

V. I. Lavrov, A. V. Kuzovnikov, V. G. Somov

PROCEDURE OF ANALYSIS OF RADIO ENGINEERING CHARACTERISTICS OF ONE-REFLECTOR HYBRID-MIRROR ANTENNA WITH THE OFFSET REFLECTOR

The authors consider mathematical relationships for the geometry description of hybridly-reflector antenna with the offset reflector is done in article, and offer gears of estimation of the main and cross-polarization field components in antenna array (AA) in a plane wave receive mode. The procedure, allowing to count power characteristics of one-mirror-antenna with the offset reflector, is offered, at excitation of it with flat antenna array, consisting of emitters with circular and linear polarization of radiation.

Keywords: large-size antennas, procedure of the analysis of radio engineering characteristics of the antenna, software-methodical support.

© Лавров В. И., Кузовников А. В., Сомов В. Г., 2012

УДК 629.78.018.3:533.6:621.396.67

А. Б. Надирадзе, Р. Р. Рахматуллин, С. Г. Кочура, И. А. Максимов, В. А. Смирнов

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ К ЭРОЗИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СТРУЙ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены методические вопросы экспериментального определения стойкости композиционных материалов к эрозионному воздействию струй стационарных плазменных двигателей (СПД). Предложен метод определения «сухой» массы образца по результатам обезгаживания. Приведены экспериментальные зависимости коэффициента распыления углепластика от угла падения ионов, ионного флюенса и ориентации волокон относительно потока плазмы.

Ключевые слова: космический аппарат, композиционные материалы, стационарный плазменный двигатель, методика эксперимента, коэффициент распыления.

В настоящее время композиционные материалы находят широкое применение при изготовлении образцов ракетно-космической техники. В частности, многие конструктивные элементы автоматических космических аппаратов (КА), включая элементы крупногабаритных трансформируемых систем, изготавливаются с использованием углепластиков. В свою очередь, повышение требований к целевым характеристикам и энерговооруженности КА при наличии ограничений на массово-габаритные характеристики КА приводит к существенному «уплотнению» конструктивно-компоновочных схем современных КА, что обуславливает попадание ряда конструктивных элементов крупногабаритных трансформируемых систем под воздействие плазменных струй СПД, приводящее к распылению материалов их поверхностей.

В связи с этим возникает необходимость повышения точности оценок эрозионно-загрязняющего воздействия плазменных струй СПД на КА посредством учета «тонких» эффектов, характеризующих процессы распыления материалов, таких как влияние флюенса, индикатрисы распыления, анизотропии свойств материалов и пр. Кроме того, при экспериментальном определении параметров распыления композиционных материалов и, в частности углепластиков, для повышения точности получаемых результатов необ-

ходимо учитывать ряд специфических особенностей этих материалов.

Одним из путей повышения точности экспериментальных данных является хорошо обоснованный выбор схемы и параметров эксперимента, его тщательная методическая разработка и соблюдение многочисленных ограничений.

Основная сложность измерения характеристик распыления композиционных материалов при низких энергиях ионов состоит в большой продолжительности эксперимента, необходимой для получения приемлемой точности измерения. В связи с этим для проведения испытаний преимущественно обладают методы, позволяющие одновременно испытывать большое количество образцов. Реализовать такую схему измерений можно с помощью стационарных плазменных двигателей, имеющих большую расходимость плазменного потока (до 40 °С), и позволяющих разместить в потоке до 10–15 образцов материалов. Исходя из этих соображений для измерения коэффициентов распыления композиционных материалов была выбрана схема эксперимента (рис. 1).

Величина коэффициента распыления измеряется весовым методом при известных параметрах плазменного потока и времени воздействия плазмы на образец.

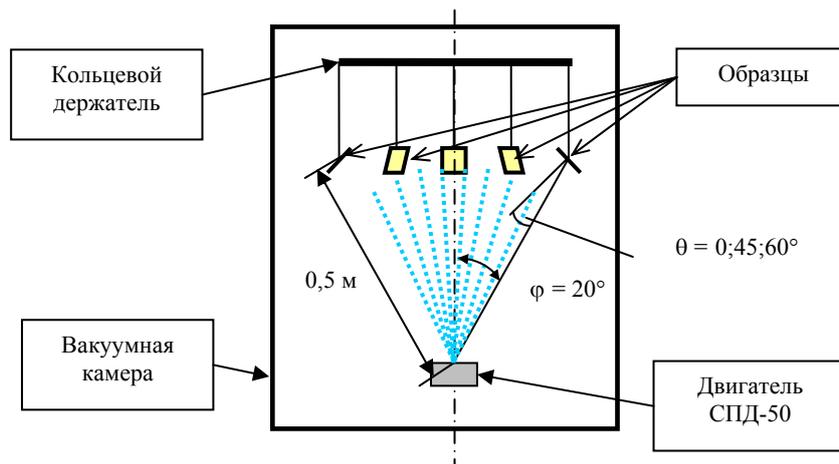


Рис. 1. Схема эксперимента по определению характеристик распыления конструкционных материалов КА

Для обеспечения требуемой точности и повторяемости результатов измерений необходимо выполнять ограничения на режимы проведения эксперимента.

Потери массы образцов (за счет распыления) должны быть не менее $(20...30) \times \delta_M$, где δ_M – разрешающая способность используемых микровесов. Для аналитических рычажных весов $\delta_M = 0,1$ мг, следовательно, величина массы распыленного вещества должна быть не менее $\Delta M_{расп} \geq 0,1 \times (20...30) = 2...3$ мг.

Следует учитывать, что неметаллические и композиционные материалы обладают весьма существенной собственной потерей массы, обусловленной их гигроскопичностью и газовыделением материалов в вакууме.

Стандартные параметры общих потерь массы (ОПМ) для современных материалов космического применения обычно не превышают 0,1 %. Потери массы за счет газовыделения не должны превышать 3–5 % массы распыленного вещества. Для указанной выше величины $\Delta M_{расп} = 2–3$ мг, это соответствует 0,1–0,2 мг. При этом масса образца должна быть не больше 0,1–0,2 г.

Если масса образца превышает указанные значения, следует либо увеличивать $\Delta M_{расп}$, либо обезгаживать образцы.

Расстояние от двигателя не должно быть больше 1/2 длины пробега ионов в камере ($\lambda \approx 1$ м при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ торр.), иначе в потоке возрастет доля упругорассеянных ионов. Приближение образцов к двигателю также ограничено неравномерностью потока. Исходя из этого расстояние от двигателя до образцов было выбрано равным 0,5 м.

Температура образца не должна превышать рабочей температуры материала (75–120 °С), в противном случае в нем могут начаться необратимые деструктивные явления.

Образцы в камере должны располагаться так, чтобы минимизировать потоки осаждения на них продуктов распыления стенок вакуумной камеры.

Размеры образца ограничены неравномерностью плотности тока по длине образца, которая не должна превышать 3–5 % от среднего значения (рис. 2).

Режим работы источника плазмы (плотность ионного тока) выбирают таким образом, чтобы обеспечить температурный режим образцов.

Время эксперимента $\tau_{эксп}$ выбирают в соответствии с требуемой точностью. Желательно, чтобы оно не превышало 40–50 ч, в противном случае стоимость работ резко возрастает.

При использовании весового метода измерений большое влияние на точность измерений могут оказывать потери массы, обусловленные собственным массовыделением материалов или их гигроскопичностью. В связи с этим перед проведением испытаний проводилось обезгаживание и определение «сухой» массы образцов.

Для этого образцы помещались в вакуумную камеру и нагревались до температуры 70 °С. Время выдержки в вакууме – 3 ч. После этого вакуумная камера заполнялась сухим азотом. Образцы извлекались из камеры и взвешивались на аналитических весах. Задержка между заполнением камеры и взвешиванием не превышала 1 ч. После взвешивания образцы снова помещались в вакуумную камеру, и проводился еще один цикл обезгаживания с целью получения информации о динамике сброса массы и повышения достоверности оценок сухой «массы». Результаты измерений потери массы образцов углепластика приведены на рис. 3.

В течение 6 ч образцы потеряли более 90 % массы. Для получения значений «сухой» массы образца использовалась аппроксимация экспериментальных данных следующей экспоненциальной зависимостью:

$$\Delta m = \Delta m_{\infty} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где Δm_{∞} – полная потеря массы (влаги), τ – постоянная времени обезгаживания.

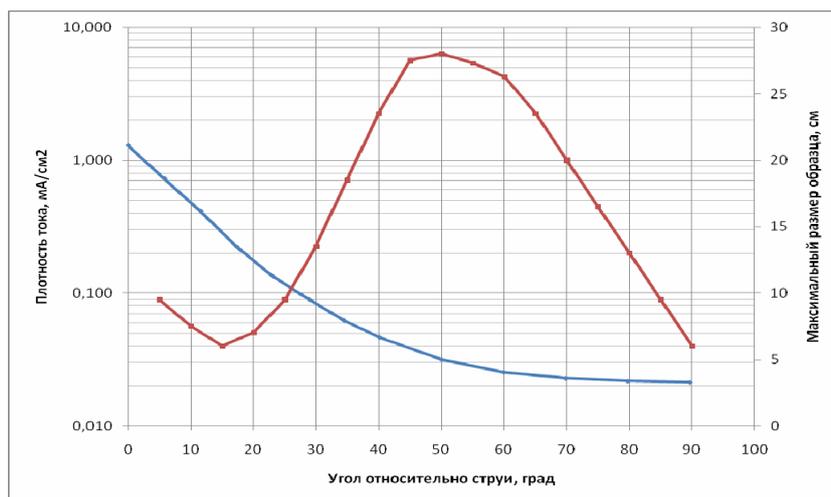


Рис. 2. Угловая зависимость плотности тока в струе СПД-50 и максимального размера образца на расстоянии 0,5 м от среза двигателя

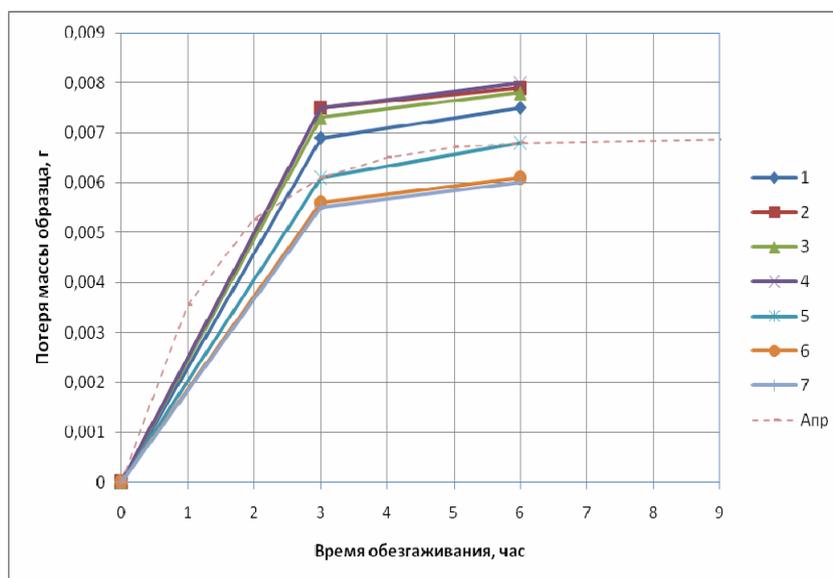


Рис. 3. Зависимость потери массы образцов от времени: точки 1–7 эксперимент, пунктир – аппроксимация (для образца 5)

Значения параметров в формуле (1) определялись методом наименьших квадратов по экспериментальным данным.

Величина «сухой» массы образца вычислялась по формуле

$$M_k^{(0)} = M_k^{(1)} - \Delta m_{\text{в}},$$

где $M_k^{(0)}$ – «сухая» масса образца, $M_k^{(1)}$ – равновесная масса образца (при нахождении на влажном воздухе).

По результатам этих измерений содержание влаги в образцах углепластика составило около 0,17 %. Постоянная времени обезгаживания (при температуре 70 °С) $\tau = 1,2$ ч.

После обезгаживания образцы были помещены на открытом воздухе для получения информации о набo-

ре массы. Образцы взвешивались через каждые 3–4 ч в течение последующих четырех суток. Кривая набора массы образцов углепластика (при влажности воздуха 39–51 %) приведена на рис. 4.

Процесс набора влаги достаточно длительный (постоянная времени этого процесса $\tau = 25$ ч).

Таким образом, для исключения влияния влаги в образцах углепластика перед проведением испытаний необходимо их обезгаживать. При обезгаживании должно быть получены, по крайней мере, две точки, позволяющие иметь информацию о динамике процесса обезгаживания, необходимую для получения достоверных оценок «сухой» массы образцов. Для снижения влияния влаги при извлечении образцов из вакуумной камеры ее следует заполнять сухим азотом. Взвешивать образцы после их извлечения из вакуум-

ной камеры необходимо не позже чем через 1–2 ч (при влажности до 50 %). В этом случае изменение массы составит не более 0,1–0,2 мг (в пределах разрешающей способности аналитических весов). При влажности воздуха более 50 % это время следует минимизировать.

По данной методике были испытаны образцы углепластика на основе углеродного жгута, стеклонити и органического связующего.

На внешней поверхности углепластика находится защитный слой, толщиной около 20 мкм, образованный тонкими стеклянными нитями, уложенными в одном направлении.

Эксперимент проводился на стенде ПП-2 МАИ [1], оснащенный современными безмасляными средствами откачки, обеспечивающими вакуум на уровне 10^{-5} торр.

при работающем источнике плазмы. В качестве источника плазмы применялся стационарный плазменный двигатель типа СПД-50 (ток разряда 1,2–1,8 А, напряжение разряда 250–300 В). Образцы углепластика размещались в струе двигателя на расстоянии 0,5 м от среза, под углом 20° к оси струи. Углы падения ионов на поверхность образцов составляли 0, 45 и 60° , плотность ионного тока на образцах – $0,185 \text{ mA/cm}^2$, средняя энергия ионов – 200 эВ. Облучение образцов производилось в три этапа, продолжительностью 32, 16 и 12 ч (рис. 5). Существенного изменения скорости распыления по времени облучения не происходит. По-видимому, это связано с тем, что при реализованном в эксперименте флюэнсе, глубина распыления составила около 10–15 мкм, что соответствует примерно 50 % эрозии защитного слоя.

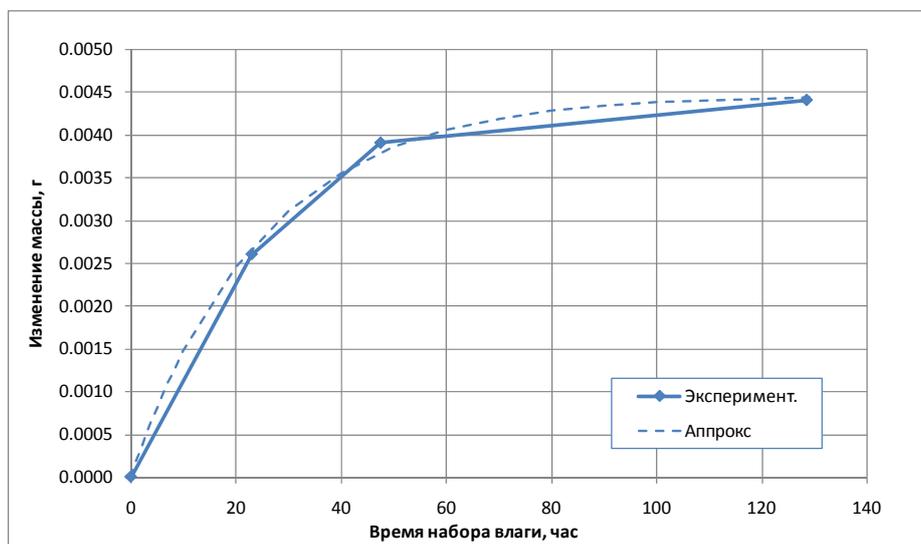


Рис. 4. Зависимость увеличения массы образцов от времени

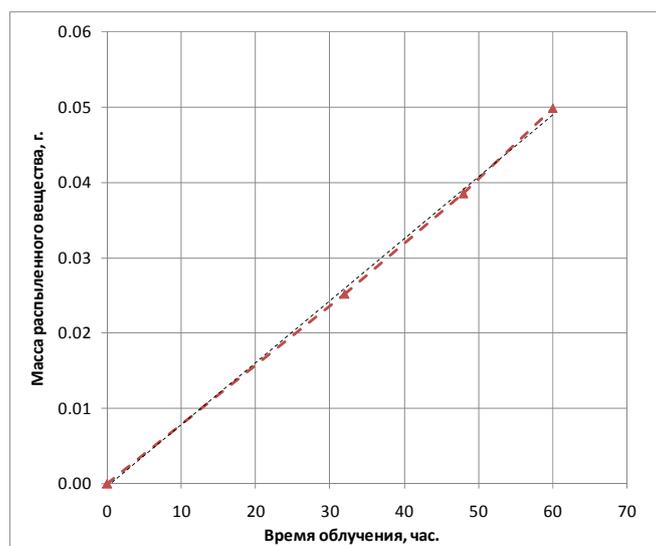


Рис. 5. Зависимость массы распыленного вещества от времени облучения при нормальном падении ионов

При дальнейшем воздействии потока плазмы можно прогнозировать полное распыление защитного слоя и переход к распылению углепластика. При этом, естественно, произойдет изменение скорости распыления в соответствии с характеристиками распыления углепластика.

Коэффициент распыления защитного слоя при средней энергии ионов 200 эВ составил 0,24 атом/ион при среднем атомном весе распыленных частиц $M_w = 20,2$ (стекло). Массовый коэффициент распыления составил 0,05 мг/К, а объемный (при плотности материала $2,2 \text{ г/см}^3$) – 0,023 мм³/К. Для сравнения отметим, что по данным [2] коэффициент распыления стекла (при энергии 200 эВ) составляет около 0,2–0,3, что соответствует измеренным значениям.

После распыления защитного слоя скорость распыления, по-видимому, должна уменьшиться в несколько раз, поскольку углерод более стоек к распылению, чем стекло. Так коэффициент распыления графита при энергии 200 эВ составляет около 0,04 атом/ион [3; 4]. У углепластика за счет волокнистой структуры и наличия связующего коэффициент распыления будет несколько больше (рис. 6).

На зависимость заметное влияние оказывает ориентация образца относительно потока ионов. Так, при

ориентации вдоль волокон максимальный коэффициент распыления примерно в 1,4 раза больше, чем при ориентации поперек волокон.

Причина этого эффекта, по-видимому, связана с частичным затенением материала при поперечной ориентации образца. Эту гипотезу подтверждают результаты исследования на электронном микроскопе (рис. 7).

На этих снимках отчетливо видно, что на образцах с поперечной ориентацией образуются «кристаллы», находящиеся в тени нитей стекловолокна защитного слоя. На образцах, ориентированных вдоль потока, таких «кристаллов» не образуется за исключением тех мест, где нити ориентированы под углом к потоку.

По мере распыления образца наблюдается постепенное снижение максимума распыления при угле падения 60°. Возможно, что этот эффект связан с частичным оголением углеродных волокон, находящихся под стеклянными нитями.

Таким образом, показано, что для получения данных по распылению композиционных материалов необходимо строго выполнять множество ограничений на параметры эксперимента и проводить тщательную методическую подготовку.

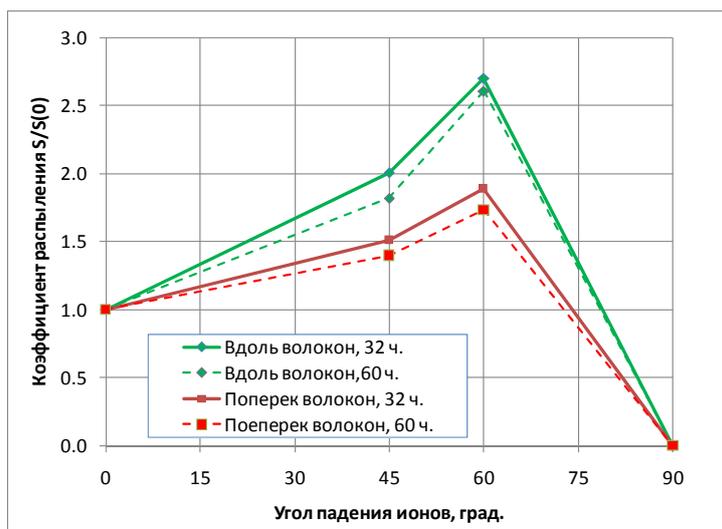
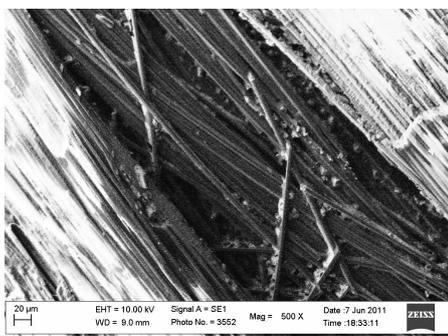
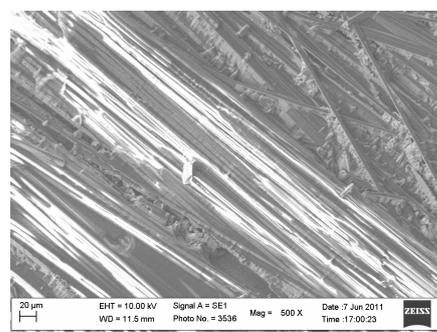


Рис. 6. Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов



а



б

Рис. 7. Поверхность образцов при угле падения ионов 45° при продольной (а) и поперечной (б) ориентации волокон относительно потока ионов

Для исключения влияния влаги, перед проведением испытаний необходимо производить обезгаживание образцов. При обезгаживании должно быть получено, по крайней мере, две точки, позволяющие получить информацию о динамике процесса обезгаживания и оценить величину «сухой» массы образцов.

Влияния флюенса на скорость распыления защитного слоя углепластика не обнаружено. При полном распылении защитного слоя возможно уменьшение коэффициента распыления за счет перехода к распылению углеволоконной основы.

Обнаружено значительное (около 40 %) влияние ориентации образца относительно потока ионов на величину коэффициента распыления при наклонном падении ионов. Показано, что этот эффект связан с частичным затенением поверхности стеклянными нитями, образующими защитный слой углепластика.

A. B. Nadiradze, R. R. Rachmatullin, S. G. Kochura,
I. A. Maksimov, V. A. Smirnov

FEATURES OF EXPERIMENTAL DEFINITION OF COMPOSITE MATERIALS DURABILITY AGAINST EROSIIVE IMPACT OF STATIONARY PLASMA THRUSTERS

The report reviews the methodical aspects of the experimental definition of the composite materials durability against erosive impact of stationary plasma thruster (SPT). The definition method of «dry» mass of the sample on the results of degassing is proposed. The experimental dependencies of sputtering ratio of carbon fiber reinforced plastic on the ions angle of incidents, ions fluency and fiber orientation, relative to plasma flow, are presented.

Keywords: space craft, composite materials, stationary plasma thruster, method of experiment, sputtering ratio.

© Надирадзе А. Б., Рахматуллин Р. Р., Кочура С. Г., Максимов И. А., Смирнов В. А., 2012

УДК 527.8

И. В. Нигруца, А. В. Гребенников, М. Ю. Казанцев

СИСТЕМА ПОСАДКИ ПО СИГНАЛАМ ПСЕВДОСПУТНИКОВ

Предложена и исследована методика применения локальной радионавигационной системы для обеспечения посадки воздушных судов, позволяющая подходить к решению вопросов топогеодезического обеспечения, гарантирующая их решение даже в условиях активного противодействия.

Ключевые слова: псевдоспутник, посадка летательного аппарата, ГЛОНАСС/GPS.

Применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS для посадки воздушных судов (ВС) ограничено несколькими факторами:

- достаточно высокой погрешностью определения координат и скорости ВС (от 1–2 до 6–10 м);
- низкой помехоустойчивостью навигационного оборудования, работающего по сигналам ГЛОНАСС и GPS.

Применение псевдоспутников (ПС), в системах посадки ВС позволяет решить проблему относительно высокой погрешности навигационных определений, а также повысить помехоустойчивость в условиях активного противодействия [1].

Библиографические ссылки

1. Сайт стенда ПП-2 МАИ. URL: <http://www.spp2.ru>.
2. Pencil E. J., Randolph T., Manzella D. End-of-life Stationary Plasma Thruster far-filed plume characterization // AIAA-96-2709, Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 32nd. Lake Buena Vista, FL, July 1–3. 1996.
3. Xenon sputter yield measurements for ion thruster materials / J. D. Williams, M. M. Gardner, M. L. Johnson, P. J. Wilbur // IEPC-03-130 at the 28th Int'l Electric Propulsion Conf., Toulouse, France, 17–21 March. 2003.
4. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / под ред. Р. Бериша ; пер. с англ. под ред. В. А. Молчанова. М. : 1984.