

ВВЕДЕНИЕ

Электроракетные двигатели (ЭРД) успешно используются в качестве двигателей для управления движением космических аппаратов (КА). Принципиальным отличием ЭРД от других типов реактивных двигателей является использование электрической энергии для ускорения выбрасываемой из двигателя массы и получения реактивной силы – тяги.

Преимущество ЭРД перед традиционными химическими двигателями состоит в возможности получения скоростей истечения частиц струи во много раз превышающих скорости истечения в тепловых двигателях. Это позволяет существенно снизить массу топлива, необходимого для решения задачи, и увеличить массу полезной нагрузки КА. Положительный эффект достигается благодаря тому, что в ЭРД электрическая энергия может трансформироваться в кинетическую, минуя тепловую фазу, когда ЭРД осуществляет ускорение заряженных частиц с помощью электрических и магнитных полей.

В то же время при увеличении скорости истечения растет потребляемая ЭРД электрическая мощность, и, соответственно, масса энергоустановки. Поэтому для каждой конкретной задачи в зависимости от характеристик энергоустановки и времени работы ЭРД существует оптимальное значение скорости истечения (удельного импульса тяги). При современном уровне развития космической энергетики в конкретных космических задачах оптимальная скорость истечения составляет 10–50 км/с.

Характерной особенностью ЭРД являются относительно небольшие значения тяги. Высокие скорости истечения требуют высоких уровней электрической мощности (20–50 Вт на 1 мН тяги). Это является существенным ограничением, так как имеющиеся бортовые энергоустановки мощностью 5–20 кВт позволяют иметь оптимальный уровень тяги двигательной установки (ДУ) не выше 100–1000 мН. Для использования более мощных двигателей или связок двигателей требуются энергоустановки

мощностью более 100 кВт. Развертывание таких энергоустановок в космосе – дело будущего.

Высокие скорости истечения частиц и их ионизированное состояние приводят к тому, что частицы струи начинают интенсивно взаимодействовать с материалами внешних поверхностей КА и его системами. Среди возможных эффектов воздействия струи ЭРД на КА в настоящее время выделяют следующие:

- эрозионное и загрязняющее воздействие на элементы конструкции КА;
- оптические помехи и электромагнитное излучение в радиодиапазоне;
- влияние плазмы на диаграммы направленности антенн, прохождение радиоволн и надежность радиосвязи с КА;
- изменение состава и параметров окружающей КА среды, повышение температуры ионосферной плазмы в окрестности КА;
- изменение электрического потенциала КА;
- влияние плазменных образований на работу бортовой аппаратуры;
- взаимодействие с подсистемами КА по цепям питания.

Эрозионное воздействие происходит вследствие попадания ионов плазменных струй ЭРД на элементы конструкции КА и приводит к изменению свойств материалов внешних поверхностей аппарата. Так, например, эрозия защитных стекол солнечных батарей (СБ) под воздействием струи ЭРД может явиться причиной деградации характеристик фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). При этом следует отметить, что эрозия может оказывать и положительное влияние, очищая поверхности от загрязнений и микрократеров, образующихся в результате ударов микрометеорных частиц.

Загрязняющему воздействию истекающей струи двигателя могут подвергаться панели СБ, терморегулирующие покрытия, оптические

элементы и т.д. Разделяют два типа загрязнений: загрязнение продуктами распыления элементов конструкции КА и загрязнение вторичными частицами струи. Наиболее существенным фактором является осаждение пленок загрязнений на панелях СБ, радиаторах системы терморегулирования и астронавигационной аппаратуре. Следует отметить, что продукты распыления могут содержать значительную долю металлов, которые при осаждении на оптических поверхностях приводят к существенному изменению их свойств.

Плазменные струи ЭРД могут значительно изменять состав и параметры окружающей КА среды, а также ее электромагнитные свойства, приводя к изменению условий прохождения радиосигналов, эффективных размеров и диаграмм направленности бортовых антенн, что в конечном счете может приводить к нарушению радиосвязи с КА. Кроме того, струя ЭРД может возбуждать ионосферу, вызывая, в частности, разогрев ионосферной плазмы.

Проникновение плазмы в приборные отсеки негерметичного исполнения может стать причиной нарушения нормальной работы высоковольтного оборудования, например, ламп бегущей волны и источников питания бортового ретрансляционного комплекса (БРТК).

При работе ЭРД изменяются условия взаимодействия КА с окружающей космической плазмой, что отражается на характере процессов электризации КА. Взаимодействие по цепям питания может приводить к возникновению дополнительных электромагнитных помех работе бортовой аппаратуры, обусловленных колебаниями тока в цепях питания ЭРД.

Механическое воздействие приводит к возникновению дополнительных возмущающих моментов из-за взаимодействия частиц струи с элементами конструкции КА (например, с панелями СБ), отклонения вектора тяги ЭРД от его геометрической оси, неточности установки двигателя на КА, смещения центра масс аппарата вследствие выработки запасов рабочего тела. Следствием механического воздействия могут

являться дополнительный расход рабочего тела двигателей коррекции и стабилизации. Если же возмущения превысят допустимый уровень, который может парировать система стабилизации КА, возможна потеря ориентации КА и выход его из строя.

Тепловое воздействие может быть обусловлено двумя факторами. Во-первых, при работе некоторые элементы конструкции ЭРД имеют высокую температуру (более 1000 К), в результате чего выделившееся тепло излучением и за счет теплопроводности передается элементам КА. Во-вторых, при относительно близком расположении (масштаба 0,5 м) элементов конструкции к двигателю возможен нагрев за счет бомбардировки ускоренными ионами струи.

Таким образом, взаимодействие ЭРД с КА является весьма сложным и многообразным процессом, в который вовлекаются многие жизненно важные системы и подсистемы КА. При определенных условиях перечисленные выше эффекты могут приводить к различным негативным последствиям вплоть до полной потери работоспособности КА и его систем. Поэтому одной из важнейших проблем применения ЭРД в космосе является обеспечение совместимости ЭРД с элементами и системами КА, а также минимизация отрицательных последствий воздействия струи ЭРД на КА.

Целью данной курсовой работы является ознакомление студентов с основными приемами расчета и методами анализа теплового, механического, эрозионного и загрязняющего воздействия ЭРД на элементы конструкции КА, а также с мероприятиями по снижению или компенсации данного вида воздействия. Примерный объем КР – 25-30 стр.

1. Определение параметров струи СПД

Для расчета воздействия плазменной струи СПД на КА необходимо иметь информацию о параметрах струи (плотность ионного тока, энергия ионов) в каждой точке пространства, окружающего КА. Такую информацию предоставляют модели струи. В настоящее время существуют различные типы моделей, начиная с простейших эмпирических, заканчивая сложными численными моделями.

В расчетных задачах часто применяют коническую модель струи, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$j(r, \varphi) = j_0(\varphi) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^2, \quad (1)$$

где $j_0(\varphi)$ – угловая функция плотности ионного тока, заданная на расстоянии r_0 от источника; φ – угол вылета ионов, отсчитываемый от оси струи; r – расстояние от источника по направлению вылета ионов.

Угловая функция может быть задана различными способами. Рассмотрим некоторые типовые угловые функции.

Угловая функция для струи двигателя СПД-100:

$$j_0(\varphi) = a_0 + \frac{a_1}{a_2 + \varphi^2}, \text{ (мА/см}^2\text{)}, \quad (2)$$

где коэффициенты a_0, a_1, a_2 – (для СПД-100 $a_0 = 0,0014895$, $a_1 = 103,12$, $a_2 = 60,169$), величина угла φ задается в градусах.

Еще одна аппроксимация угловой зависимости плотности тока в струе СПД-100 на расстоянии $r_0 = 1$ м от среза двигателя дается соотношением:

$$j_0(\varphi) = b_1 \cdot \exp(-b_2 \varphi^2 / (b_3 + \varphi^{1.6})). \quad (3)$$

где $b_1 = 1.9$; $b_2 = 5$; $b_3 = 0.12$; величина угла φ задается в радианах.

В ряде случаев для аппроксимации угловой функции плотности тока в струе может быть использована функция степени косинуса:

$$j_0(\varphi) = \frac{I_0(\beta+1)}{2\pi r_0^2} \cos^\beta(\varphi), \quad (4)$$

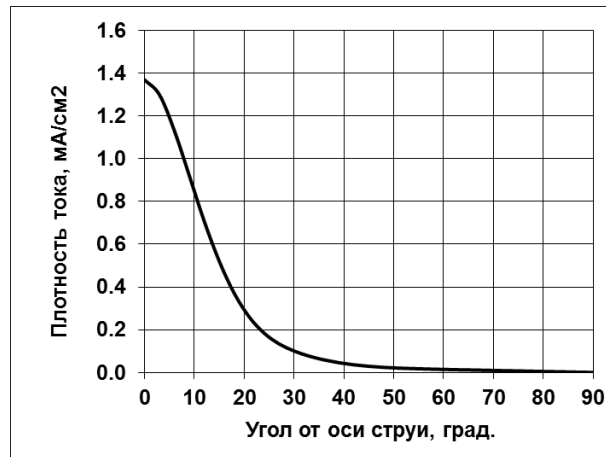
где I_0 – полный ионный ток струи; β – параметр, определяющий угол расходимости струи.

Распределение средней энергии ионов в струе СПД-100 аппроксимируется формулой:

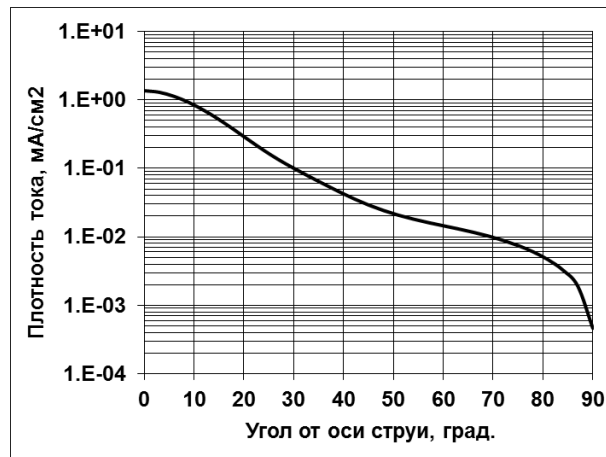
$$E_i(\varphi) = \left\{ b_0 + \frac{b_1}{b_2 + \varphi^2} \right\}, \quad (5)$$

где E_i – средняя энергия ионов (эВ); b_0, b_1, b_2 – константы (для СПД-100 $b_0 = -185.59, b_1 = 2.8984 \cdot 10^6, b_2 = 6839.0$; величина угла φ задается в градусах.

Угловые зависимости плотности ионного тока и энергии ионов в струе СПД-100 приведены на рисунках 1 и 2, соответственно.



(а)



(б)

Рисунок 1 – Угловое распределение плотности ионного тока в струе двигателя СПД-100 на расстоянии 1 м от среза: линейная шкала (а) и логарифмическая шкала (б)

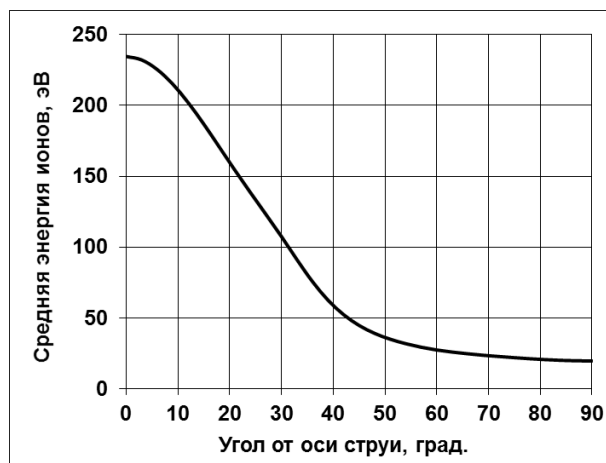


Рисунок 2 – Зависимость средней энергии ионов струи от угла вылета

В курсовой работе требуется:

1. Сравнить угловые зависимости ионного тока по модели струи (2) и (3).
2. Подобрать параметры β , I_0 модели струи (4) для наилучшего совпадения с моделью (2). Для этого применяется метод наименьших квадратов, функция поиска решения (Эксель).
3. Построить угловую зависимость ионного тока по модели струи (4) для найденного значения I_0 и нескольких различных значений β .

2. Определение интегральных параметров струи

Зная $j_0(\varphi)$, можно определить некоторые основные интегральные параметры струи, такие, как полный ионный ток (аналог тока разряда), поток массы (аналог массового расхода двигателя) и поток импульса (аналог тяги двигателя).

Полный ионный ток струи вычисляется путем интегрирования плотности тока ионов по полусфере:

$$I_0 = 2\pi r_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} j_0(\varphi) \sin\varphi d\varphi, \quad (6)$$

где e – заряд электрона.

Полный поток массы ионов струи (в случае если заряд всех ионов равен e) определяется соотношением:

$$G_0 = 2\pi r_0^2 m_i \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{j_0(\varphi)}{e} \sin\varphi d\varphi = \left(\frac{I_0}{e}\right) m_i, \quad (7)$$

где m_i – масса иона.

Поток осевого импульса частиц рассчитывается с учетом того, что вектор скорости частиц отклонен на угол φ от оси струи:

$$P_0 = 2\pi r_0^2 m_i \langle v_i \rangle \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{j_0(\varphi)}{e} \cos\varphi \cdot \sin\varphi d\varphi, \quad (8)$$

где $\langle v_i \rangle$ – средняя направленная скорость иона, которая определяется исходя из функции распределения частиц по скоростям или энергиям.

Отметим, что I_0 , G_0 и P_0 не равны в точности току разряда I_d , массовому расходу G_m и тяге двигателя R , поскольку в соотношениях (10)-(12) не учитываются потери. В то же время, зная интегральные параметры струи и двигателя можно оценить величины потерь. Этот метод широко применяется на практике, но для его реализации необходимо измерить угловую функцию частиц и их функцию распределения.

Одной из важных интегральных характеристик двигателя является угол расходимости его струи $\varphi_{95\%}$. Под $\varphi_{95\%}$ понимают полуугол в вершине конуса, который заключает в себе 95% ионного тока или потока частиц струи. Для определения угла расходимости решают уравнение вида:

$$2\pi r_0^2 \int_0^{\varphi_{95\%}} j_0(\varphi) \sin\varphi d\varphi = 0,95 \cdot I_0. \quad (9)$$

Поскольку угловая функция $j_0(\varphi)$, как правило, имеет сложный вид или табличную форму представления, решение (13) производят численно. Для этого строят зависимость ионного тока от предельного угла вылета α :

$$I_0(\alpha) = 2\pi r_0^2 \int_0^{\alpha} j_0(\varphi) \sin\varphi d\varphi, \quad (10)$$

и находят значение α при котором $I_0(\alpha) = 0.95 \cdot I_0(\frac{\pi}{2})$. Найденное значение α и есть искомое значение угла расходимости $\varphi_{95\%}$ (по току). Аналогично могут быть определены углы расходимости по расходу и тяге.

В курсовой работе требуется:

1. По модели струи (2) рассчитать значения плотности ионного тока на расстоянии 1 м от двигателя в 20-30 точках по углу (с шагом 5-10°) в диапазоне от 0 до 90°.
2. Вычислить интегральные параметры струи, а именно: осевой импульс (тягу), полный ионный ток, расход. Сравнить с интегральными параметрами двигателя СПД-100.
3. Построить зависимости $I_0(\alpha)$, $G_0(\alpha)$ и $P_0(\alpha)$, вычислить угол расходимости струи $\varphi_{95\%}$ по каждому из этих параметров.

3 Построение границ допустимого теплового и эрозионного воздействия струи на КА

Наиболее опасными для КА являются тепловое, эрозионное, механическое и загрязняющее воздействия. Решение проблемы достигается различными способами, в частности, выбором конструкторско-компоновочных схем (ККС), в которых влияние струй ЭРД на КА сведено до допустимого уровня [5,6].

Очевидно, что учет перечисленных выше эффектов должен производиться на самых ранних этапах проектирования, поскольку ошибки на старте дорого обходятся на финише. Однако проведение детальных анализов на ранних этапах проектирования не всегда возможно, поскольку еще нет полных данных о компоновке и материалах, применяемых на КА. В связи с этим конструкторам, проектирующим КА, нужен простой и интуитивно понятный алгоритм размещения ЭРД на КА, исключающий возможность превышения критических уровней воздействия.

В настоящее время с этой целью применяют простейшее ограничение по углу расходимости струи, полагая, что за границей угла расходимости потоки ионов отсутствуют и в этой зоне можно устанавливать любое оборудование. Однако такой подход является весьма грубым и может приводить к ошибкам как в лучшую, так и в худшую сторону. Более того, основной тенденцией проектирования современных КА является уплотнение ККС, когда размещение элементов конструкции КА вне конуса угла расходимости струи оказывается невозможным и конструкторам приходится брать на себя ответственность за размещение элементов КА внутри конуса расходимости, т.е. в области интенсивного воздействия ионов. В этой ситуации ранний учет возможного воздействия струи на КА является особенно актуальным.

Решить эту проблему можно путем применения специально рассчитанных критических границ, определяющих области возможного размещения элементов КА. Поскольку априорная информация о точном

положении элементов конструкции в струе и материалах их поверхности отсутствует, положение границ следует рассчитывать для худшего случая.

3.1. Определение границ области допустимого теплового воздействия

Тепловое воздействие плазменной струи на элементы конструкции КА состоит в том, что ионы струи передают свою энергию кристаллической решетке материала, в результате чего температура материала возрастает. Для большинства материалов КА предельная допустимая температура составляет $T_{\text{доп.}} = 125^{\circ}\text{C}$. Если температура материала превысит это значение может происходить его необратимая деструкция и изменение свойств, которые приведут к нарушению нормального функционирования КА.

Величина плотности теплового потока, который передается ионами струи к поверхности, определяется выражением:

$$q_i = \alpha j_i E_i \cos \theta, \quad (11)$$

где α – коэффициент аккомодации энергии иона; j_i – плотность ионного тока; E_i – энергия ионов струи; θ – угол падения ионов на поверхность.

Для оценок худшего случая примем, что $\theta = 0$ (нормальное падение ионов) и $\alpha = 1$ (полная аккомодация). Последнее допущение вполне справедливо для энергии ионов более 50-100 эВ.

Если материал освещен Солнцем, то к тепловому потоку от ионов струи добавляется тепловой поток солнечного излучения, поглощенный материалом:

$$q_s = A_s Q_s, \quad (12)$$

где A_s – коэффициент поглощения солнечного излучения; Q_s – плотность потока солнечного излучения (Солнечная постоянная).

Значения коэффициентов A_s , ε могут варьироваться в широких пределах в зависимости от функционального назначения материалов (см. рисунок 1).

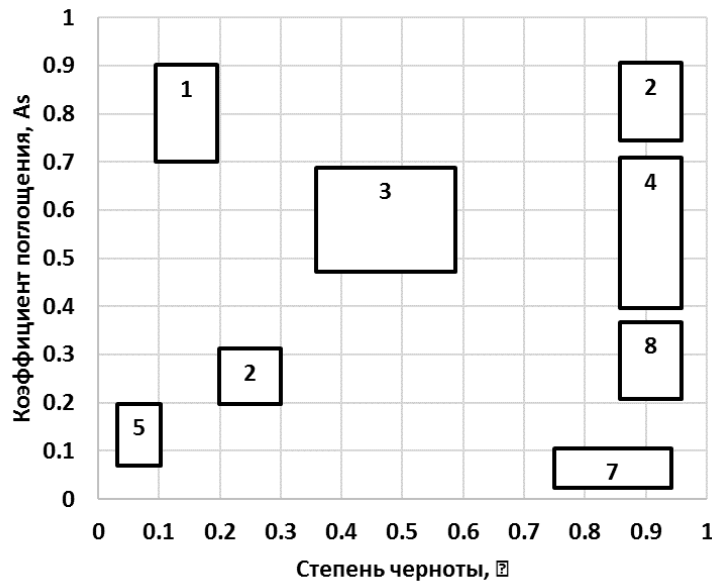


Рисунок 1 – Коэффициент поглощения A_s и степень черноты ε типичных материалов КА:
 1 – специальное черное покрытие; 2 – черные краски; 3 – металлы с матовой поверхностью; 4 – серые и цветные краски; 5 – полированные металлы; 6 – краски на основе металлов; 7 – обратная сторона металлизированных полимерных пленок; 8 – белые краски

Таким образом, равновесная температура материала (в предположении лучистого теплообмена) определяется из выражения:

$$T_{eq} = \sqrt[4]{\frac{q_s + q_i}{\varepsilon \sigma}}, \quad (13)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, ε – степень черноты материала.

Найдем изолинии $T_{eq} = T_{доп.}$. Для этого будем использовать значения плотности ионного тока $j_0(\varphi)$ и средней энергии ионов $E_0(\varphi)$ вдоль некоторого луча с углом вылета φ .

Согласно (3), тепловой поток при котором реализуется равновесная температура поверхности T_{eq} равен:

$$q_i = \varepsilon \sigma T_{eq}^4 - q_s. \quad (14)$$

Поскольку $q_i \geq 0$, задаваемое значение равновесной температуры T_{eq} должно быть больше, чем $T_s = \sqrt[4]{\frac{q_s}{\varepsilon \sigma}}$ – равновесная температура без учета воздействия ионов. Если окажется, что $T_s > T_{доп.}$, значит применение материалов с данной комбинацией коэффициентов A_s , ε является недопустимым.

Соответствующее значение плотности ионного тока:

$$j_i = \frac{q_i}{E_i}, \quad (15)$$

где значение E_i задано в эВ.

Тогда, полагая, что плотность тока вдоль луча φ спадает пропорционально $1/r^2$, расстояние r на котором равновесная температура элемента поверхности будет равна $T_{\text{доп.}}$ можно определить по формуле:

$$r(\varphi) = r_0 \left[\frac{j_0(\varphi)}{\frac{q_i(T_{\text{доп.}})}{E_i(\varphi)}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Координаты этой точки в картезианской системе координат определяются как:

$$x = r(\varphi) \cos(\varphi), \quad (17a)$$

$$y = r(\varphi) \sin(\varphi). \quad (17b)$$

Вычисляя эти значения для различных значений φ , получаем изолинию для равновесной температуры $T_{\text{доп.}}$.

Если элемент конструкции находится внутри этой границы, то его равновесная температура будет превышать $T_{\text{доп.}}$. Если снаружи – температура элемента будет гарантированно меньше $T_{\text{доп.}}$. Следовательно, при проектировании КА следует размещать элементы конструкции так, чтобы они не попадали внутрь границы $T_{\text{eq}} = T_{\text{доп.}}$.

В курсовой работе требуется:

1. Построить границы допустимого теплового воздействия струи СПД-100 на различные функциональные материалы КА, приведенные на рисунке 1. Значения коэффициентов A_s , ε брать примерно по центру квадратов и округлять до ближайшего «красивого» числа. Расчет производить для освещенной Солнцем поверхности материалов. Значение допустимой температуры поверхности задать равным 125°C .

3.2. Определение границ области допустимого эрозионного воздействия

Эрозионное воздействие плазменной струи на элементы конструкции КА состоит в том, что ионы струи выбивают атомы материала в результате чего, происходит его эрозия. Скорость эрозии определяется соотношением:

$$\delta = \frac{j_i}{e} \cos(\theta) \cdot Y(E, \theta) \frac{m_a}{\rho}, \quad (18)$$

где $Y(E, \theta)$ – коэффициент распыления материала (атом/ион); θ – угол падения ионов (отсчет от нормали к поверхности); m_a , ρ – средняя масса атома и плотность распыляемого материала, соответственно; e – заряд электрона.

Если пучок не моноэнергетический, скорость эрозии вычисляется путем усреднения по всему спектру частиц. Для этого вводится понятие распылительной способности ионов струи (аналог коэффициента распыления, усредненный по энергиям ионов коэффициент распыления):

$$W(\varphi) = \int_E f_\varphi(E) \cdot Y_0(E) dE, \quad (19)$$

где $f_\varphi(E)$ – функция плотности распределения ионов струи по энергиям при угле вылета ионов φ ; $Y_0(E)$ – коэффициент распыления при нормальном угле падения ионов.

Вид функции $f_\varphi(E)$ приведен на рисунке 3.

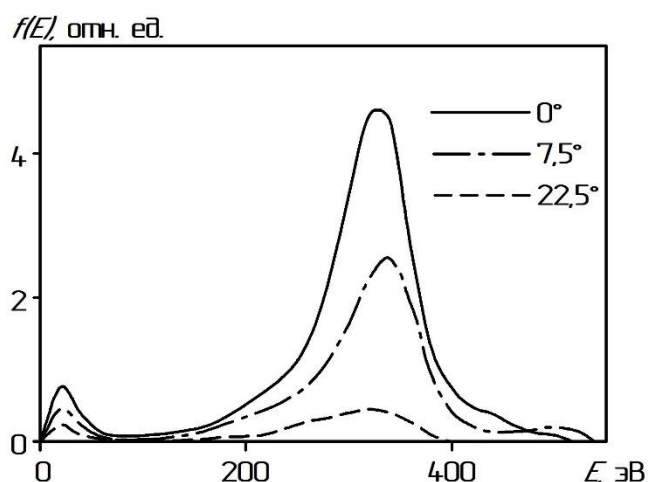


Рисунок 3 – Вид функции распределения ионов по энергиям для различных углов вылета ионов.

На рисунке 4 приведена зависимость распылительной способности струи СПД-100 для сплава АМГ6, вычисленной по средней энергии ионов (кривая E_{mid}) и по формуле (10). Сравнение этих кривых показывает, что оценка распылительной способности по средней энергии ионов оказывается заниженной в 1.5-2 раза по сравнению со значением распылительной способности, вычисленной с учетом энергетического спектра ионов. Из этого следует, что при определении критических границ следует использовать распылительную способность ионов, полученную по формуле (10), а не значение коэффициента распыления при средней энергии ионов.

Так же следует отметить, что в периферийной зоне струи точность определения распылительной способности резко снижается из-за неточности энергетических спектров. Поэтому для оценок худшего случая для больших углов вылета ионов было принято последнее надежное значение $W(\varphi)$ (в данном случае – 0.011 для угла 63°).

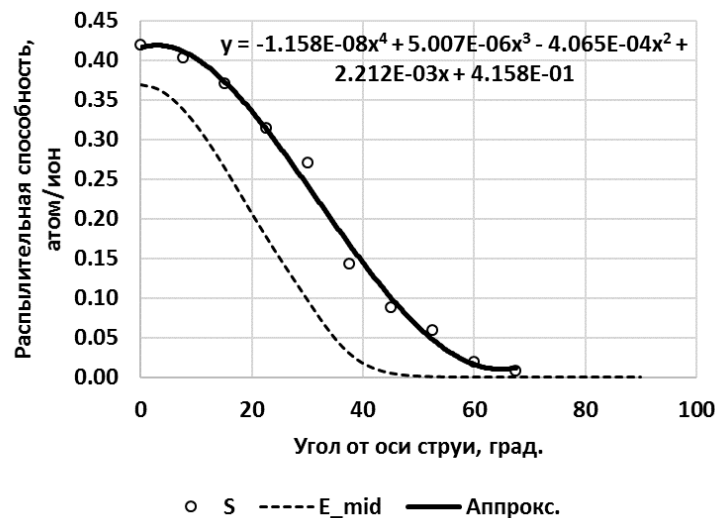


Рисунок 3 – Зависимость распылительной способности струи СПД-100 от угла вылета ионов (для сплава АМГ6)

Если функция распределения ионов по энергиям неизвестна, для определения $W(\varphi)$ приходится использовать значения средней энергии ионов. В этом случае для $W(\varphi)$ имеем:

$$W(\varphi) \approx Y_0(E(\varphi)). \quad (20)$$

Но, как было показано выше (см. рисунок 3), поскольку расчет $W(\varphi)$ по (11) даст сильно заниженные значения распылительной способности струи, он может применяться только для грубых, оценочных расчетов.

Угловая зависимость коэффициента распыления оказывает сильное влияние на скорость эрозии. Поскольку угол падения ионов априори неизвестен, расчет следует производить для худшего случая, которому соответствует максимальное значение комплекса $K(\theta) = \cos(\theta) \cdot \bar{Y}(\theta)$, где $\bar{Y}(\theta)$ – безразмерный коэффициент распыления.

Для примера, на рисунке 5 приведена зависимость $\bar{Y}(\theta)$ сплава АМГ6 и соответствующая ей зависимость $K(\theta)$.

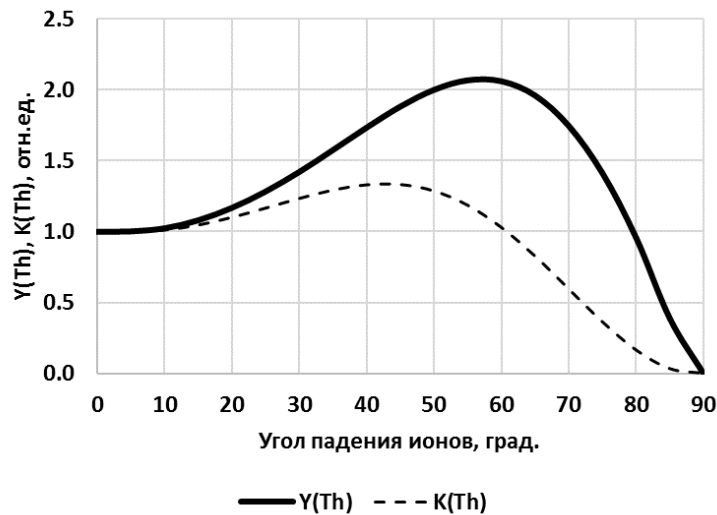


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента распыления $\bar{Y}(\theta)$ и скорости распыления $K(\theta)$ сплава АМГ6 от угла падения ионов

Как видно из этого графика максимальное значение $K(\theta) = K_{max} = 1.33$ реализуется при угле падения ионов $\theta \approx 45^\circ$. Отметим, что всегда выполняется условие $K_{max} \leq \bar{Y}_{max}$.

Таким образом, окончательное выражение для максимальной скорости эрозии примет вид:

$$\delta = \frac{j_i}{e} K_{max} W(\varphi) \frac{m_a}{\rho}, \quad (21)$$

Для построения критических границ задают допустимую глубину эрозии материала h и время воздействия (время работы двигателя) – τ .

По этим параметрам определяют величину скорости эрозии:

$$\delta = \frac{h}{\tau}. \quad (22)$$

Из (11) находим плотность тока, соответствующую заданному значению скорости эрозии:

$$j_*(\delta, \varphi) = e \frac{\delta}{K_{max} W(\varphi)} \frac{\rho}{m_a}. \quad (23)$$

или, после соответствующих подстановок,

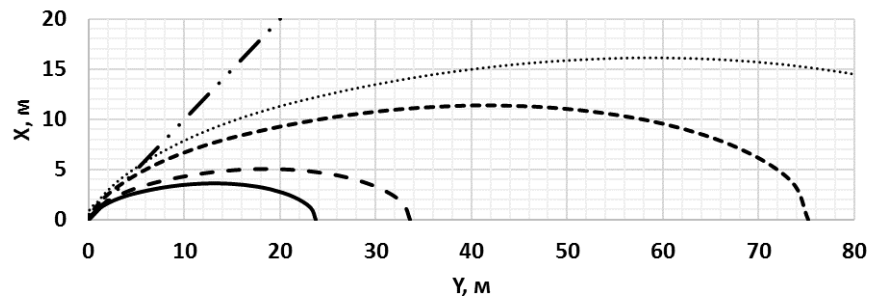
$$j_*(\delta, \varphi) = e \frac{h/\tau}{K_{max} W(\varphi)} \frac{\rho}{m_a}. \quad (24)$$

Расстояние от центра двигателя до изолинии $h = const$ определяется по формуле:

$$r(\varphi) = r_0 \left[\frac{j_0(\varphi)}{j_*(\delta, \varphi)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (25)$$

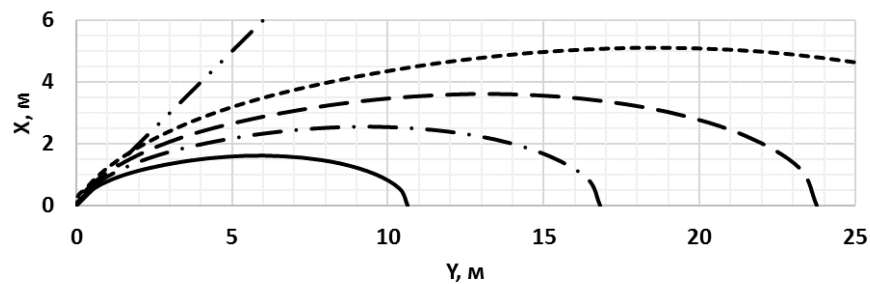
Координаты точек изолинии определяются по (8).

На рисунке 5 приведены результаты расчета границы области эрозии (ГОЭ) сплава АМГ6 в струе двигателя СПД-100 для времени работы двигателя $\tau = 2000$ часов. Каждая ГОЭ является изолинией для данного значения h_* . Если элемент конструкции находится внутри области, ограниченной ГОЭ, уровень его эрозии может превышать h_* . Если снаружи – уровень эрозии будет гарантированно меньше h_* .



..... 0.5 мкм - - - 1 мкм - · - 5 мкм — 10 мкм — · 90%

(a)



..... 5 мкм - - - 10 мкм - · - 20 мкм — 50 мкм — · 90%

(б)

Рисунок 5 – Границы области эрозии сплава АМГ6 за 2000 часов в струе двигателя СПД-100 при различных значениях h

Из рисунка 5 следует, что использование ограничений по углу расходимости в ближней зоне струи (до 2-5 м) может давать заниженный результат, а в дальней зоне – сильно завышенный. В связи с этим использование ГОЭ представляется более эффективным и позволяет размещать элементы КА даже внутри конуса угла расходимости струи.

Если время воздействия отличается от указанного на диаграмме или элемент выполнен из другого материала, необходимо пересчитать ГОЭ по приведенным выше формулам. Однако для экспресс-оценок можно воспользоваться простой пропорцией:

$$h_1 = h_0 \frac{\tau_0 \delta_0}{\tau_1 \delta_1},$$

где индекс $i = 0$ соответствует материалу, использованному при построении диаграммы, а $i = 1$ – новому материалу.

Характерные значения скорости эрозии δ некоторых материалов при нормальном падении ионов ксенона с энергией 300 эВ при плотности тока 1 А/м² приведены в таблице 1. Данные для расчета заимствованы из [13].

Таблица 1 – Значения скорости распыления некоторых материалов при воздействии ионов ксенона (300 эВ, 1 А/м², нормальное падение).

Материал	Y_0 , атом/ион	M_w , а.е.м.	ρ , г/см ³	δ , мкм/час
АМГ6	0.51	27	2.7	0.18
K215	0.69	20	2.2	0.23
Полиимид	0.42	12	1.6	0.06
Углепластик	0.24	9.8	1.43	0.11
Серебро	1.91	107.9	10.5	0.71
Медь	1.26	63.5	8.92	0.32
Золото	1.76	196.9	19.32	0.65
Олово	2.97	118.7	7.31	1.74
Нерж. ст.	0.61	55.4	7.8	0.16
Вольфрам	0.59	183.84	19.25	0.20
Молибден	0.43	95.6	10.22	0.14
Графит	0.08	12	2.3	0.02
Al ₂ O ₃	0.09	20.4	3.99	0.02

Отметим, что критический уровень эрозионного воздействия струи на материалы КА зависит от многих факторов. Например, эрозия межсоединителей панелей солнечных батарей приводит к небольшому увеличению их сопротивления или (что намного опаснее) нарушению целостности межсоединителей в результате их полного распыления или длительного термоциклирования частично распыленных межсоединителей.

В курсовой работе требуется:

2. Построить границы области допустимого эрозионного воздействия струи СПД-100 на различные материалы (алюминий, медь, серебро, олово, углерод, полиимид) при допустимой глубине эрозии 1, 5, 10, 20 и 50 мкм за 2000 часов работы двигателя. Данные по характеристикам распыления материалов приведены в Приложении А.

4. Расчет параметров струи в точках поверхности КА

Геометрическая схема КА приведена на рисунке 2.1 (показаны только двигатель коррекции и панель солнечной батареи).

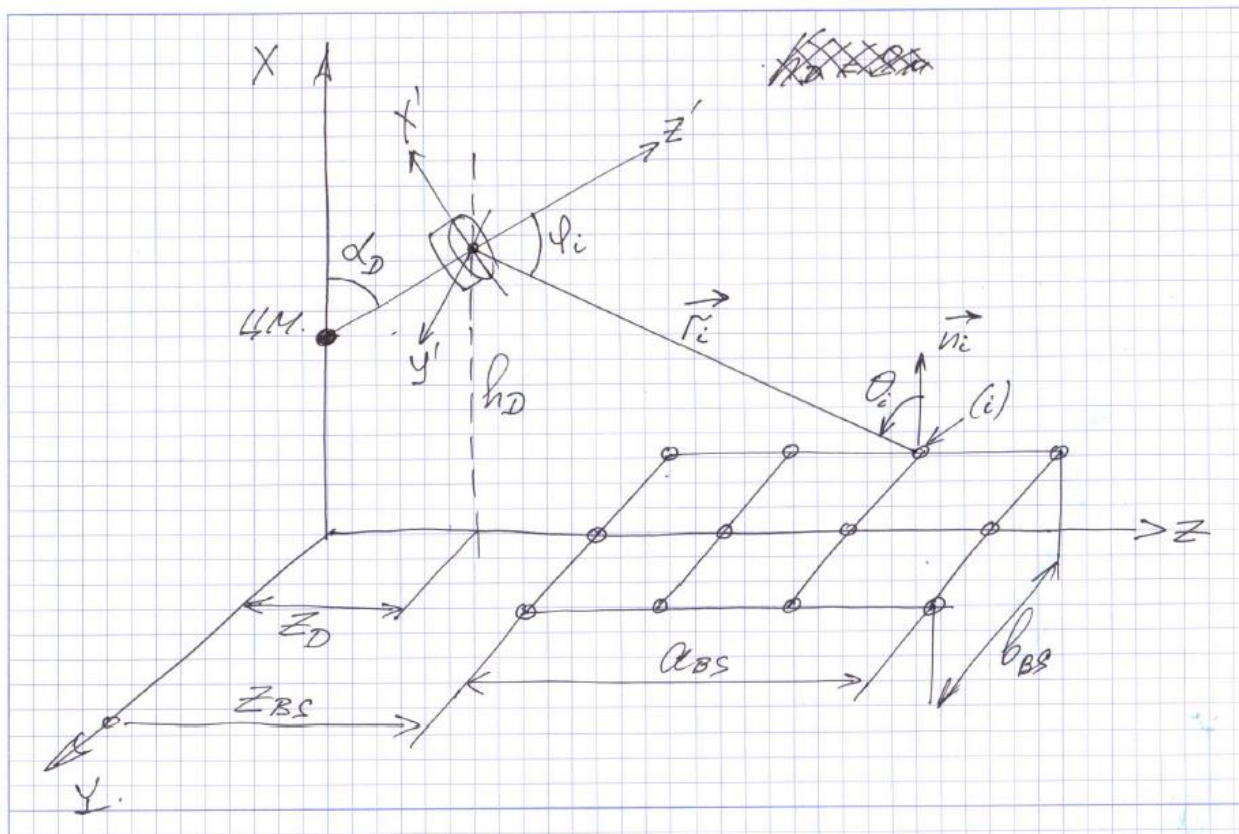


Рисунок 3 – Геометрическая схема КА

Таблица 1 – Параметры геометрической модели КА

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
α_D	0°	27°	45°
h_D	2500	2000	1500
z_D	1000	1000	1000
z_{BS}	2500	2500	2500
a_{BS}	5000	5000	5000
b_{BS}	2500	2500	2500

Линейные размеры приведены в мм

В курсовой работе требуется:

Рассчитать параметры струи и геометрические параметры взаимодействия в каждой точке поверхности СБ. Для расчетов использовать модель струи (3). Результаты расчетов свести в таблицу 3.

Таблица 3 – Параметры струи в точках поверхности СБ

№ точки	φ_i	θ_i	$r_{i,x}$	$r_{i,y}$	$r_{i,z}$	$ \vec{r}_i $	$j(r, \varphi)$	$j_s(r, \varphi)$	$E_i(\varphi)$
1									
2									
...									
12									

Обозначения:

θ_i – угол падения ионов по отношению к нормали к поверхности;

$j(r, \varphi)$ – плотность ионного тока в струе (на элемент поверхности, перпендикулярной вектору скорости ионов);

$j_s(r, \varphi) = j(r, \varphi) \cdot \cos(\theta)$ – плотность ионного тока на элемент поверхности;

Расчеты рекомендуется проводить в программах Эксель или Маткад с применением векторной алгебры в параметрическом виде (константы задаются в отдельных ячейках, а не непосредственно в формулах).

5. Расчет механического воздействия

Схема взаимодействия потока ионов с поверхностью КА приведена на рисунке 1.

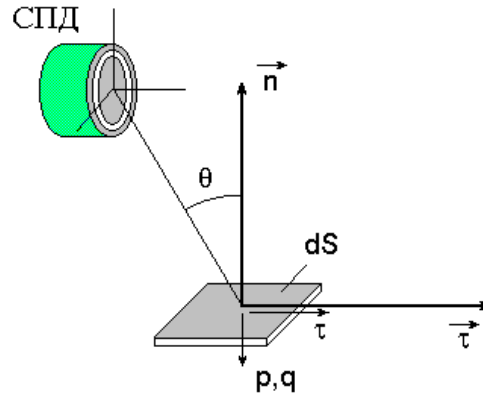


Рисунок 1 – Схема взаимодействия потока ионов с поверхностью КА

Импульс, переданный потоком поверхности (по сути – величина давления):

$$\vec{P} = \rho V^2 (\vec{n} \cdot \vec{p} + \vec{t} \cdot \vec{\tau}), \quad (26)$$

где ρ – массовая плотность набегающего потока частиц (кг/м³); V – скорость набегающего потока (скорость ионов); \vec{n} и \vec{t} – орты нормали и касательной к поверхности; p , τ – коэффициенты обмена нормального и касательного импульса, соответственно.

В общем случае p , τ являются сложными функциями энергии частиц, свойств материала и угла падения ионов. Для описания этих функций используются модели различной сложности. Одной из наиболее простых моделей является модель зеркально-диффузного отражения, согласно которой коэффициенты обмена определяются соотношениями:

$$p = (2 - \sigma_n) \cos^2(\theta) + \frac{\sigma_n}{2} \sqrt{2\pi \frac{kT_w}{mV^2}} \cos(\theta), \quad (27)$$

$$\tau = \sigma_\tau \sin(\theta) \cos(\theta), \quad (28)$$

где $h_s = mV^2/2kT_w$, где m – масса частицы.

Коэффициенты

$$\sigma_n = \frac{p^- - p^+}{p^- - p_s^+}; \quad \sigma_\tau = \frac{\tau^- - \tau^+}{\tau^- - \tau_s^+}$$

называются коэффициентами аккомодации импульса и энергии, индекс “-” относится к падающим частицам, «+» – к отраженным частицам, индекс s – к частицам, отраженным в равновесии с поверхностью, когда

$$V = V(u_n) = \frac{2h_s}{\pi} u_n \exp(-h_s u_n^2), \quad h_s = \frac{1}{2RT_s}, \quad (29)$$

где R – газовая постоянная, Ts – температура поверхности 40С.

Коэффициенты аккомодации σ_n и σ_τ имеют вполне понятный физический смысл и ограниченный диапазон значений, что делает их весьма удобными для практического применения.

Легко убедиться, что при значениях коэффициентов аккомодации $\sigma_\tau \rightarrow 0, \sigma_n = 0$ реализуется режим зеркального отражения частиц от поверхности (модель каучукового мячика) при котором касательная компонента импульса равна нулю, а нормальная равна удвоенному импульсу частицы.

При $\sigma_\tau \rightarrow 1, \sigma_n = 1$ реализуется режим полного поглощения импульса, что характерно для взаимодействия ионов струи СПД с материалами, при котором импульс частицы полностью передается поверхности (модель пластилинового мячика).

Режим диффузного отражения реализуется при $\sigma_\tau \rightarrow 1, \sigma_n < 1$. В этом случае происходит полное поглощение касательной компоненты импульса и частичное поглощение (за счет осесимметричного диффузного рассеяния отраженных частиц) нормальной компоненты импульса частицы.

При других значениях коэффициентов аккомодации реализуются промежуточные режимы взаимодействия.

Коэффициенты аккомодации σ_n и σ_τ зависят от сочетания физических свойств частиц и материала поверхности, морфологии поверхности, энергии и угла падения частиц, и должны быть определены расчетным путем или экспериментально.

В то же время, численные и экспериментальные исследования в этой области показывают некоторые качественные зависимости характеристик взаимодействия от параметров частицы и мишени, которые могут помочь при оценке коэффициентов аккомодации большинства реальных материалов КА, для которых отсутствуют необходимые экспериментальные данные.

В настоящее время, наиболее полно теоретически изучен вопрос взаимодействия частиц газа с чистыми кристаллическими поверхностями. Известно значительное количество работ, посвященных численному моделированию столкновения частиц с поверхностью твердого тела (см., например, [#3]) и содержащих приближенные аналитические решения, характеризующие механизм передачи импульса и энергии частиц газа идеальным кристаллическим поверхностям [#2].

Однако на практике поверхности с идеальной кристаллической структурой встречаются крайне редко. В большинстве случаев поверхности имеют поликристаллическую структуру, а сама поверхность может быть покрыта слоем адсорбированных частиц или слоем загрязнений продуктами собственной атмосферы КА. В связи с этим, значительный интерес представляют вопросы моделирования взаимодействия частиц с реальными поверхностями. Но здесь возникает масса трудностей, обусловленных многообразием, как состояний поверхности, так и процессов взаимодействия. Поэтому в данном вопросе имеются, в основном, качественные решения, или частные решения, справедливые в относительно узком интервале значений параметров.

Ниже мы рассмотрим некоторые основные зависимости коэффициентов обмена от параметров взаимодействия и состояния поверхности [#2]. Также, будет рассмотрен ряд моделей, позволяющих вычислить коэффициенты обмена в зависимости от параметров взаимодействия.

Влияние параметра μ (отношения массы частицы к массе атома мишени) на величину коэффициента аккомодации нормального импульса

при бомбардировке мишеней с атомной массой от 27 до 207 и монокристалла Si(III) ионами Xe^+ , Kr^+ , Ar^+ , N_2^+ и He^+ при скорости 10 км/с и угле падения $\theta = 0^\circ$ иллюстрирует рисунок 1 [5] (точки 1-6, соответственно).

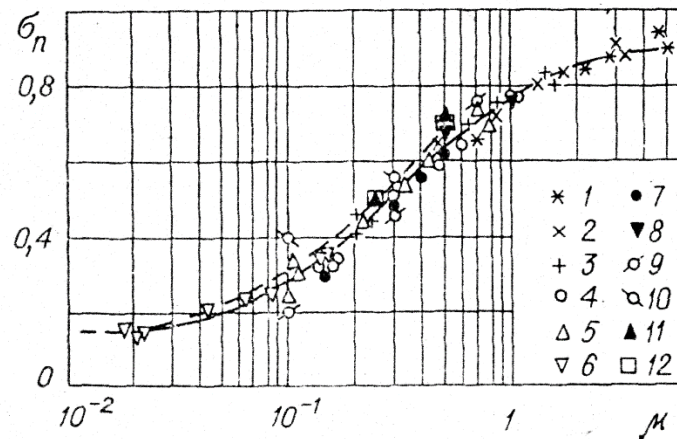


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента аккомодации импульса от соотношения масс частицы и мишени

Точки 7 – результаты расчета при рассеянии атомов газа на плоской квадратной решетке [6], 8 – данные расчетов коэффициентов аккомодации нормального импульса при взаимодействии атомных частиц с поверхностью твердого тела, моделируемого линейным гармоническим осциллятором и полубесконечной решеткой упругосвязанных атомов [7]. Точки 9, 10 – результаты численного моделирования процесса взаимодействия атомов газа с трехмерным кристаллом взаимосвязанных атомов [8,3]. Точки 11 соответствуют расчетным значениям коэффициентов аккомодации нормального импульса при взаимодействии атомов газа с решеткой твердых сфер [2] (с учетом вклада первых и вторых ударов), точки 12 характеризуют передачу нормального импульса атомов газа решетке мягких сфер. Штриховой линией приведены результаты интерполяции расчетных значений σ_n для $\mu = 0, 0.25$ и 0.5 при рассеянии атомных частиц на решетке мягких сфер [2].

Влияние атомной массы частицы на величину σ_n при скорости соударения 10 км/с и падении частиц по нормали к поверхности показано на рисунке 2 [5].

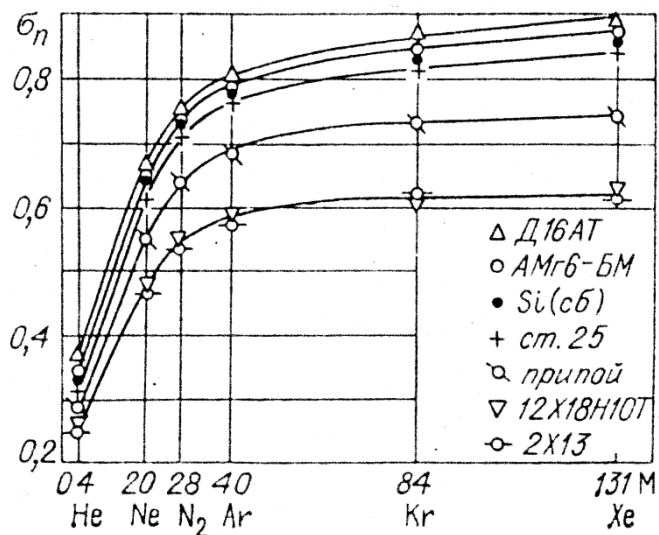


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента аккомодации импульса от атомной массы частицы.

Влияние скорости частицы, бомбардирующей мишень, на величину коэффициента аккомодации нормального импульса при падении частицы по нормали к поверхности иллюстрирует рисунок 3 [3].

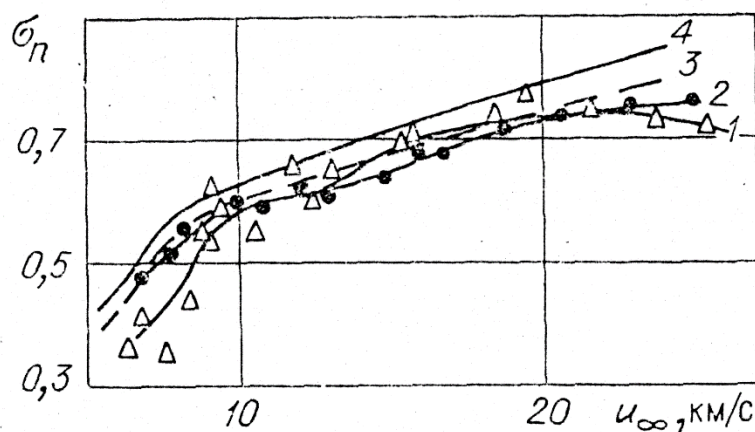


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента аккомодации импульса от скорости частиц.

Точки 1 – данные работы [7]. Кривой 2 обозначены результаты измерений работы [5], 3 – расчетные значения σ_n на поверхности твердого тела, моделируемого гармоническим осциллятором, 4 – результаты расчета σ_n при численном моделировании столкновения атомов газа с полубесконечной решеткой упругосвязанных атомов, выполненные по данным работы [6].

Влияние ориентации элемента обтекаемой поверхности на передачу импульса газовых ионов иллюстрирует рисунке 4 а) и б), где представлены кривые изменения σ_n/σ_0 где σ_0 — значение коэффициента нормального импульса для $\theta_1 = 0$, при наклонном падении ионов на поверхность мишени со скоростью $U_\infty = 10$ км/с.

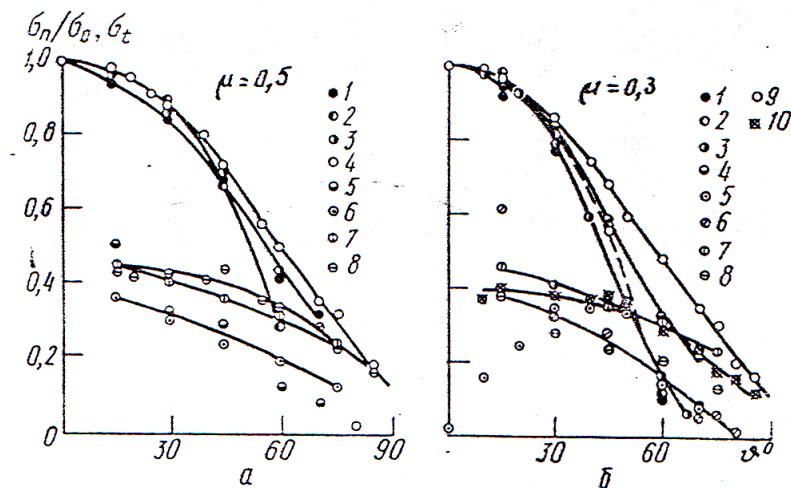


Рисунок 4 – Зависимости коэффициентов аккомодации нормального и тангенциального импульса от угла падения частиц.

На рисунке 4 а) показана зависимость σ_n/σ_0 и σ_t от угла атаки мишени при $\mu = 0.5$. Кривая 1 — результаты расчета $\sigma_n(\theta)$ при рассеянии атомов газа на плоской квадратной решетке [9], 2 — данные расчета σ_n при отражении атомов газа от решетки твердых сфер с учетом вклада первых и вторых ударов, точки 3 — результаты расчета взаимодействия атомных частице решеткой мягких сфер [2], 4 — измеренные значения σ_n/σ_0 для системы

Kr+ – W из [#5]. Сплошная кривая, соединяющая точки 4,— эмпирическая зависимость [#4]:

$$\sigma_n / \sigma_0 = \cos \theta + 0.333 \cdot (1 + 1/\sigma_0)^{-1} \sin^2 \theta \cdot |\sin^2 \theta - \sqrt{\cos \theta}| \quad (30)$$

Точки 5 — данные расчета σ_n при отражении атомов газа от плоской квадратной решетки [#9]. Кривая 6 — расчетные значения коэффициента тангенциального импульса при взаимодействии атомных частиц с решеткой мягких сфер [#2]; кривая 7 соответствует расчетным значениям σ_n при отражении атомов газа от решетки твердых сфер [#2]. Точки 8 — результаты измерений σ_n для системы Kr+ – W из [#5].

Зависимость σ_n / σ_0 и σ_t от угла атаки мишени при $\mu = 0,5$ приведена на рисунке 4 б). Точки 1, 4 соответствуют результатам расчета при рассеянии атомных частиц плоской квадратной решеткой [#9]. Кривая 2 — расчетные значения $\sigma_n(\theta)$ при взаимодействии атомов газа с решеткой мягких сфер [#2], кривая 3 — численные данные работы [#8]. Точками 5 показаны расчетные значения $\sigma_t(\theta)$ [#8], Кривая 6 — численные данные работы [#9]. Точки 7 характеризуют отражение атомов газа от решетки твердых сфер, а 8 — от решетки мягких сфер [#2], точки 8, 10 — измеренные значения для системы Ar+—Mo из [#5]. Сплошная кривая 9 соответствует эмпирической зависимости (9).

В настоящее время развито несколько подходов к описанию процессов передачи импульса и энергии от падающей частицы атомам мишени. В работах [#2] рассмотрены аналитические модели взаимодействия частиц набегающего потока с решеткой твердых сфер, когда потенциал взаимодействия считают вертикальным барьером, с решеткой мягких сфер (потенциал взаимодействия имеет наклонный участок), учтены температура поверхности и потенциал притяжения. Часто, для определения коэффициентов обмена используют модели функции рассеяния отраженных частиц. Наиболее хорошо изученной моделью является модель зеркально-

диффузного отражения [#2], модель Шамберга [#11], модель Ночиллы [#10]. Имеются также различные аппроксимации функции рассеяния и, соответственно, коэффициентов обмена импульсом и энергией. Созданы программы численного моделирования, позволяющие получить все основные количественные и качественные характеристики процесса взаимодействия частиц с поверхностью [#12].

В то же время следует отметить, что только в очень редких случаях перечисленные выше методы моделирования позволяют с достаточной точностью спрогнозировать значения коэффициентов аккомодации для реальных поверхностей. Поэтому на практике значения коэффициентов аккомодации должны быть измерены экспериментально.

В рамках КР для упрощения вычислений расчет значений нормальной и касательной компонент импульса (давления) производится в точках сетки, указанных на рисунке 3 выше. Величина элементарной силы, действующей на элемент поверхности dS , равна $d\vec{F} = \vec{P}dS$.

Главный вектор всех поверхностных сил, приложенных со стороны струи к поверхности КА, определяется поверхностным интегралом по всей поверхности, бомбардируемой струей ЭРД, от элементарной поверхностной силы $d\vec{F}$ следующим образом:

$$\vec{F} = \iint_S d\vec{F}. \quad (31)$$

Элементарный момент $d\vec{M}$ элементарной силы $d\vec{F}$ определяется как векторное произведение вида:

$$d\vec{M} = \vec{R} \times d\vec{F}, \quad (32)$$

где \vec{R} – радиус-вектор, проведенный из центра масс КА в точку приложения элементарной силы $d\vec{F}$.

Главный вектор момента сил, действующего на весь КА относительно ЦМ:

$$\vec{M} = \iint_S d\vec{M}. \quad (33)$$

Проекции момента \vec{M} на оси, связанной с центром масс КА системы координат, определяются скалярными произведениями вида:

$$M_x = \vec{M} \cdot \vec{i}, \quad (34a)$$

$$M_y = \vec{M} \cdot \vec{j}, \quad (34б)$$

$$M_z = \vec{M} \cdot \vec{k}, \quad (34в)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы направления осей системы координат $X_{ц.м.}, Y_{ц.м.}, Z_{ц.м.}$, связанной с центром масс КА.

Аналогично рассчитываются проекции силы \vec{F} на оси главной системы координат КА.

Расчет механического воздействия (возмущающих сил и моментов) производится численно, методом конечных элементов.

В качестве dS можно использовать треугольные элементы, построенные на точках сетки, приведенной на рисунке 3. В этом случае

$$\Delta \vec{F} = \frac{1}{3} S_{\Delta} \{ \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 \}, \quad (35)$$

где S_{Δ} – площадь треугольника; \vec{P}_i – векторы импульса в вершинах ($i = 1, 2, 3$). Точка приложения силы лежит в центре треугольника, т.е.

$$\vec{R}_{\Delta} = \frac{1}{3} \{ \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3 \}. \quad (36)$$

Интегрирование заменяют суммированием по всем конечным элементам поверхности КА (по всем треугольникам):

$$\vec{F} = \sum_n \Delta \vec{F}, \quad (37)$$

$$\vec{M} = \sum_n \Delta \vec{M}, \quad (38)$$

Полученные расчетные значения возмущающих усилий и моментов приводят в пояснительной записке виде таблицы.

6. Расчет эрозионного воздействия

Под *эрозионным воздействием* струй ЭРД на материалы внешних поверхностей КА подразумевают уменьшение толщины этих материалов в результате длительного воздействия ионов струи. Основным параметром данного вида воздействия является глубина эрозии h , т.е. толщина материала, распыленного ионами струи.

Эрозия материалов внешних поверхностей КА является одним из наиболее неприятных факторов, с которым приходится сталкиваться при интеграции ЭРД на КА, поскольку она может приводить к существенному изменению функциональных свойств материалов и покрытий внешних поверхностей КА.

Особенно сильно эрозионное воздействие сказывается на тонкопленочных покрытиях и материалах, которые широко применяются на современных КА для придания особых свойств функциональным поверхностям КА. Например, на современных СБ для повышения их электрической мощности и защиты от негативного воздействия внешних факторов часто применяют тонкопленочные антиотражающие или электропроводящие покрытия. Тонкие пленки широко применяются в теплоизоляционных материалах, оптических приборах, рефлекторах антенн и многих других системах. Значительному распылению подвергаются межсоединители солнечных батарей, имеющие толщину 10-20 мкм.

Критерием стойкости КА к эрозионному воздействию плазменных струй ЭРД является выполнение условия:

$$h \leq h_{\text{доп.}}, \quad (39)$$

где $h_{\text{доп.}}$ – допустимое значение глубины распыления материала или покрытия.

Значение $h_{\text{доп.}}$ определяется типом материала или покрытия, его геометрическими параметрами, физическими свойствами и функциональным назначением. Например, если в результате эрозии материала его прочность

становится недостаточной, то величина $h_{\text{доп.}}$ выбирается исходя из допустимой прочности материала. Если в результате эрозии меняются оптические или электрические характеристики материала (элемента конструкции), то, соответственно, $h_{\text{доп.}}$ выбирается исходя из допустимых изменений этих характеристик.

Анализ эрозионного воздействия ЭРД на КА состоит в определении величины h и сопоставлении ее с $h_{\text{доп.}}$. При выявлении элементов конструкции КА, не отвечающих критерию (1), пересматривают конструкцию КА (как правило), меняют материалы (редко) или уточняют расчеты (крайне редко).

В связи с тем, что изменение уже проработанной конструкции КА является чрезвычайно сложным процессом (фактически, это означает начать проектирование КА заново, вещь совершенно невозможная при ограниченном бюджете современных космических проектов), анализ эрозионного воздействия должен проводиться на самых ранних этапах проектирования, а именно – на этапе разработки эскизного проекта. При принятии тех или иных конструкторско-технологических и инженерных решений проектировщики должны иметь четкие и надежные правила (РДК – руководящий документ конструктора), позволяющие избежать грубых ошибок и исключить возможность возникновения ситуаций, когда критерий (1) не выполняется.

Однако в некоторых случаях анализ проводят уже на заключительных этапах проектирования. Целью такого анализа является подтверждение стойкости выбранной конструкции КА к эрозионному воздействию струй ЭРД. Если в ходе анализа будет установлено, что стойкость КА к эрозионному воздействию не обеспечена, проект может быть отклонен от дальнейшего рассмотрения или направлен на доработку.

Основные положения теории распыления

Для определения величины h необходимо знать, как связана скорость распыления материалов δ с параметрами воздействия, а именно – с плотностью потока ионов струи, энергией и углом падения ионов, а также с физическими свойствами ионов и распыляемого материала. Чтобы разобраться с этими вопросами рассмотрим основные положения теории распыления.

Распыление – это процесс удаления материала с поверхности твердого тела при соударении с ней высокоэнергетических заряженных частиц.

Процесс распыления – заключается в разрушении твёрдых тел под воздействием бомбардировки их поверхности заряженными и нейтральными частицами.

Продукты распыления – это атомы, положительные и отрицательные ионы, а также нейтральные и ионизованные атомные и молекулярные комплексы (кластеры), выбитые ионами из поверхности. Испускаемые с поверхности частицы характеризуются широким энергетическим и угловым распределением. Средняя энергия частиц обычно не превышает 5-10 эВ. В заряженном или возбужденном состоянии находится лишь небольшая часть испускаемых частиц (до 15-20%). Доля кластеров, как правило, еще меньше, но она увеличивается по мере увеличения энергии ионов. Заметим, что сложные соединения при распылении распадаются и распыляются в виде отдельных атомов.

Эффективность (скорость) процесса распыления характеризуется *коэффициентом распыления* вещества мишени S , равным среднему числу всех частиц, эмитированных мишенью, в расчете на одну бомбардирующую частицу (ион):

$$S = \frac{\text{число распыленных частиц}}{\text{число ионов, упавших на поверхность}}. \quad (40)$$

В основной размерности [атом/ион] коэффициент распыления обычно называют атомарным коэффициентом распыления S_a .

Коэффициент распыления может быть выражен через скорость уноса массы или объема на единицу заряда, в этом случае имеет место массовый коэффициент распыления S_m [мг/Кл] или, соответственно, объемный коэффициент распыления S_v [мм³/Кл].

Массовый коэффициент распыления вычисляют через среднюю массу атома мишени и заряд иона (электрона):

$$S_m = S_a \cdot \frac{m_p \cdot M_w \times 10^6}{e}, \quad (41)$$

где $m_p = 1.6605311 \times 10^{-27}$ кг (масса покоя протона), M_w – средний атомный вес частиц мишени, $e = 1.6021917 \times 10^{-19}$ Кл (заряд электрона).

Например, для алюминия ($M_w = 27$):

$$S_m = S_a \times \frac{1.66 \times 10^{-27} \cdot 27 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19}} = S_a \cdot 0.28 \quad (42)$$

При 300 эВ $S_a = 0.51$, $S_m = 0.143$ мг/Кл.

Объемный коэффициент распыления вычисляют через плотность:

$$S_v = S_m \frac{1}{\rho} = 0.143 \frac{1}{2.7} = 0.05 \text{ мм}^3/\text{Кл} \quad (43)$$

Отметим, что в задачах прогнозирования воздействия струй ЭРД на КА наиболее предпочтительным является использование массового коэффициента распыления, поскольку при этом нет необходимости определять массу атома материала. Особенно сложно определить эту величину для полимерных или композитных материалов, состав которых точно не известен.

Впервые, распыление наблюдалось в конце XVIII века в газовом разряде как эрозия катода [203], бомбардируемого высокоэнергетическими ионами из плазмы. С этим, собственно, и связан, используемый иногда термин «*катодного распыления*». Исследования катодного распыления начались уже более 150 лет назад. Рост числа публикаций в период с 1965 по 1985 годы носил экспоненциальный характер (рис.1).

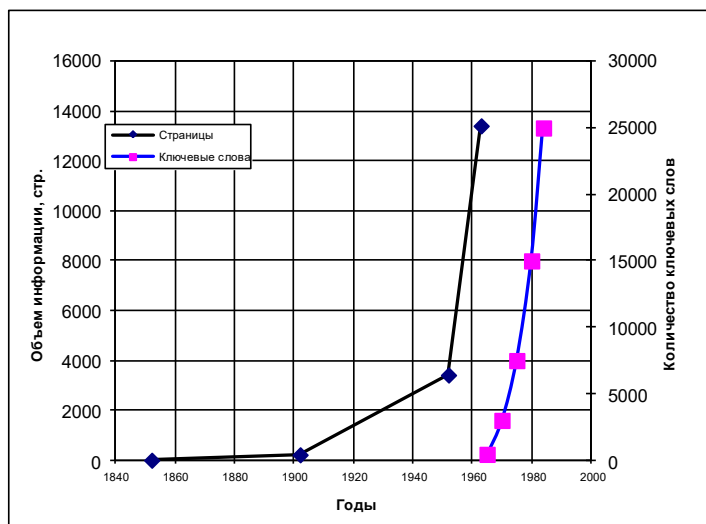


Рисунок 1 – Рост числа публикаций по катодному распылению.

В последнее время интересы исследователей сместились в область изучения характеристик распыленных частиц (продуктов распыления). Эти исследования имеют не только большое научное, но и прикладное значение, поскольку их результаты находят широкое применение в технологии производства новых материалов и полупроводниковых приборов.

За последние 30 лет было разработано более 60 теорий (математических моделей) ионного распыления, но единой теории пока так и не создано. Столь большое количество теорий свидетельствует о сложности этого процесса, а также о недостаточной точности полученных соотношений, описывающих зависимость коэффициента распыления от основных параметров процесса и других характеристик распыляемых частиц.

В настоящее время различают несколько механизмов процесса распыления:

- *столкновительное распыление* (физическое, или ионное), которое доминирует в той области энергий бомбардирующих частиц, где преобладают упругие процессы (ядерное торможение);
- *распыление за счёт неупругих процессов* – в результате возбуждения и ионизации атомов твёрдого тела;

- *химическое распыление*, которое возникает, если падающие частицы вступают в реакцию с атомами твёрдого тела, в результате чего на поверхности образуются летучие соединения.

При столкновительном распылении кинетическая энергия бомбардирующих частиц передается атомам мишени, вследствие чего некоторые атомы приобретают энергию, превышающую энергию связи поверхностных атомов U_s . При энергиях бомбардирующих частиц ниже некоторого порогового значения U_{th} распыление отсутствует ($S = 0$).

Величина U_{th} при нормальном падении ионов на мишень (угол падения $\nu = 0$) изменяется от значения $4U_s$, (если массы ионов M_i и атомов мишени M_m близки, т.е. $M_i \approx M_m$), до $50U_s$, если $M_i \ll M_m$.

Теории столкновительного распыления (например, теория Зигмунда) основаны на рассмотрении каскадов упругих столкновений, вызванных передачей кинетической энергии от бомбардирующей частицы атомам мишени. Различают 3 механизма столкновительного распыления.

1) Механизм прямого выбивания, который реализуется вблизи порога Упор при бомбардировке лёгкими ионами и при скользких углах падения ионов. При этом протяжённость каскадов невелика, значительный вклад атомы, выбитые первичными частицами (рис. 4);

2) Механизм линейных каскадов (реализуется для всех ионов, кроме самых тяжёлых - с энергиями от одного до нескольких десятков кэВ). Характеризуется малой плотностью распределения выбитых атомов, так как преобладают столкновения движущихся атомов с неподвижными, а столкновения движущихся атомов между собой происходят редко;

3) Механизм нелинейных каскадов (тепловых пиков) реализуется для ионов с большими массами и тяжелых молекулярных ионов. Плотность распределения выбитых атомов столь высока, что большинство атомов внутри некоторого объёма находится в движении.

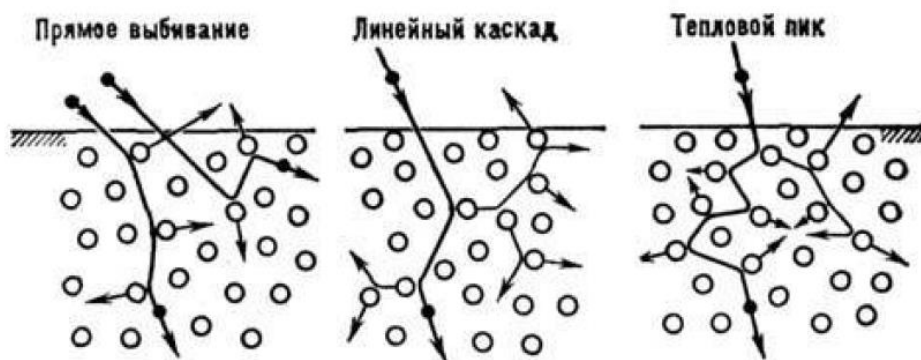


Рисунок 4 – Механизмы столкновительного распыления

Следует заметить, что процесс распыления за счёт упругих столкновений наиболее существенен в металлах и полупроводниках. В монокристаллах наиболее благоприятные условия для выхода частиц складываются в направлениях, где плотность упаковки атомов наибольшая.

При химическом распылении между бомбардирующими частицами и атомами мишени на поверхности в результате химических реакций образуются молекулы с низкой энергией связи, которые способны десорбироваться при температуре мишени. Химическое распыление наблюдается в некотором температурном интервале. В этом интервале зависимость коэффициента распыления от температуры обычно проходит через максимум, но чётко выраженной пороговой энергии нет. Коэффициент распыления зависит от конкретного сочетания «химически активный ион – мишень». Энергетическое распределение молекул в большой степени определяется температурой поверхности мишени.

В современных ЭРД, использующих в качестве рабочего тела инертные газы, химическое распыление не происходит. Однако для ЭРД на щелочных металлах или, например, на йоде, вероятность химического распыления велика и должна учитываться при анализе эрозионного воздействия плазменной струи ЭРД на материалы КА.

Отметим, что процессы химического распыления наиболее ярко проявляются при взаимодействии низкоорбитальных КА с атомарным кислородом набегающего потока.

В настоящее время известно более 20 параметров и условий процесса, от которых зависит значение коэффициента распыления [123].

К числу параметров, относительно слабо влияющих на коэффициент распыления (в 1.6-5 раз), можно отнести фазовый, магнитный и полиморфный переходы, пористость, шероховатость, температуру поверхности, не превышающую 0.7 температуры плавления, плоскость среза монокристалла, атомный состав молекулярных ионов.

Параметры распыления существенно (в 5-10 раз) изменяющие коэффициент распыления: скорость иона, угол падения легких ионов на поликристаллическую мишень, углы поворота плоскости среза монокристалла, атомарный состав молекулярных ионов в режиме тепловых пиков, температура мишени выше 0.8 температуры плавления вещества.

Параметры распыления сильно (в 20-200 раз) изменяющие коэффициент распыления: импульс иона, заряд, масса и энергия связи атома мишени, температура мишени вблизи температуры плавления вещества.

Заряд и масса иона могут изменить коэффициент распыления на 3-4 порядка величины.

Энергия иона является параметром распыления, наиболее сильно, на 7-8 порядков величины, изменяющим значение коэффициента распыления. Особенно сильно эта зависимость проявляется при низких энергиях иона в диапазоне 5-10 до 50-100 эВ.

Характерная кривая энергетической зависимости коэффициента распыления от энергии ионов приведена на рис. 9.

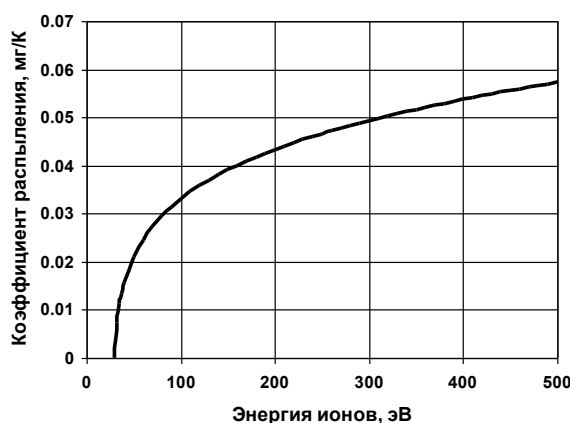


Рисунок 9 – Типичная зависимость коэффициента распыления от энергии ионов.

Как отмечалось выше, процесс распыления начинается, когда энергия ионов превышает пороговую энергию распыления. С помощью весьма чувствительных методов измерения коэффициента распыления было экспериментально установлено, что при энергии ионов 3...30 эВ коэффициент распыления не равен нулю и составляет $10^{-4}...10^{-5}$ атом/ион. Пороговая энергия распыления E_{th} зависит от массы иона и атома мишени, энергии связи атома с поверхностью твердого тела, которая определяется теплотой сублимации вещества U_0 .

Если предположить, что атом распыляется в результате передачи ему импульса и энергии от налетающего иона, то пороговую энергию распыления можно определить по формуле [12]:

$$E_{th} = U_0 / (1 - \gamma) \gamma, \quad (44)$$

где

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (45)$$

где M_1 – масса первичных частиц; M_2 – масса атомов мишени.

По экспериментальным данным пороговая энергия распыления металлов ионами Ag^+ , Kg^+ , He^+ составляет 10...30 эВ.

При увеличении энергии ионов от E_{th} до 50-100 эВ происходит быстрый рост коэффициента распыления от 10^{-4} до 10^{-1} . При дальнейшем

увеличении энергии ионов рост коэффициента распыления замедляется, достигает максимума и затем начинает уменьшаться.

Энергетическая зависимость коэффициента распыления в области энергий 0.1...1 кэВ хорошо исследована и в первом приближении является линейной. При увеличении энергии выше 1 кэВ зависимость от энергии становится более полой и до максимума коэффициента распыления может быть аппроксимирована функцией \sqrt{E} . Дальнейший ход кривой распыления связан с уменьшением выхода распыленных частиц, поэтому с ростом энергии коэффициент распыления плавно снижается (рис.1).

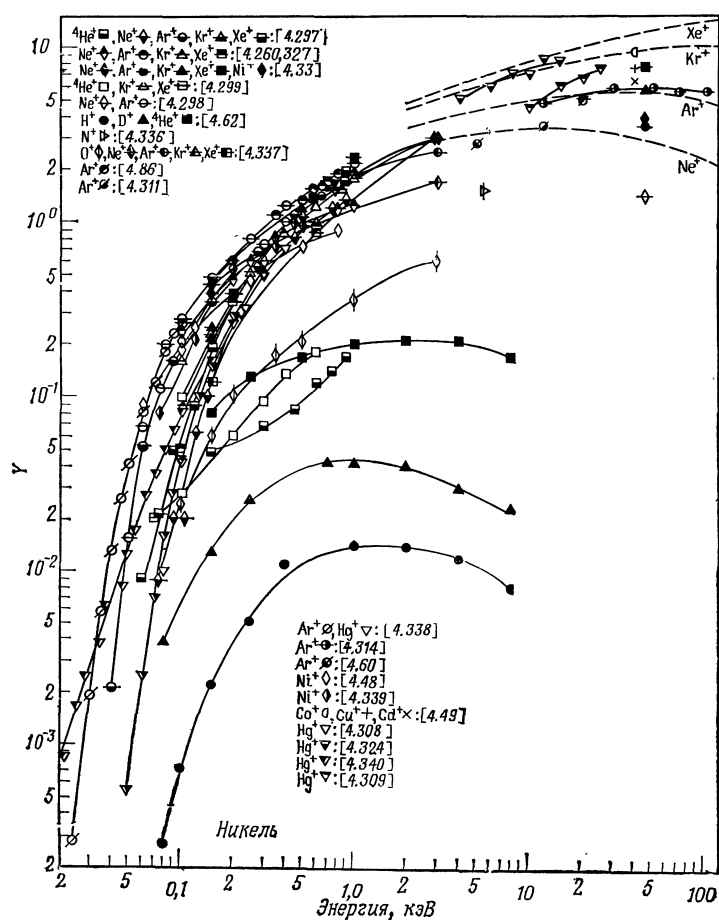


Рис. 4.14. Экспериментальные значения коэффициентов распыления Ni.

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента распыления никеля от энергии ионов

Из этого рисунка видно, что для легких ионов (водород, дейтерий) максимум коэффициента распыления достигается при энергиях около 0.5-1 кВ. Для тяжелых ионов (ксенон, криптон) линейная максимум находится в

области 100 кВ. Известно правило – «энергия, соответствующая максимуму коэффициента распыления, численно равна атомной массе иона».

Этот эффект связан с прониканием ионов на большую глубину и уменьшением вероятности выхода вторичных ионов, выбитых на большой глубине. Энергия, соответствующая максимальному значению коэффициента распыления (при нормальном падении ионов), увеличивается по мере увеличения атомной массы бомбардирующих ионов.

Для ксенона, наиболее широко применяемого в современных ЭРД, значения E_{max} для 58 элементов таблицы Менделеева находятся в диапазоне 190-500 кэВ, что намного превышает энергию ионов СПД и ПИД. Для ионов аргона диапазон энергий составляет 18-120 кэВ, что также значительно выше энергии ионов указанных типов ЭРД. Исходя из этого можно заключить, что для большинства современных ЭРД, включая ионные двигатели, коэффициент распыления материалов при бомбардировке ускоренными ионами струй этих двигателей является монотонно возрастающей квазилинейной функцией энергии, а для низкоэнергетических ионов струи (вблизи порога распыления) – экспоненциальной или степенной.

Подробный обзор наиболее известных полуэмпирических моделей ионного распыления дан в работах [123,127]. Как уже отмечалось, большое разнообразие теорий обусловлено их относительно небольшой точностью и ограниченной областью применения. Для большинства инженерных задач ошибки прогноза не должны превышать 15-20% в широком диапазоне изменения параметров этого процесса. Однако существующие теории обеспечивают точность на уровне 30-40%, а в некоторых случаях ошибка составляет более 100%.

Классическая теория Зигмунда, опубликованная в 1969 г, дает для области энергий менее 1 кэВ при падении ионов по нормали к поверхности следующую формулу для расчета коэффициента распыления:

$$Y = (3/4\pi^2)\alpha T_m / U_0 = 0.076\alpha T_m / U_0, \quad (46)$$

где

$$T_m = E \cdot \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (47)$$

α – коэффициент, зависящий от отношения M_1/M_2 , угла падения иона и его энергии.

Для бериллия, кремния, хрома, никеля, германия, родия, палладия, серебра, иридия, платины и золота получено хорошее соответствие формулы (7.24) с экспериментальными данными. Но для титана, ванадия, цитрония, ниобия, гафния, тантала, тория и урана измеренные значения оказались почти в два раза меньше расчетных.

Одной из наиболее точных теорий распыления, позволяющей проводить инженерные расчеты, является теория Ю.А.Рыжова и И.И.Шкарбана. Для вычисления коэффициента распыления в ней используются следующие соотношения:

$$Y = 0.26(\Delta E / U_0)^{1.4} \left[1 - B \cdot \exp(-0.1\lambda N^{1/3}) \right], \quad (48)$$

где

$$\Delta E = \pi^2 A_\phi N m / (m + 1)^2, \quad (49)$$

где ΔE – средняя переданная в слое вещества энергия, рассчитанная при использовании потенциала О.Б.Фирсова для описания взаимодействия между атомами, A_ϕ – константа в потенциале Фирсова:

$$A_\phi = \frac{3.05 \cdot 10^{-16} Z_1 Z_2}{(Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{2/3}} N^{2/3}, \quad (50)$$

$m = M_1 / M_2$, λ – средняя длина свободного пробега в веществе:

$$\lambda = (\pi R_B^2 N)^{-1}, \quad (51)$$

где R_B – радиус взаимодействия по модели твердых сфер с использованием экранированного потенциала; $B = m^{-0.135}$.

Из формулы (7.26) получается выражение для максимального коэффициента распыления, которое, однако, не обязательно является реально достижимым

$$Y_m = 0.26 \Delta E / U_0^{1.4} \quad (52)$$

Сравнение расчетных значений Y/Y_m с экспериментальными данными различных авторов для 60 комбинаций ион-атом мишени показало, что расхождение между теорией и экспериментом находится в пределах $\pm 16\%$.

Одной из наиболее интересных и практически значимых для задач анализа эрозионного воздействия ЭРД на КА является теория Дж. Богданского; Дж. Рота и Х. Бая. Эта теория работает в диапазоне энергий ионов от 0 до $E/E_{th} < 20$ с учётом отражения ионов от поверхностей металлов и карбидов:

$$Y = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot M_2 \gamma_m^{5/3} E'^{1/4} (1 - 1/E')^{3/2}, \quad E' < 20 \quad (53)$$

$$E' = E/E_t$$

$$E_t = U_0 / \gamma_m (1 - \gamma_m) \quad M_1/M_2 \leq 0,3$$

$$E_t = 8U_0 / (M_1/M_2)^{2/3} \quad M_1/M_2 > 0,3$$

$$\gamma_m = 4M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2$$

Эта формула хорошо описывает зависимость $Y(E)$ для 11 металлов, графита, кремния, карбидов B₄C; SiC; TaC; WC, облучаемых ионами H⁺; D⁺; He⁺; Ne⁺; Ar⁺; Xe⁺ для 250 комбинаций ион-материал. В диапазоне энергий $1 < E' \leq 20$ для указанного соотношения масс иона и атома мишени совпадения с экспериментальными данными составляет примерно 2.

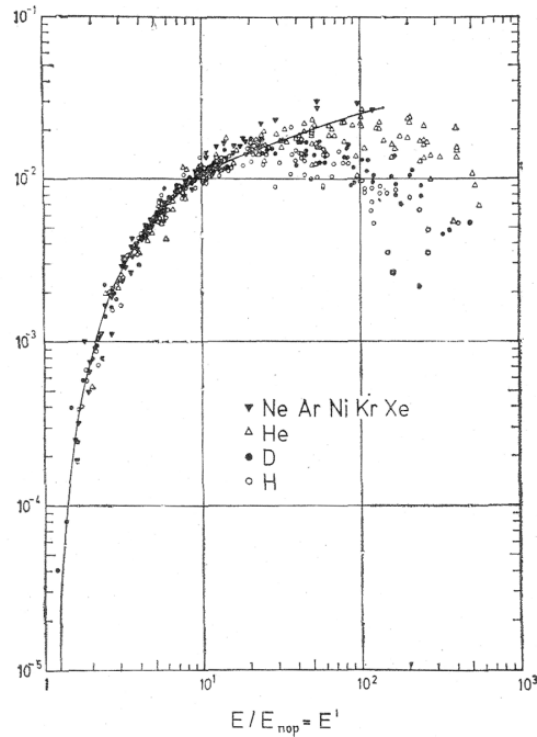


Рисунок 1 – Зависимость нормированных коэффициентов распыления ионами низких энергий от нормированной энергии ионов $E' = E / E_t$.

И хотя абсолютная точность этой теории относительно невысока, она дает удивительно хорошее качественное согласие с экспериментом в диапазоне умеренных энергий ионов (до $(10 \div 50)E_{th}$). В связи с этим соотношение (1) может быть использовано для аппроксимации имеющихся в литературе или новых экспериментальных данных. Наиболее универсальная аппроксимирующая формула имеет вид:

$$S(E) = S_0 \cdot \left(\frac{E}{E_{th}}\right)^a \left(1 - \frac{E_{th}}{E}\right)^b, \quad (54)$$

где S_0 , a , b – коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Ряд других теорий, рассмотренных в работе [27], обладает существенно меньшей точностью (ошибка в вычислении коэффициента распыления может достигать 100-200%), оперирует более сложными соотношениями и большим количеством параметров.

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов θ имеет характерный максимум в области углов падения $50...60^\circ$, а при больших углах быстро уменьшается (рис. 10).

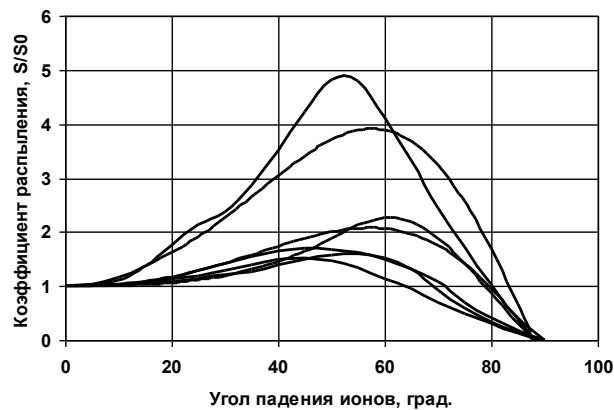


Рисунок 10 – Типичные кривые зависимости коэффициента распыления от угла падения ионов.

Увеличение коэффициента распыления по мере увеличения угла падения ионов связано с тем, что каскад столкновений развивается ближе к поверхности материала и в результате чего вероятность выхода распыленных частиц увеличивается. Максимум коэффициента распыления обычно достигается при углах падения $55...60^\circ$, после этого коэффициент распыления быстро падает и достигает нуля при угле падения 90° . Падающая зависимость в области больших углов обусловлена быстрым ростом коэффициента отражения при приближении к направлению скользящего падения. К сожалению, никаких более определенных закономерностей нельзя заметить в имеющихся экспериментальных данных, зачастую противоречащих друг другу.

Теория Зигмунда дает следующее выражение для зависимости коэффициента распыления от угла падения (для углов менее $50-60^\circ$):

$$S(\theta) = S(0) / \cos^f \theta . \quad (55)$$

Показатель степени $f = 1,7 \dots 1,0$ для $M2/M1 = 0,1 \dots 10$. При $M2/M1 = 1$ $S(\sim 60^\circ) = (4,5 \dots 6,0) S^{(0)}$. Для случая $M2/M1 = 0,1 \dots 0,6$ теория не дает однозначного ответа.

Для многих материалов наблюдается существенное влияние дозы Φ на коэффициент распыления (рис. 11).

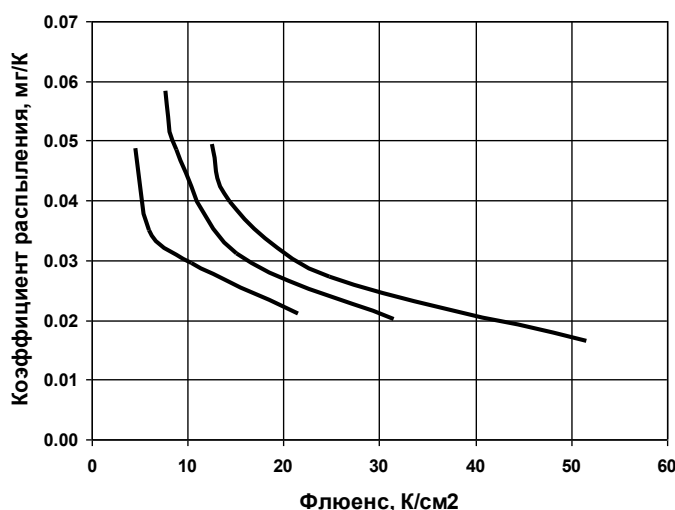


Рисунок 11 – Типичные кривые изменения коэффициента распыления по времени, характеризующие влияние ионного флюенса

Особенно сильно влияние дозы проявляется у керамик, эмалей и органических материалов. У этих материалов наблюдается постепенное снижение коэффициента распыления по сравнению с начальным значением. Изменение коэффициента распыления в начальный период объясняется тем, что в это время уносится поверхностный слой, измененный в процессе обработки. Для металлов характерно постепенное увеличение коэффициента распыления, обусловленное удалением оксидной пленки с поверхности материала. Стабилизация наступает при достижении дозы падающих ионов $\Phi = 100-200 \text{ Кл/см}^2$ (такие дозы реализуются в первые $10 \div 100$ часов работы ЭРД в лабораторных условиях и при значительно больших временах в условиях летной эксплуатации КА). Следует отметить, что при относительно небольшой интенсивности потока ионов влияние дозы является следствием начального состояния и процессов изменения состояния поверхностных слоев материала и однозначно связано с глубиной распыления. Поэтому при

решении инженерных задач вместо влияния дозы правильнее рассматривать влияние глубины распыления материала. И только при высокой интенсивности потока, когда возможны коллективные эффекты в поверхностном слое (режим тепловых пиков), необходимо рассматривать именно величину ионного флюенса, а не глубины распыления.

Общим выводом из результатов поиска аналитических моделей было подтверждение тезиса о их недостаточной точности для прогнозирования характеристик распыления большинства материалов. Естественным выходом из этой ситуации являлось создание численных моделей распыления, рассматривающих этот процесс на микроуровне. Исчерпывающий обзор таких моделей дан в работе [166].

Численные расчеты коэффициентов распыления дают вполне удовлетворительное согласие с экспериментом для многих простых веществ, в частности, для никеля, кремния и т.п. Есть менее удачные результаты, относящиеся к углероду и благородным металлам, выполненные при использовании одного и того же потенциала взаимодействия, одной и той же модели неупругих потерь и соответствующих энергий связи.

Одними из наиболее часто упоминаемых компьютерных программ являются программы TRIM.SP и программа динамического моделирования TRIDYN. Упоминается также программа, разработанная в Московском энергетическом институте ИАМ, позволяющая моделировать процессы диффузии и сегрегации, сопровождающие процесс распыления.

Численные методы позволяют детально изучить процессы ионного распыления, получить данные о составе поверхностных слоев материала, динамике процесса, исследовать зависимости выхода частиц от параметров соударения. В то же время для проведения этих расчетов необходима исчерпывающая информация о физических свойствах материала, его структуре, потенциалах взаимодействия и т.п. Все это осложняет использование компьютерных программ для расчета коэффициентов

распыления реальных органических и композиционных материалов, используемых в космической технике.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Большое количество и относительно невысокая точность разработанных моделей распыления, говорит о том, что все они, по сути, являются частными моделями, справедливыми в узком диапазоне параметров взаимодействия. Причем не только тех параметров, которые используются в моделях, но и тех, которые в моделях не учтены или приняты постоянными. Напрашивается вывод о том, что при увеличении количества параметров модели возрастает ее противоречивость, поэтому наилучшие результаты дают относительно простые модели с небольшим количеством параметров. Попытки учета большего количества параметров приводят к экспоненциальному росту сложности модели, что делает ее малоприменимой для практического использования. Кроме того, по мере усложнения модели и учета микроскопических параметров частиц газа и мишени, возрастает неопределенность в исходных данных, требующая дополнительных экспериментальных измерений.

В задачах анализа эрозионного воздействия струй ЭРД на КА, как правило, применяют простые полуэмпирические соотношения, значения коэффициентов в которых определяют из эксперимента. Если необходимые экспериментальные данные отсутствуют коэффициенты распыления оценивают по приведенным выше формулам, но если результаты расчетов с этими коэффициентами дают уровни эрозии близкие к допустимым значениям (с учетом возможной погрешности моделей), проводят экспериментальные исследования и повторяют расчеты.

Плотность потока частиц распыления рассчитывается по формуле:

$$(nv)_s = \frac{j_i}{e} Y(E, \theta) \cos(\theta), (1/\text{м}^2/\text{с}). \quad (56)$$

Скорость эрозии:

$$\delta = (nv)_s \frac{m_1}{\rho}, (\text{м}/\text{с}). \quad (57)$$

Глубина эрозии за время работы двигателя τ (в течение всего срока активного существования КА):

$$h = \delta \cdot \tau, (\text{м}) \quad (58)$$

Расчет провести для основных материалов БС (углерод, алюминий, полиимид, медь, золото, серебро, стекло). Характеристики распыления взять из *Приложения А*. Время работы двигателя задать равным $\tau = 2000$ часов. Значения параметров записать в таблицу для каждой узловой точки в соответствующей размерности.

Таблица 4 – Глубина эрозии материалов СБ в различных точках поверхности

№ точки	h_i , мкм							
	АМГ6	Углепла стик	Стекло	Серебро	Золото	Медь	Олово	Полиим ид
1								
2								
...								
12								

Обозначения:

h_i – глубина эрозии (мкм);

Примечание: Расчет глубины эрозии производить в параметрической форме так, чтобы можно было изменяя угол установки СПД α_D автоматически получать новые значения h_i .

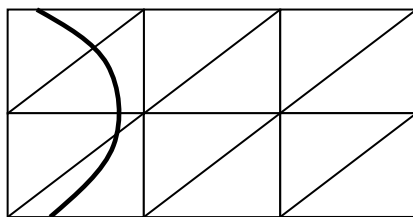
Допустимые значения глубины эрозии различных материалов:

№ п.п.	Элемент конструкции	Материал	Толщина, мкм	$h_{\text{доп.}}$	Примечание
1	Защитное стекло	Стекло	150	10	Уменьшение светопропускания не более 2%
2	Межсоединители	Серебро	20	10	Разрушение при длительном термоциклировании
				20	Разрыв цепи
3	Межсоединители	Золото	20	10	Разрушение при длительном термоциклировании
				20	Разрыв цепи
3	Межсоединители	Медь	50	25	Разрушение при длительном термоциклировании
4	Каркас	Углерод	>1000	15	Разрыв углеволокон при термоциклировании или при полном распылении
5	Защитная пленка, изоляция проводов	Полиимид	50	25	Разрушение при термоциклировании
6	Элементы конструкции	Алюминий	>1000	500	Изменение прочностных характеристик
7	Места пайки	Олово	50	25	Разрушение при распылении и термоциклировании

Проверка критичности эрозионного воздействия производится по условию:

$$h_{\text{макс.}} \geq h_{\text{доп.}}$$

Если это условие выполняется, построить изолинию критического воздействия струи $h = h_{\text{макс.}}$. Для этого прямоугольные конечные элементы разделить на два треугольных. На каждом треугольнике найти точки (если таковые имеются), соответствующие h . Провести изолинию $h = h_{\text{макс.}}$ (отрезками прямых линий или сплошной гладкой кривой) через найденные точки.



Сформировать заключение (вывод) о стойкости элементов конструкции к эрозионному воздействию струи по результатам расчетов.

7. Расчет загрязняющего воздействия

Под *загрязняющим воздействием* струй ЭРД на КА подразумевают осаждение на функциональных поверхностях КА тонких пленок, образованных продуктами распыления материалов внешних поверхностей КА или элементов конструкции самого двигателя. Результатом такого воздействия является изменение оптических и электрических свойств функциональных поверхностей КА, таких, например, как терморегулирующие покрытия, элементы оптики, защитные стекла солнечных батарей.

Основным параметром загрязняющего воздействия является поверхностная плотность осажденного вещества m_c [г/см²], а также состав пленки (в % массы). При этом особенно важно учесть содержание металлов в пленке, поскольку они приводят к более сильным изменениям оптических свойств поверхности, чем неметаллические продукты осаждения.

Критерием стойкости КА к загрязнению является выполнение условия:

$$m_c \leq m_{lim}, \quad (1)$$

где m_{lim} – предельно допустимая поверхностная плотность пленки загрязнения заданного состава для данной функциональной поверхности.

Величина m_{lim} определяется исходя из допустимого изменения свойств функциональной поверхности (обычно, не более 10% номинального значения) для заданного состава пленки и типа поверхности. Величина m_{lim} составляет $10^{-7} \dots 10^{-5}$ г/см² в зависимости от состава.

(в процессе...)

8. Индивидуальные задания

При выполнении данного раздела КР от студентов требуется самостоятельная разработка методики расчета (ставится задача, но как ее решить не описывается).

1. Оценить запасы топлива двигателей стабилизации, необходимые для компенсации возмущающих моментов;
2. Оценить запасы топлива двигателей коррекции, необходимые для компенсации возмущающих усилий (потерь тяги);
3. Оценить смещение двигателя коррекции для компенсации возмущающих усилий и моментов;
4. Исследовать влияние угла расходимости струи двигателя коррекции на величины возмущающих усилий и моментов;
5. Исследовать влияние угла расходимости струи двигателя коррекции на уровень эрозионного воздействия;
6. Исследовать влияние угла расходимости струи двигателя коррекции на уровень загрязняющего воздействия;
7. Выбрать угол отклонения двигателя коррекции (от оси вращения панели СБ), при котором тепловое воздействие струи на панели БС не превышает допустимого значения;
8. Выбрать угол отклонения двигателя коррекции (от оси вращения панели СБ), при котором уровень эрозии панели БС не превышает допустимого значения.

