разместив в центре сферы точечный заряд, равный заряду нити-изображения, взятому с противоположным знаком, получим

$$\varphi_0 = \frac{\tau R_{r1} R_0}{4\pi\epsilon_0 r_{01} r} \int_0^{2\pi} d\psi = \frac{\tau R_{r1} R_0}{2\epsilon_0 r_{01} r}. \quad (4)$$

Поверхностная плотность заряда сферы находится по формуле (5):

$$\sigma = -\left. \frac{\epsilon_0 \partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=R_0}. \quad (5)$$

Для расчёта электростатической индукции необходимо разложить потенциалы исходной нити и нити-изображения в сферической системе координат, связанной с декартовой и центром сферы. Для этого в [6] приводятся соотношения, основанные на теоремах сложения, приведенных в [7]. С учетом (3) выражения имеют вид:

$$\varphi_{\kappa 1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau R_{r1} (-1)^n}{2 \varepsilon_0 r_{01}^{n+1}} \times; \quad (6)$$

$$\times P_n(\cos \theta_0) r^n P_n(\cos \theta);$$

$$\varphi_{\kappa 2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\tau R_{r1} R_0^{2n+1} (-1)^n}{2 \varepsilon_0 r_{01}^{n+1}} \times \quad (7)$$

$$\times P_n(\cos \theta_0) \frac{1}{r^{n+1}} P_n(\cos \theta).$$

Из геометрических соображений следует, что $\cos \theta_0 = \frac{a}{r_{01}}$, где a – расстояние до элементарного заряда нити. В этом случае выражения (6) и (7) принимают вид

$$\varphi_{\kappa 1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau R_{r1} (-1)^n}{2 \varepsilon_0 r_{01}^{n+1}} P_n \left(\frac{a}{r_{01}} \right) r^n P_n(\cos \theta); \quad (8)$$

$$\varphi_{\kappa 2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-\tau R_{r1} R_0^{2n+1} (-1)^n}{2 \varepsilon_0 r_{01}^{n+1}} \times \quad (9)$$

$$\times P_n \left(\frac{a}{r_{01}} \right) \frac{1}{r^{n+1}} P_n(\cos \theta).$$

Потенциал на поверхности сферы вычисляется путем сложения потенциалов источников поля (4), (7) и (8):

$$\varphi_0|_{r=R_0} + \varphi_{\kappa 1}|_{r=R_0} + \varphi_{\kappa 2}|_{r=R_0} = \frac{\tau R_{r1}}{2 r_{01} \varepsilon_0}. \quad (10)$$

Потенциал сферы постоянный, из чего следует, что выражения (4), (8) и (9) соответствуют одному из граничных условий задачи.

Поверхностная плотность заряда сферы с учетом (4), (8) и (9) выражается как

$$\sigma = \frac{R_{r1} \tau}{2 r_{01} R_0} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau R_{r1} R_0^{n-1}}{r_{01}^{n-1}} (-1)^{n+1} P(\cos \theta) \times \quad (11)$$

$$\times [(-1)^{n+1} n + (-1)^n (-(n+1))].$$

Полный заряд сферы вычисляется исходя из (1) с учетом необходимых подстано-

вок. Интегрирование с учетом свойств полинома Лежандра [8] показывает, что выражения (4), (8), (9), (11) соответствуют граничным условиям и верно описывают результат электростатической индукции на круговой нити от заряженной сферы.

Продифференцировав полный заряд, индуцированный на нить по расстоянию как функции времени, получим уравнение для тока. Для дальнейшего использования данного принципа требуется знать спектральный состав данного импульса. Выражение (1) в аналитическом виде берется сложно, однако из вида функции можно сделать о непрерывности функции конечного импульса. Поэтому для упрощения проектирования измерителей такого типа достаточно ограничиться импульсом прямоугольной формы, амплитудой (12) меньшей или равной минимально возможному потенциалу и длительностью, соответствующей длительности нахождения частицы в зоне чувствительности измерителя (13):

$$\varphi_{max} = \frac{q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 R} = \frac{q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 \sqrt{x^2 + v^2 t^2}} =$$

$$= U_{max}, \quad (12)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}} d^2}{v} \quad (13)$$

где q – полный заряд частицы, R – расстояние от центра частицы до центра нити детектора, x – координата прохождения частицы относительно нити детектора, d – расстояние между нитями детектора, v – скорость частицы.

Оцифровка данного сигнала производится согласно теореме Котельникова [9].

Результаты и их обсуждение

Исходя из предложенных методик исследования параметров потока заряженных пылевых микрочастиц предлагается следующая функциональная схема канала измерительной установки (рис. 3).

Каждая из нитей сетки представляет собой отдельный канал измерения. По номеру двух сработавших соседних каналов можно грубо судить о координате прохождения частицей сетки детектора, а по параметрам импульса узнать координату точно.

Для раскрытия неопределенности по заряду и скорости частицы, скорость измеряется второй раз по промежутку времени между взаимодействием частицы с первой и второй сеткой соответственно.

Операционный усилитель (ОУ) обеспечивает заданную чувствительность и повышает входной импеданс сеточного преобразователя. Аналогово-цифровой преобразователь формирует выборки из усиленного аналогового напряжения и представляет их в удобном для цифрового вычислителя виде. Для обеспечения точных измерений без ложных срабатываний цифровой вычислитель производит калибровку каналов при помощи управления цифровыми потенциометрами, задающими коэффициент усиления и смещение нуля операционных усилителей. Процесс калибровки заключается в повышении коэффициента усиления операционных усилителей до получения срабатывания АЦП величиной в один-два младших разрядов под воздействием внешних электромагнитных помех. После этого производится установка нуля до момента отсутствия постоянных срабатываний АЦП. После этого производится калибровка следующего канала.

Заключение

Данная установка позволяет проводить измерение вышеописанных параметров микрочастиц в лабораторных условиях без вмешательства в их поток, что позво-

ляет проводить испытания инновационных материалов конструкций КА с контролем параметров потока микрочастиц.

Литература

1. Scientific American URL: <https://www.scientificamerican.com/article/the-efficient-future-of-deep-space/> (дата обращения: 14.05.2023).

2. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов, А. Б. Надирадзе, И. А. Максимов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетова. 2009. С. 46–50.

3. Семкин Н. Д. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов / Изд-во Самарского университета. Самара, 2003. 46 с.

4. Савина А. С. К исследованию влияния собственной атмосферы космических аппаратов на развитие электростатических разрядов на поверхностях солнечных батарей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2006. № 6. С. 842–846.

5. Комнатный Д. В. Электростатическая индукция на изолированной проводящей сфере от элементарных источников электростатического поля // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2019. № 3. С. 77–82.

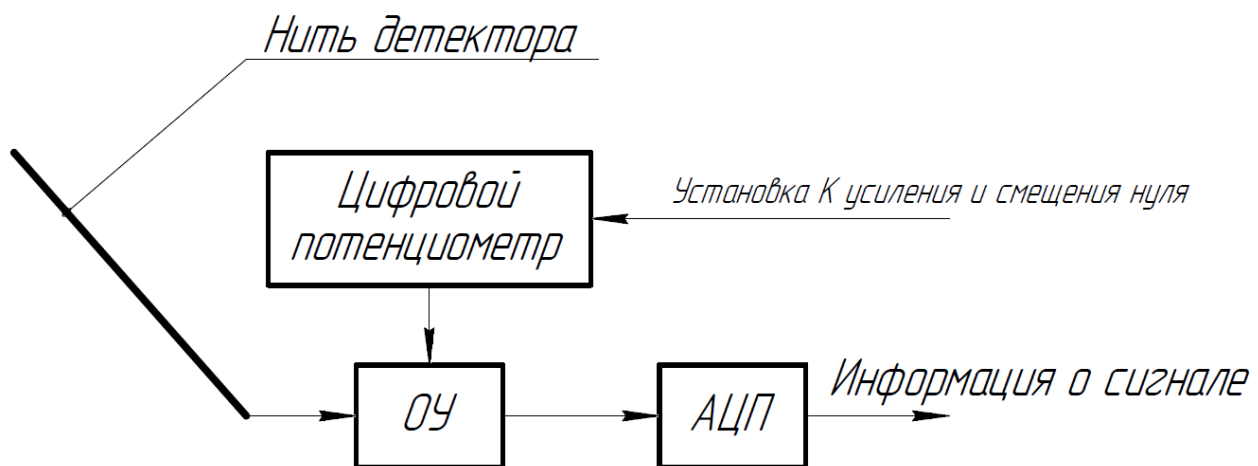


Рис. 3 Функциональная схема канала измерителя параметров заряженных микрочастиц

6. Ерофеев В. Т., Козловская И. С. Основы математического моделирования. Минск: БГУ, 2002. 195 с.
7. Ерофеев В. Т. Теоремы сложения. Минск: Наука и техника, 1989. 254 с.
8. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. М. : Высш. шк., 1970. 712 с.
9. Котельников В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электро-связи // Успехи физических наук: Журнал. 2006. № 7. С. 762–770.

ELECTRIC ROCKET ENGINES: ANALYSIS OF THE IMPACT ON THE OWN EXTERNAL ATMOSPHERE OF THE SPACECRAFT

I. V. Yumashev

This paper considers the influence factors of the electric rocket engines (ERE) operation products on the own atmosphere of a spacecraft (SC): solid dust particles torn from the structural elements of the ERE in the process of erosion and the plasma jet stream of these engines. A method of registering and measuring the dust particle parameters without interfering with their flow is presented, as well as a method for measuring the plasma neutralization coefficient. This paper presents the main equations required to determine the electrical parameters of a charged dust particles time-of-flight detector with non-collecting filaments, as well as a functional diagram of the dust particle passage-registering channel. The operating principle of this detector is described.

Key words: charged dust particle; quasi-neutral plasma; electrostatic induction; dust particle detector; cosmic dust.

Статья поступила в редакцию 22.05.2023 г.