

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ОЦЕНКА МЕТЕОРНО- ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Учебное пособие

Под редакцией чл.-корр. РАН Д.И. Козлова

САМАРА 2004

Куренков В.И., Лукашев Л.Г., Юмашев Л.П. Оценка метеорно-техногенной опасности полета космического аппарата: Учеб. пособие/ Под редакцией чл.-корр. РАН Д.И. Козлова. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. 70 с.

ISBN 5-7883-0287-0

Представлены теоретические основы расчета вероятности не-пробоя оболочки КА метеорными и техногенными частицами. Эта вероятность может быть использована для оценки проектируемого КА с точки зрения безопасности этого аппарата. Приведены теоретико-экспериментальные материалы, на основании которых разработаны математические модели метеорного и техногенного окружений КА, методики построения математических моделей поверхности КА и вычисления вероятности непробоя поверхностей КА метеорными и техногенными частицами. На основании этих моделей разработана программа для ЭВМ. Дана модель вычисления числа пробоев за время активного существования КА и степени эрозии оптических поверхностей.

Пособие может быть использовано при выполнении курсовых и дипломных проектов по проектированию КА, а также при проектировании новых и оценке уже спроектированных КА. Подготовлено на кафедре "Летательные аппараты".

Табл. 20.

Ил. 20.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Огарков В.Ф.
канд. техн. наук, доц. Кучеров А.С.

ISBN 5-7883-0287-0

© В.В. Куренков, Л.Г. Лукашев,
Л.П. Юмашев, 2004.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2004.

	Стр.
Введение	4
1. МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННОЕ ОКРУЖЕНИЕ КА	6
1.1. Модель метеорного окружения	6
1.2. Модель техногенного окружения	8
2. СОУДАРЕНИЕ ВСМЧ С ПРЕГРАДАМИ	10
2.1. Соударение с одиночной плотной преградой	10
2.2. Соударение с пористой преградой	12
2.3. Соударение с многослойной преградой	13
2.4. Определение дюралевого эквивалента преграды	16
3. ГЕОМЕТРИЯ ОТСЕКОВ КА	17
3.1. Геометрия примитивов	17
3.2. Преобразование координат при повороте КА	21
4. КОНСТРУКЦИЯ ОБОЛОЧЕК ОТСЕКОВ КА	22
4.1. Защита оболочек КА от опасного воздействия на них ВСМЧ	23
5. РАЗБИЕНИЕ ОБОЛОЧЕК КА НА ЭЛЕМЕНТЫ	25
5.1. Разбиение плоского четырехугольника	25
5.2. Разбиение боковой поверхности тела вращения	27
6. ВЕРОЯТНОСТЬ НЕПРОБОЯ ОБОЛОЧЕК КА	31
6.1. Определение поправочного коэффициента k_j	32
6.2. Определение расчетной толщины δ	35
6.3. Определение расчетной площади элемента поверхности F_j	35
6.4. Определение числа пробоев метеорными частицами	35
6.5. Определение числа пробоев техногенными частицами	37
6.6. Определение площади экранирования одного элемента другим	37
7. КОНТРОЛЬ	39
7.1. Список применяемых материалов	40
7.2. Геометрические данные отсеков	40
7.3. Данные по конструкции оболочек	41
7.4. Графический контроль	41
7.5. Контроль на этапе счета	43
7.6. Иллюстрация уязвимости	43
7.7. Результаты расчета вероятности непробоя оболочек КА	44
8. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ	44
8.1. Определение числа пробитых отверстий в тонкой оболочке	45
8.2. Запас газа для наддува оболочки	46
8.3. Определение степени эрозии поверхности отсека	47
9. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ	49
10. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ НЕПРОБОЯ КА	53
10.1. Исходные данные КА	53
10.2. Порядок расчета	53
10.3. Последующие расчеты для оценки МТОПКА	59
<i>Список использованных источников</i>	66

На космические аппараты(КА) в космосе воздействует окружение, сильно отличающееся от земного. Это - вакуум, различного рода излучения, метеорное вещество, техногенные частицы и пр. При проектировании КА задаются проектные параметры (допустимая вероятность непробоя оболочек отсеков и КА целиком, допустимая площадь эрозии поверхностей, время жизнедеятельности отсека с газом, если оболочка отсека получила несколько пробоев, а сам отсек имеет систему наддува и т.п.). Оценка опасности полета заключается в сравнении значений параметров, полученных расчетным путем, с заданными в проектной документации.

Настоящее учебное пособие посвящено оценке опасности полета КА в метеорно-техногенном окружении. В табл. 1 даны примеры сравнений опасности полета при различных параметрах повреждения.

Таблица 1

Примеры повреждения

Параметр повреждения	Оценка опасности
1. Пробой оболочки отсека	КА выходит из строя, если отсек герметичен; - факт пробоя игнорируется, если отсек к пробоям безразличен
2. Отсек получил несколько пробоев	- см.п. 1; - при наличии системы наддува (или без нее) КА выходит из строя, если давление в отсеке станет меньше допустимого
Поверхность отсека покрылась эрозией	площадь поверхности, покрытой эрозией, такова, что работоспособность резко ухудшится

В пособии даются методики вычисления повреждений, перечисленных в табл. 1. Все эти методики объединяются **в главной математической модели**, которая, в свою очередь, состоит из следующих частных математических моделей:

- **модель метеорного окружения;**
- модель техногенного окружения;**

- модель взаимодействия высокоскоростных механических частиц (ВСМЧ) с преградами;
- модель описания геометрии оболочек КА;
- модель конструкции оболочек и защита их от воздействия метеорных и техногенных частиц;
- модель определения вероятности непробоя оболочек КА;
- модель оценки метеорно-техногенной опасности полета КА;
- модель оценки возможности эксплуатации КА, имеющего несколько пробойн;
- модель оценки степени эрозии поверхности оболочек КА.

Основываясь на положениях, изложенных в моделях, составлены три связанных между собой программы для ЭВМ на языке ПАСКАЛЬ:

- UMMT3_1.EXE Ввод исходных данных КА;
- UMMT3_2.EXE - Контроль ИД и вывод их на экран и принтер;
- UMMT3_3.EXE Расчет вероятности непробоя КА метеорными и техногенными частицами и выдача схемы уязвимости оболочек КА.

Представлены описание последовательности выполняемых расчетных операций и пример расчета КА.

Содержание пособия основано на документации, указанной в списке источников, и на результатах теоретико-экспериментальных работ в лаборатории ОНИЛ-17 при кафедре “Летательные аппараты” СГАУ и на предложениях, касающихся модели метеорного окружения, принятых на сессии COSPAR (Committee Of SPAsE Research).

Содержание и полнота изложенного материала контролировались профессором кафедры ЛА Лукашевым Л.Г., написание, отладка программы и работа над текстом пособия осуществлялись профессором кафедры ЛА Куренковым В.И. и доцентом кафедры ЛА

Юмашевым Л.П.

1. МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННОЕ ОКРУЖЕНИЕ КА

Физическая модель метеорного вещества описана в / 1 /, а техногенного окружения в / 3 /.

Сударение с метеорными и техногенными частицами происходит случайным образом, поэтому вычисление главного показателя - вероятности непробоя оболочки КА - проводится с использованием закона Пуассона, который имеет вид

$$P_{\text{нп}} = e^{-N},$$

где N - число пробоев оболочек КА метеорными и техногенными частицами за весь срок активного существования.

Этот показатель сходен с надежностью КА, что подтверждается случаем из практики эксплуатации КА - наблюдения, когда из ста запущенных КА с $P_{\text{нп}} = 0,98$ вышло из строя 3 (из-за пробоя трубок на НХР).

1.1. Модель метеорного окружения

Модель метеорного окружения использует следующие положения:

1.1.1. Метеорное вещество состоит из метеорных частиц, которые можно разделить на две большие группы:

- спорадические метеорные частицы, т.е. такие частицы, направление и скорость подхода которых к Земле непредсказуемы, но лежат в определенных пределах;

метеорные частицы, принадлежащие потокам (поточные частицы), для которых известны и радиант, и скорость подлета к Земле. Этих частиц значительно меньше общего потока метеорных частиц. Поэтому в модели метеорного окружения принято, что на КА действуют только спорадические метеорные частицы, а воздействие потоков учитывается изменением соответствующих коэффициентов в модели окружения.

1.1.2. Метеорные частицы компактны и имеют плотность $\rho_0 = 2,5 \text{ г/см}^3$. Исследования некоторых ученых указывают, что в метеорном веществе есть частицы, у которых $\rho_0 = 0,05 \text{ г/см}^3$ и $7,8 \text{ г/см}^3$, но такие частицы встречаются крайне редко.

1.1.3. Скорость подхода метеорной частицы к точке встречи с КА, в соответствии с рекомендацией COSPAR, $V_0 = 20 \text{ км/с}$. Это наиболее вероятная скорость подлета. Хотя эта скорость может лежать в пределах $3 < V_0 < 90 \text{ км/с}$.

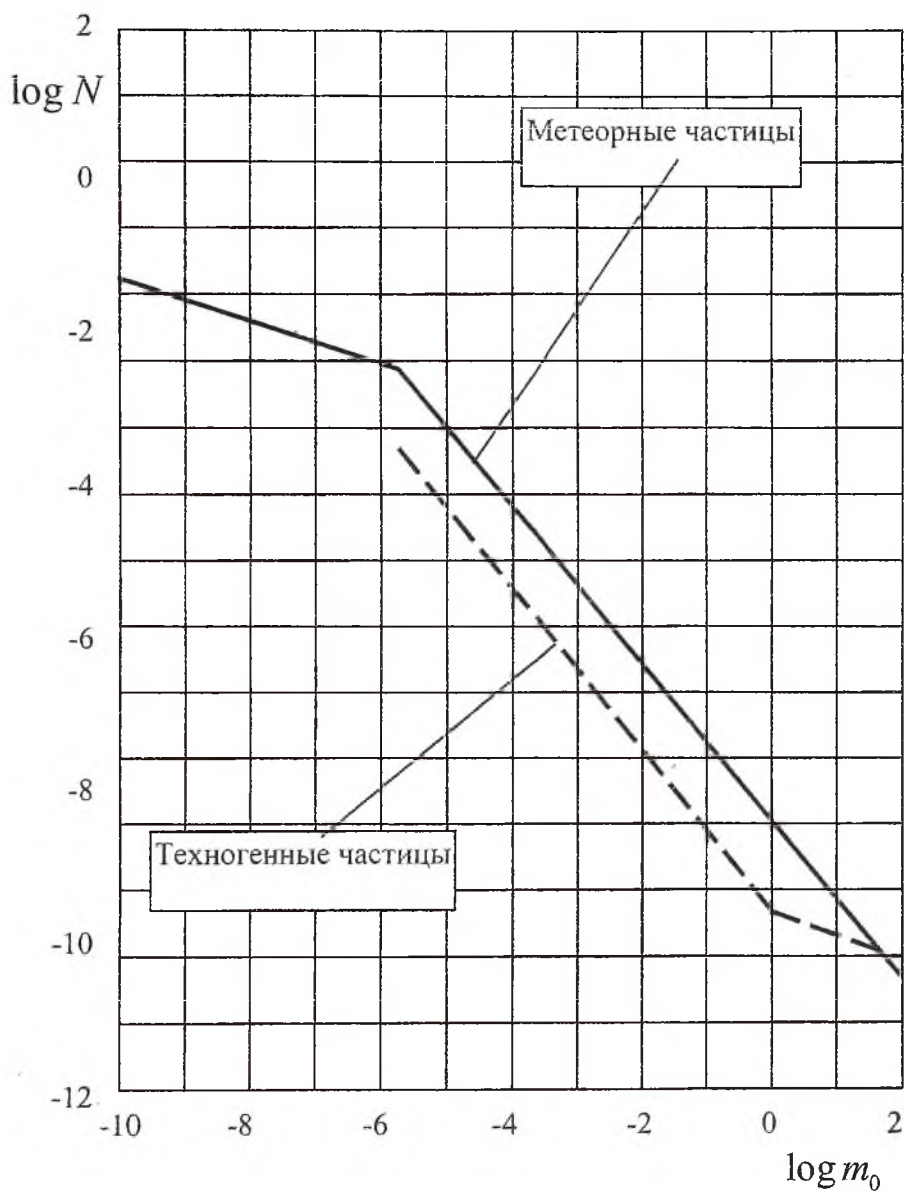


Рис. 1. Интегральный закон распределения метеорных и техногенных частиц по массам

1.1.4. Интегральный закон распределения метеорных частиц по массам с учетом наличия потоковых метеорных частиц имеет вид

$$N = A_M \cdot m_o^{-S}$$

или

$$\log N = \log A_M - S \cdot \log m_o \quad (\text{пробоев}/(\text{м}^2 \cdot \text{сутки})),$$

где m_o - расчетная масса, г;

для $\log m_o > -5,75$: $\log A_M = -10,1$, $S = 1,2$;

для $\log m_o \leq -5,75$: $\log A_M = -5,5$, $S = 0,4$.

Интегральный закон формулируется следующим образом:

N - это число частиц, масса которых больше m_o , проходящих через единицу площади за единицу времени.

На рис.1 показан интегральный закон распределения метеорных частиц по массам в логарифмических координатах.

1.1.5. Число частиц, способных пробить оболочку КА, вычисляется по приближенной формуле

$$N = A_M \cdot \sum_{j=1}^{n_{эл}} k_j \cdot \delta^{-3S} \cdot T \cdot F_j \quad (\text{пробойн}),$$

где A_M - коэффициент из закона распределения метеорных частиц по массам;

j - номер элемента поверхности;

$n_{эл}$ - число элементов, на которые разбита поверхность КА;

k_j - поправочный коэффициент (см. далее);

δ - толщина оболочки, изготовленной из Д16АТ, см;

S - показатель степени из интегрального закона распределения метеорных частиц по массам;

T - активный срок существования КА, сутки;

F - площадь элемента поверхности, м^2 .

1.2. Модель техногенного окружения

Техногенные частицы (man-made) появились вместе с началом освоения космоса человеком. Это и продукты сгорания ракетных двигателей, и льдинки топлива при включении-выключении микроЖРД, и фрагменты КА при санкционированном или несанкционированном взрыве КА и пр. Большая часть техногенных частиц движутся по орбитам, близким к круговым. Это объясняется тем, что если при взрыве КА его фрагменты приобретают

дополнительную скорость, то только те из них остаются на круговой орбите, которые при векторном сложении со скоростью КА имеют круговую скорость, или близкую к ней, а остальные входят в плотные слои атмосферы и сгорают. Все орбиты техногенных частиц находятся в почти сферических оболочках. Эти оболочки расположены в виде слоев по высоте.

Расчетная модель техногенного окружения, опирающаяся на ГОСТ Р В 25645.164-97, имеет следующие предположения:

1.2.1. Техногенные частицы, наиболее опасные для КА, – это фрагменты разрушенных КА.

1.2.2. Плотность техногенных частиц $\rho_o = 2,7 \text{ г/см}^3$.

1.2.3. Скорость подхода техногенной частицы к точке встречи с КА равна $V_o = 8 \text{ км/с}$.

1.2.4. Интегральный закон распределения техногенных частиц по массам имеет следующие коэффициенты:

$$N = A_T \cdot m_o^{-S},$$

или

$$\log N = \log A_T - S \cdot \log m_o, \text{ (пробоев/(м}^2 \cdot \text{сутки))},$$

где m_o - расчетная масса, г;

для $\log m_o > -5,75$: $\log A_T = -11,1$, $S = 1,2$;

для $\log m_o \geq 5,75$: $\log A_T = -6,37$, $S = 0,4$.

На рис.1 интегральный закон концентрации техногенных частиц показан пунктирной линией. Размерность m_o на рис.1 дана в г, а N - частиц/м² · сутки.

1.2.5. Число частиц, способных пробить оболочку КА, вычисляется по приближенной формуле

$$N = A_T \cdot \sum_{j=1}^{n_{\text{Эл}}} k_j \cdot \delta_j^{-3 \cdot S} \cdot F_j \cdot T \cdot k_i \cdot \rho_h \cdot k_t \quad (\text{пробоев}),$$

где A_T коэффициент из закона распределения техногенных частиц по массам;

k_i - коэффициент учета наклона орбиты КА,

$k_i = 1 + 7,5 \sin i$;

i - наклонение орбиты КА;

ρ_h коэффициент нормированной концентрации техногенных частиц,

$$\rho_h = \sum_{i=1}^{i=2} a_i \cdot \exp\left(\frac{(H - H_i)^2}{2 \cdot \sigma_i^2}\right),$$

где H — высота орбиты, км;

$$a_1 = 0,28;$$

$$a_2 = 0,175;$$

$$H_1 = 950 \text{ км};$$

$$H_2 = 1450 \text{ км};$$

$$\sigma_1 = 120 \text{ км};$$

$$\sigma_2 = 80 \text{ км}.$$

k_t — коэффициент, учитывающий год (t), когда будет эксплуатироваться КА,

$$k_t = 1,2 + 0,4 (t - 2000).$$

Все остальные коэффициенты приняты такими же, как и для метеорного окружения.

1.2.6. Все закономерности, описывающие соударение техногенной частицы с преградой, приняты такими же, как и для метеорных частиц.

2. СОУДАРЕНИЕ ВСМЧ С ПРЕГРАДАМИ

Для того чтобы оценить опасность полета КА, необходимо знать не только характеристики аппарата, но и то, что произойдет, если ВСМЧ столкнутся с преградами, которыми могут быть оболочки отсеков этого аппарата. Метеорные и техногенные частицы по отношению к КА являются высокоскоростными механическими частицами, т.к. соударение КА с ними происходит со скоростью больше скорости звука как в частице, так и в преграде.

Результат соударения с одиночной преградой зависит от характеристик частицы и преграды, а в многослойной конструкции еще и от конструкции оболочки отсека и от выбранной последовательности материалов слоев.

2.1. Соударение с одиночной плотной преградой

Соударение ВСМЧ с одиночной плотной преградой, имеющей достаточную толщину, может привести к появлению на поверхности преграды кратера, а при большей скорости и при меньшей толщине преграды — к пробое преграды. При пробое тонкой преграды частица

разрушается и за преграду летят не только осколки частицы (наибольший по размеру осколок назван “лидирующим элементом”), но и обломки преграды. Параметры частицы приняты в модели соударения в соответствии с положениями моделей метеорного и техногенного окружений. Дополнительно необходимо еще учитывать угол соударения, т.е. отклонение вектора скорости соударения от нормали к поверхности преграды. Параметры одиночной плотной преграды являются параметрами, описывающими свойства имеющегося материала.

Результаты соударения зависят от параметров частицы и преграды.

Величина относительной предельно пробиваемой толщины преграды вычисляется по формуле

$$\delta_{\text{ппотн}} = \frac{\delta_{\text{пп}}}{d_0} = 1,18 \left(\frac{\rho_0 V_0}{\sqrt{\rho_M \sigma_{\text{вм}}}} \right)^{0,38} \cos^{2/3} \psi,$$

где - $\delta_{\text{пп}}$ предельно пробиваемая толщина преграды;

- $\delta_{\text{пп отн}}$ - относительная предельно пробиваемая толщина;

- d_0 диаметр частицы;

ρ_0 - плотность частицы, г/см³;

- V_0 - скорость соударения, км/с;

- ρ_M - плотность материала преграды, г/см³;

- $\sigma_{\text{вм}}$ - временное сопротивление разрыву материала преграды, ГПа;

- ψ - угол соударения Отсчет от нормали к преграде.

Относительный диаметр лидирующего элемента вычисляют по формуле

$$d_{\text{лид.отн}} = \frac{d_{\text{лид}}}{d_0} = \exp(-3,68\eta^2 \rho_{\text{отн}}),$$

где

$$\eta = \left(\frac{72 \delta_{\text{м.отн}}}{E \delta_{\text{пп отн}}} \right)^{1/3} \quad \text{- обобщенный параметр;}$$

$$\delta_{\text{м.отн}} = \frac{\delta_{\text{м}}}{d_0} \quad \text{относительная толщина преграды;}$$

δ_m - толщина преграды;

$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_m}{\rho_0}$ отношение плотности материала преграды к плотности материала частицы;

E - модуль упругости материала преграды (модуль упругости Д16АТ равен 72 ГПа);

Скорость лидирующего элемента за преградой вычисляется по формуле

$$V_{\text{лид}} = V_0 \frac{0,9}{\sqrt{1 + 1,5\rho_{\text{отн}}\delta_{m,\text{отн}}}}$$

2.2. Соударение с пористой преградой

Соударение с пористой преградой сопровождается появлением в преграде канала, глухого или сквозного. Принято, что частица или лидирующий элемент от пробитой преграды не теряет своего направления, но тормозится и происходит ее абляция.

Движение частицы в пористой среде может быть описано системой дифференциальных уравнений, сходных с уравнениями движения шара в жидкости или газе:

$$m \frac{dV}{dt} = -C_x \rho S \frac{V^2}{2},$$

$$\frac{dx}{dt} = V,$$

где m - масса частицы, г. Для сферической частицы

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_0,$$

d - диаметр частицы, см;

ρ_0 - плотность материала частицы, г/см³;

V - скорость частицы, м/с;

t - текущее время, с;

C_x - коэффициент лобового сопротивления;

ρ плотность среды, г/см³;
 S мидель частицы, м²,

$$S = \frac{\pi d^2}{4} 10^{-4},$$

x текущая координата, м.

Это уравнение имеет решение

$$V = V_0 \exp(-0.75 C_x \rho_{\text{отн}} L / d_0),$$

где L глубина канала в преграде;

V_0 - скорость входа частицы в пористую преграду.

Если скорость $V < V_{\text{min}}$, то это соответствует останову частицы в преграде (непробой).

Если происходит пробой ($L > L_{\text{прегр}}$), то скорость выхода из преграды равна

$$V_{\text{вых}} = V_0 \exp(-0.75 C_x \rho_{\text{отн}} L_{\text{прегр}} / d_0),$$

где $L_{\text{прегр}} = \frac{\delta_{\text{прегр}}}{\cos \psi}$;

$\delta_{\text{прегр}}$ толщина преграды;

ψ - угол соударения.

В расчетах принято, что $V_{\text{min}} = 50$ м/с.

Эксперименты показывают, что в зависимости от скорости соударения имеется два участка:

первый участок, когда скорость соударения $V_0 < V_{\text{крит}}$. На этом участке чем больше скорость, тем больше глубина канала L . В этом случае величина $C_x = 1,2$;

второй участок ($V_0 > V_{\text{крит}}$) чем больше скорость, тем меньше глубина канала L . На втором участке $C_x = 1,2 + 0,12 V_0$, V_0 [км/с].

2.3. Соударение с многослойной преградой

Большинство КА имеют отсеки с многослойными оболочками, при этом слои могут быть и плотными, и пористыми. Задачей анализа таких преград является оценка преграды на пробой, т.е. определить,

пробьет ли частица весь этот пакет или будет задержана на одном из слоев.

Алгоритм оценки пробоя многослойной преграды сравнительно прост:

- вначале оценивается на пробой первый слой. Если он пробивается, то за ним летит или сама частица, или лидирующий элемент;
- затем проверяется второй слой и повторяется оценка так же, как и для первого слоя. Таким образом проверяются все остальные слои и если последний слой пробивается, то считается, весь пакет пробит.

На рис.2 приведена блок- схема анализа соударения частицы с многослойной преградой.

Описание блок-схемы:

п.1 - ввод исходных и начальных данных:

N - число слоев преграды;

p - признак пористости;

δ_i - толщина слоя;

ρ_i - плотность материала слоя;

E_i - модуль упругости материала слоя;

σ_i - прочность материала слоя - временное сопротивление разрыву;

V_o - начальная скорость частицы;

d_o - начальный диаметр частицы;

ψ - угол соударения;

п.2 - номеру слоя присвоить единицу;

п.3 - оценка пористости слоя. Если слой пористый ($p=0$), то идти к п.9;

п.4. вычисляется предельно пробиваемая толщина листа из плотного материала;

п.5. - анализ значения предельно пробиваемой толщины. Если она больше толщины слоя, то идти к п.7;

п.6. пакет "Н Е П Р О Б И Т" Идти к п.14;

п.7. вычисляется скорость и диаметр лидирующего элемента.

Они становятся начальными для последующих слоев;

п.8. - номер слоя увеличивается на единицу. Идти к п.12;

п.9. - вычисляется глубина канала в пористой преграде L ;

п.10. -анализ глубины канала. Если частица не пробивает пористый слой, то идти к п.6;

п.11. - начальному значению скорости присвоить значение скорости выхода из пористого слоя. Идти к п.8;

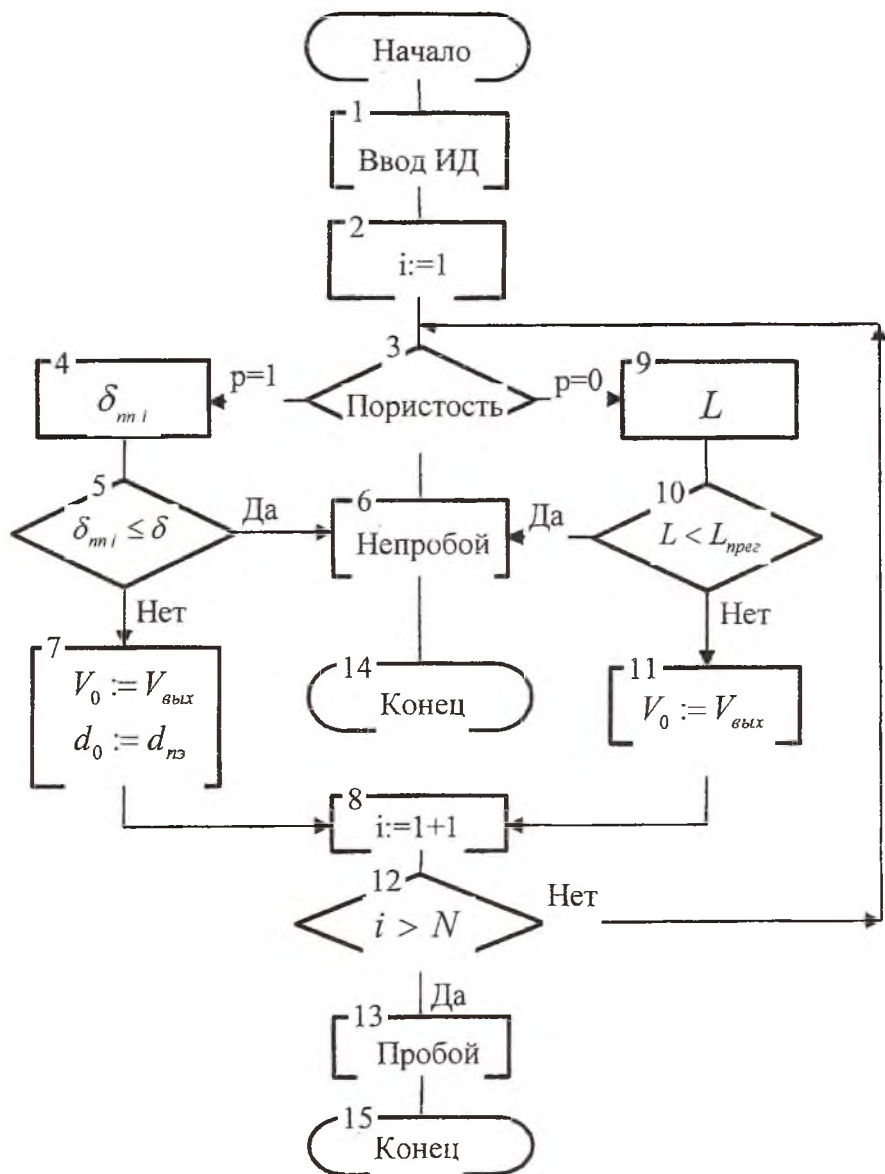


Рис.2. Блок-схема алгоритма оценки соударения ВСМЧ с многослойной преградой

п.12. - анализ номера слоя . Если слой не последний по счету, то идти к п.3;

п.13. все слои преграды “П Р О Б И Т Ы “;

п.14. - STOP. Выход из счета при непробое пакета;

п.15. STOP Выход из счета при пробое пакета.

2.4. Определение дюралевого эквивалента преграды

В разделе 1.1 приведены зависимости для определения числа пробоев элементов поверхности КА. В этих зависимостях имеется такой параметр, как толщина δ толщина пластины из Д16АТ при соударении по нормали к поверхности с известной скоростью соударения. Если материал преграды другой или преграда многослойная и происходит косое соударение, то приходится пользоваться в указанных зависимостях т.н. дюралевым эквивалентом. Под дюралевым эквивалентом понимается такая толщина пластины из Д16АТ, которая при соударении по нормали эквивалентна стойкости на пробой заданной конструкции элемента поверхности КА при заданном угле соударения.

Алгоритм определения дюралевого эквивалента заключается в следующем:

отыскивается минимальная масса метеорной частицы m_0 , способная пробить заданную конструкцию при заданном угле и скорости соударения. Этот процесс равносильен отысканию корня уравнения

$$F(m) = \begin{cases} +1, & \text{если } m > m_0, \\ 0, & \text{если } m = m_0, \\ -1, & \text{если } m < m_0. \end{cases}$$

Зная значение m_0 , находится значение d_0 ,

$$d_0 = \left(\frac{6m_0}{\pi\rho_0} \right)^{1/3}.$$

Затем определяется дюралевый эквивалент

$$\delta_{\text{экв}} = 1,18d_0 \left(\frac{\rho_0 V_0}{\sqrt{\rho_{\text{al}} \sigma_{\text{al}}}} \right)^{0,38} \cos^{2/3} \psi,$$

где $\rho_{\text{al}}, \sigma_{\text{al}}$ - плотность и временное сопротивление разрыву материала Д16АТ.

3. ГЕОМЕТРИЯ ОТСЕКОВ КА

Современные КА, как правило, состоят из соединенных между собой отсеков. Днища отсеков при этом защищены от воздействия метеорных и техногенных частиц, зато их боковые поверхности подвергаются этому воздействию. Отсеки, солнечные батареи и приборы состоят из примитивов:

плоский четырехугольник (частный вид треугольник, когда какие-либо две соседние вершины четырехугольника совпадают);

боковая поверхность тела вращения. Образующими боковой поверхности могут быть прямая линия или дуга окружности;

- параллелепипед.

Каждый из этих примитивов задается характерными точками в связанной системе координат. Как правило, ось Ox направлена по оси симметрии аппарата, а оси Oy и Oz образуют правую связку. Желательно, чтобы связанная система координат совпадала со скоростной. Тогда ось Ox совпадает с направлением полета, ось Oy - направлена в сторону зенита и ось Oz - по правому крылу (самолетная система координат). В программе расчета имеется возможность выставить КА в нужное рабочее положение, поворачивая связанные оси относительно скоростных.

Принято, что при описании геометрии все размеры задаются в метрах.

3.1. Геометрия примитивов

3.1.1. Геометрия четырехугольника

Четырехугольник задается четырьмя вершинами в связанной системе координат. При этом если смотреть на плоскость, опасную с точки зрения повреждения, то вершины должны быть расположены

против часовой стрелки. В программе есть проверка, лежат ли все вершины в одной плоскости. На рис.3 показана схема четырехугольника и треугольника.

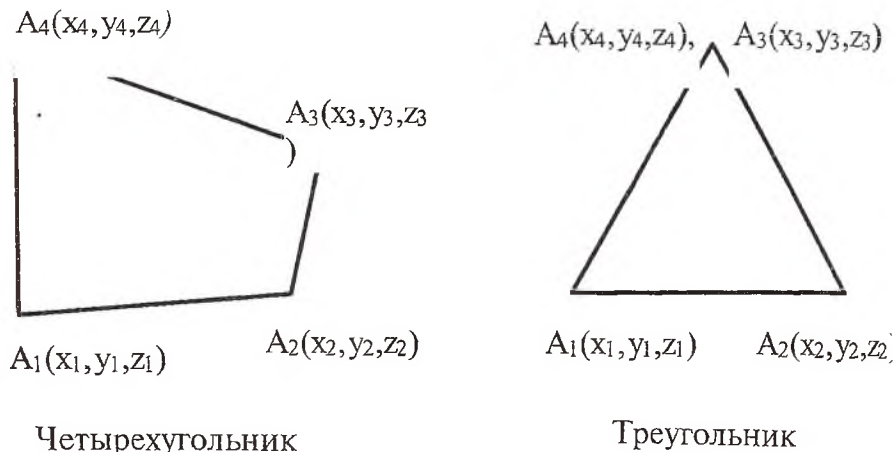


Рис.3. Схемы четырехугольника и треугольника

3.1.2. Геометрия боковой поверхности тела вращения

Боковая поверхность тела вращения или ее часть получается вращением образующей вокруг какой-либо оси. Принято, что осью вращения является ось симметрии отсека. Образующей может быть прямая линия или дуга окружности.

Боковая поверхность тела вращения задается следующими параметрами (рис.4):

центр нижнего основания в связанных координатах аппарата A_0 , в метрах. Эта точка является центром координат отсека;

любая точка A_1 , лежащая на оси вращения, также в связанной системе координат. Точки A_0 и A_1 образуют ось OX отсека;

- любая точка A_2 , лежащая в плоскости нижнего основания, также в связанной системе координат. Точки A_0 и A_2 образуют ось OY отсека;

высота отсека H , в метрах;

радиус верхнего основания R_1 , в метрах;

радиус нижнего основания R_2 , в метрах;

- угол вращения образующей, начиная от оси OY Для полной боковой поверхности угол вращения равен 360° ;

- радиус образующей R_3 . Если образующая прямая , то условно принимают, что $R_3 = 0$.

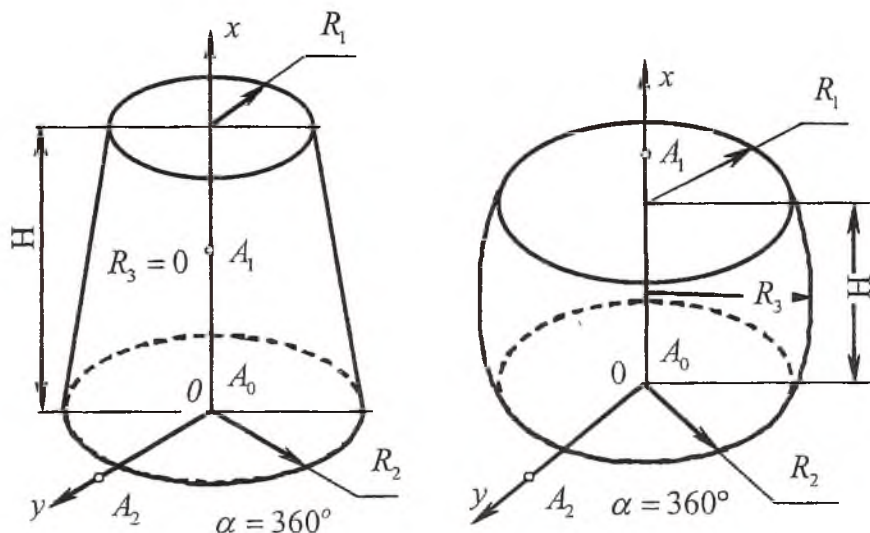


Рис. 4. Параметры для построения боковой поверхности тел вращения

Набор значений параметров определяет форму оболочки (рис.5):

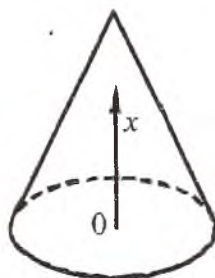
- конус ;
- усеченный конус;
- цилиндр;
- диск;
- кольцо;
- сфера;
- оживал;
- тор.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &= 0 \\ H &\neq 0 \end{aligned}$$

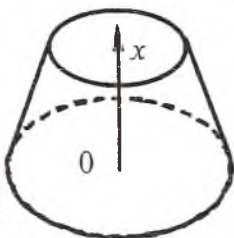
$$\begin{aligned} R_1 &\neq 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &= 0 \\ H &\neq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &\neq 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &= 0 \\ H &\neq 0 \\ R_1 &= R_2 \end{aligned}$$

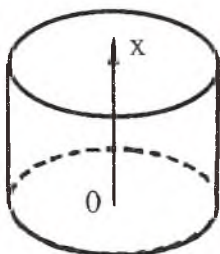
$$\begin{aligned} R_1 &= 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &= 0 \\ H &= 0 \end{aligned}$$



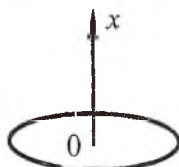
Конус



Усеченный конус



Цилиндр



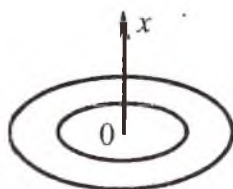
Диск

$$\begin{aligned} R_1 &\neq 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &= 0 \\ H &= 0 \end{aligned}$$

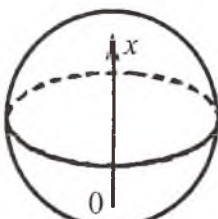
$$\begin{aligned} R_1 &= 0 \\ R_2 &= 0 \\ R_3 &\neq 0 \\ H &\neq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &\neq 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &\neq 0 \\ H &\neq 0 \end{aligned}$$

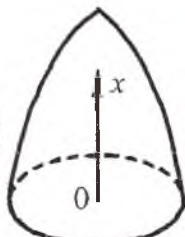
$$\begin{aligned} R_1 &\neq 0 \\ R_2 &\neq 0 \\ R_3 &\neq 0 \\ H &\neq 0 \end{aligned}$$



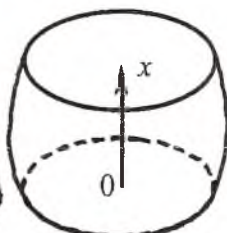
Кольцо



Сфера



Оживал



Тор

Рис.5. Формы оболочек тел вращения

При вводе параметров в программе расчета имеются проверки:

- Лежит ли точка A_2 в плоскости нижнего основания?

Есть ли соответствие между радиусами R_1 , R_2 и R_3 ?

3.1.3. Геометрия параллелепипеда

При вводе данных для построения параллелепипеда задаются следующие параметры:

- базовая точка A_0 в связанной системе координат;
- три точки A_x , A_y и A_z , которые вместе с точкой A_0 образуют правую ортогональную систему координат Ox , Oy и Oz ;
- длины ребер L_x , L_y и L_z вдоль каждой из осей координат.

В программе расчета имеется проверка ортогональности заданных координатных осей.

3.2. Преобразование координат при повороте КА

Часто бывает, что рабочее положение КА на орбите такое, что связанные оси КА не совпадают со скоростными осями. Тогда исходные данные геометрии КА вводят так, что связанные оси совпадают со скоростными, а затем КА (вместе со связанными осями) поворачивают в заданное рабочее положение. Такой поворот осуществляется следующим образом:

задают в скоростных осях точку A_0 , которая будет центром поворота;

- задают в скоростных осях какую-либо точку A_x , которая лежит на связанной оси Ox КА. Вычисляется вектор $M_a = A_x - A_0$;

- задают в скоростных осях какую-либо точку A_y , которая лежит на связанной оси Oy КА. Вычисляется вектор $M_b = A_y - A_0$;

- проверяют ортогональность этих векторов путем вычисления их скалярного произведения. При правильном задании положения КА скалярное произведение $(M_a, M_b) = 0$;

- вычисляют положение вектора M_c , совпадающего с осью Oz , путем вычисления векторного произведения $M_c = (M_a \cdot M_b)$;

- вычисляют единичные векторы

$$M_x = \frac{M_a}{|M_a|}; M_y = \frac{M_b}{|M_b|}; M_z = \frac{M_c}{|M_c|};$$

составляющие этих векторов равны:

$$M_x = \begin{cases} x_x \\ y_x \\ z_x \end{cases}; M_y = \begin{cases} x_y \\ y_y \\ z_y \end{cases}; M_z = \begin{cases} x_z \\ y_z \\ z_z \end{cases};$$

- составляется матрица преобразования

$$M_{\text{пр}} = \begin{cases} x_x & x_y & x_z \\ y_x & y_y & y_z \\ z_x & z_y & z_z \end{cases};$$

- используя матрицу преобразования $M_{\text{пр}}$ и имея координаты точки в связанной системе координат

$$A_{\text{связ}} = \begin{cases} x_{\text{связ}} \\ y_{\text{связ}} \\ z_{\text{связ}} \end{cases},$$

можно, вычисляя произведение матрицы $M_{\text{пр}}$ на вектор $A_{\text{связ}}$, найти координаты этой точки в скоростной системе координат, т.е.

$$A_{\text{скор}} = M_{\text{пр}} \cdot A_{\text{связ}};$$

- в программе предусмотрено сохранять на МД исходную информацию о форме и конструкции оболочек КА и, при необходимости, делать поворот осей, получая рабочую информацию;

- если необходимо вводить какие-либо изменения в рабочую информацию, то надо вначале вернуть исходную информацию, а затем ввести изменения и снова провести поворот осей, создавая новую рабочую информацию.

4. КОНСТРУКЦИЯ ОБОЛОЧЕК ОТСЕКОВ КА

В модели конструкции оболочек отсеков предполагается:

- оболочки имеют слоистую конструкцию;
- большинство слоев назначают при проектировании исходя из нормального функционирования КА;
- оболочка может иметь дополнительные слои для защиты от воздействия на КА космоса;
- каждый слой может быть плотным (металл, стекло и т.п.) или пористым (пенопласт, текстолит и т.п.);

- все плотные слои разнесены на достаточное расстояние друг от друга и пробой одного слоя не влияет на другие слои;

материал слоя может быть любым из указанных в таблице применяемых материалов;

- предлагаемый список применяемых материалов указан в табл. 2;

в программе расчета предусмотрена возможность изменения списка материалов по желанию пользователя.

Таблица 2

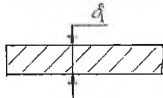
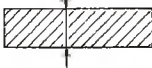
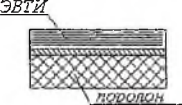
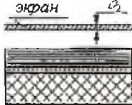
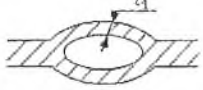
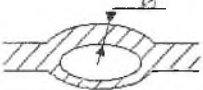
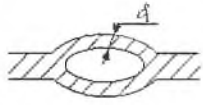
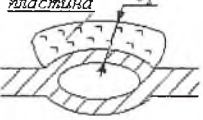
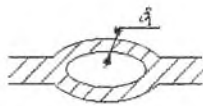
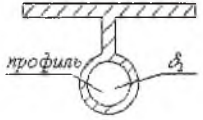
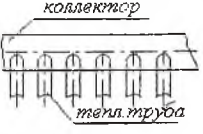
Список применяемых материалов

№ п/п	Марка материала	Признак пористости	Плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Прочность (врем. сопр. разрыву), ГПа
1	Д16АТ	1	2,78	72,00	0,460
2	АД1	1	2,70	71,00	0,120
3	АМГ6	1	2,64	70,00	0,320
4	МА8	1	1,76	43,00	0,300
5	30ХГСА	1	7,85	200,00	1,100
6	Х18Н10Т	1	7,90	190,00	0,900
7	СВИНЕЦ	1	11,34	16,00	0,020
8	ОТ4-1	1	4,55	100,00	0,600
9	СТЕКЛО	1	2,00	50,00	0,300
10	СО	1	1,10	3,0	0,080
11	РЕЗИНА	0	1,20	0,00	0,000
12	УГЛЕПЛАСТ	0	1,55	0,00	0,000
13	ЭВТИ	0	0,02	0,00	0,000
14	ПОРОЛОН	0	0,04	0,00	0,000
15	ПЕНОПЛАСТ	0	0,05	0,00	0,000
16	АСЬОТЕКСТ.	0	1,90	0,00	0,000
17	СТЕКЛОТЕКСТ.	0	1,85	0,00	0,000
18	ПТК	0	1,40	0,00	0,000

4.1. Защита оболочек КА от опасного воздействия на них ВСМЧ

Оболочки отсеков КА, подвергающиеся воздействию на них метеорных и техногенных частиц, могут быть пробиты. Вероятность непробоя оболочек КА зависит, в основном, от параметров оболочек. По результатам расчета могут быть выявлены наиболее уязвимые места. Для увеличения надежности и безопасности полета в этих местах (или на всей оболочке) устраивают различные способы защиты. Примеры основных способов защиты даны в табл. 3.

Способы защиты оболочек от опасного
воздействия на них ВСМЧ

№ п/п	Исходная конструкция	Предлагаемая конструкция	Характеристика защиты
I			Оболочка отсека без подкреплений. Защита - увеличение толщины оболочки
II			Оболочка отсека с тепло- и звукоизолирующей. Защита - установка противометеорного экрана
III			Каналы радиатора. Защита - увеличение толщины верхней стенки канала
IV			Каналы радиатора. Защита - приклеивание плотно сшитой пластины из 30...50 слоев экранно-вакуумной теплоизоляции
V			Каналы радиатора. Защита - изменение конструкции с помещением трубок под противометеорный слой
VI			Радиатор с тепловыми трубами. Защита - разрешен пробой двух труб, которые не расположены рядом

Во всех защитных конструкциях увеличение вероятности непробоя оболочки достигается за счет увеличения предельно пробиваемой толщины по цепочке увеличение $\delta_{\text{пп}}$ ведет к уменьшению расчетного числа пробоев N и, как следствие этого - увеличению вероятности непробоя оболочки метеорными и техногенными частицами:

$$P_{\text{нп}} = \exp(-N).$$

Для I и III способов защиты

$$\delta_{\text{нп}} = \delta_1 \left(\frac{\ln P_2}{\ln P_1} \right)^{0,28},$$

где δ_1 - толщина оболочки в исходной конструкции;
 P_1 - вероятность непробоя исходной конструкции;
 P_2 - потребная вероятность непробоя предлагаемой конструкции.
 Для II, IV и V способов защиты потребная расчетная толщина δ_2 может быть получена из решения неравенства

$$(\delta_{\text{э}2}(\delta_2) - \delta_{\text{э}2, \text{потр}}) \geq 0,$$

где $\delta_{\text{э}2}(\delta_2)$ - дюралевый эквивалент конструкции оболочки при вариации δ_2 в защите,

$$\delta_{\text{э}2, \text{потр}} = \delta_{\text{э}1} \left(\frac{\ln P_2}{\ln P_1} \right)^{0,28};$$

$\delta_{\text{э}1}$ - дюралевый эквивалент оболочки (из расчета КА).

Расчеты показали, что наиболее эффективным способом защиты является применение тепловых труб. Для этой конструкции $R_{\text{нп}}$ примерно равна единице и может быть исключена из определения вероятности непробоя всех оболочек КА.

5. РАЗБИЕНИЕ ОБОЛОЧЕК КА НА ЭЛЕМЕНТЫ

Разбивать поверхности оболочек КА на бесконечно малые величины и использовать их в расчетах, применяя интегральное исчисление, весьма громоздко и затруднительно, поэтому для проведения расчетов с некоторым приближением все поверхности оболочек разбивают на элементы и используют их, применяя суммирование, т.е. проводят вычисления для каждого элемента поверхности, а затем, суммируя, получают требуемое решение. При решении элементы должны быть определены в скоростной системе координат. Если связанные оси совпадают со скоростными, то это условие выполняется само собой.

5.1. Разбиение плоского четырехугольника

Разбиение четырехугольника проводится при заданных параметрах разбиения, а именно:

- $N_i \geq 1$ - разбиение сторон A_1A_2 и A_4A_3 ;

- $N_j \geq 1$ - разбиение сторон A_2A_3 и A_1A_4 .

На рис.6 показана схема такого разбиения.

Каждый элемент поверхности четырехугольника (треугольника) имеет четыре вершины $B_{ij}, B_{i+1,j}, B_{i+1,j+1}, B_{i,j+1}$.

У треугольника две соседние вершины совпадают.

Координаты вершин вычисляются по следующему алгоритму:

$$(1 \leq i \leq (N_i + 1), \quad 1 \leq j \leq (N_j + 1)):$$

$$k_i = (i - 1) / N_i;$$

$$C_i = A_1 \cdot (1 - k_i) + A_2 \cdot k_i;$$

$$D_i = A_3 \cdot k_i + A_4 \cdot (1 - k_i);$$

$$n_j = (j - 1) / N_j;$$

$$B_{ij} = C_i \cdot (1 - n_j) + D_i \cdot n_j.$$

Заметим, что все вершины и вычисляемые точки лежат в связанной системе координат.

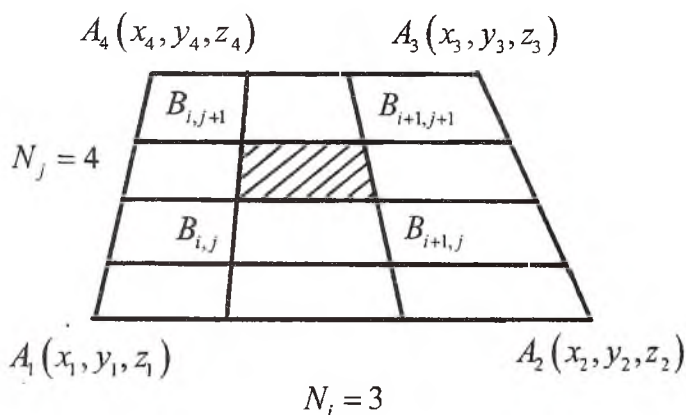


Рис.6. Схема разбиения четырехугольника

Проверка того, что все вершины четырехугольника лежат в одной плоскости, осуществляется с использованием понятия “векторное произведение” (треугольник не проверяется):

- на первых двух вершинах строится вектор

$$C = A_2 - A_1;$$

- на двух следующих вершинах строится вектор

$$D = A_3 - A_2;$$

- строится еще один вектор

$$F = A_4 - A_3;$$

- вычисляется вектор N , как векторное произведение векторов C и D ,

$$N = (C \cdot D);$$

- проверяется условие: если скалярное произведение векторов F и N равно нулю, т.е. $(F, N) = 0$, то четвертая точка и все остальные точки лежат в одной плоскости

5.2. Разбиение боковой поверхности тела вращения

Разбиение боковой поверхности тела вращения превращает поверхность с кривизной в набор плоских с четырьмя вершинами элементов поверхности. Разбиение проводится, как на глобусе. Сначала определяется положение меридиана, а затем широтное положение точки. Размеры и число элементов поверхности определяются параметрами тела вращения и двумя видами дробления - N_i - дробление вдоль широты (N_i - число меридианов) и N_j - дробление вдоль меридиана ($N_j + 1$) - число широтных колец.

5.2.1. Поверхность с прямолинейной образующей

Положение меридиана производится вычислением двух точек на верхнем и нижнем основаниях:

$$k_i = \alpha / N_i,$$

$$C_i = \begin{cases} H \\ R_1 \cos \beta_i \\ R_1 \sin \beta_i, \end{cases}$$

$$D_i = \begin{cases} 0 \\ R_2 \cos \beta_i \\ R_2 \sin \beta_i, \end{cases}$$

где α - полный угол вращения образующей;

β_i - долгота меридиана,

$$\beta_i = (i - 1) k_i.$$

Широта точки определяется через значения N_j и j , а положение вершины элемента поверхности - через точки C_i и D_i :

$$L_j = (j - 1) / N_j ;$$

$$B_{ij} = A_0 + D_i \cdot (1 - L_j) + C_i L_j$$

На рис.7 дана схема разбиения боковой поверхности тела вращения с прямолинейной образующей.

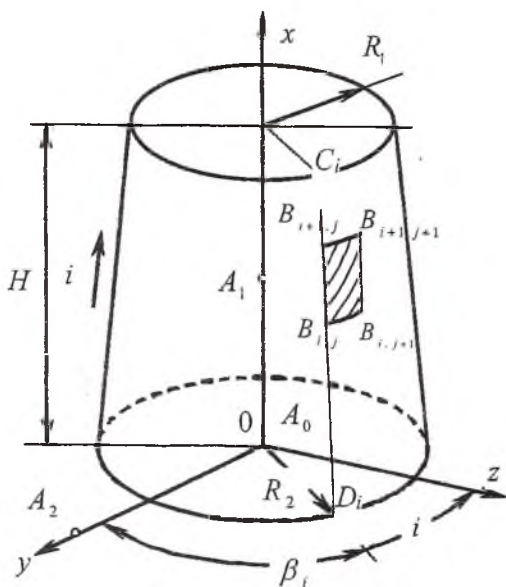


Рис.7. Схема разбиения боковой поверхности тела вращения с прямолинейной образующей

Контроль положения точки A_2 в плоскости нижнего основания осуществляется проверкой скалярного произведения двух векторов: $C = A_1 - A_0$ и $D = A_2 - A_0$. Если $(C, D) = 0$, то точка A_2 лежит в плоскости нижнего основания.

5.2.2. Разбиение боковой поверхности с криволинейной образующей

Положение меридиана производится вычислением его долготы β_i :

$$\beta_i = \alpha (i - 1) / N_i ,$$

где α - полный угол вращения образующей.

Ширина точки определяется через значения N_j и j и положением центра радиуса образующей R_3 .

Это положение в системе координат отсека (рис.8) вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} x_c &= H/2 + (R_1 - R_2)L_2; \\ y_c &= (R_1 - R_2) / 2 - H \cdot L_2, \end{aligned}$$

$$\text{где } L_2 = \sqrt{\frac{R_3^2}{L_1^2} - 0,25};$$

$$L_1^2 = H^2 + (R_1 - R_2)^2.$$

Положение отсека в связанной системе координат определяется точками:

$$A_0 = \begin{cases} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{cases}; \quad A_1 = \begin{cases} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{cases}; \quad A_2 = \begin{cases} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{cases}.$$

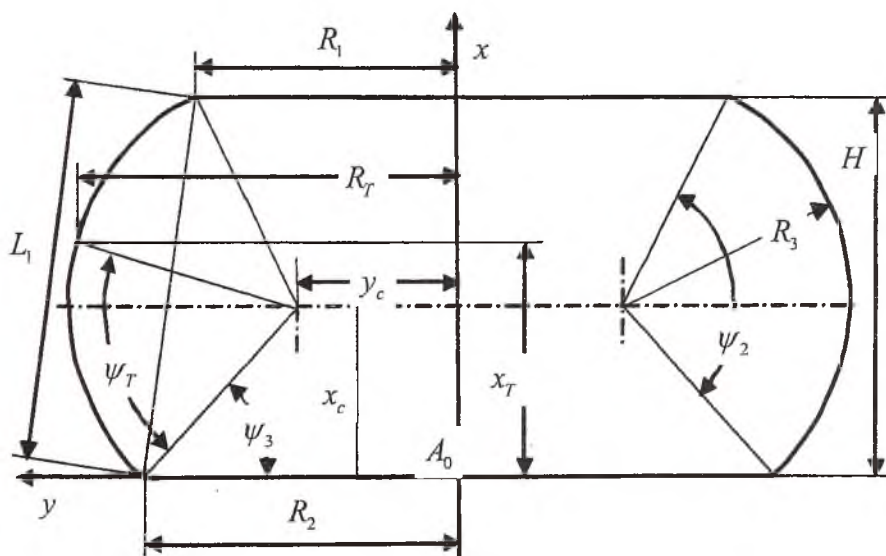


Рис.8. Схема вычисления положения центра радиуса образующей

Координаты точек - вершин элемента боковой поверхности B_{ij} в связанной системе координат (рис.9) вычисляются по формулам

$$B_{ij} = \begin{cases} x_T + x_0 \\ R_T \cdot \cos \beta_i + y_0 \\ R_T \cdot \sin \beta_i + z_0, \end{cases}$$

где $x_T = x_c + R_3 \cdot \sin(\psi_T - \psi_3)$; $\psi_T = (j - 1) \cdot \psi_1$;
 $\psi_1 = \psi_2 / N_j$; $\psi_2 = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{l_1 / R_3})$; $\psi_3 =$
 $= \arcsin(x_c / R_3)$.

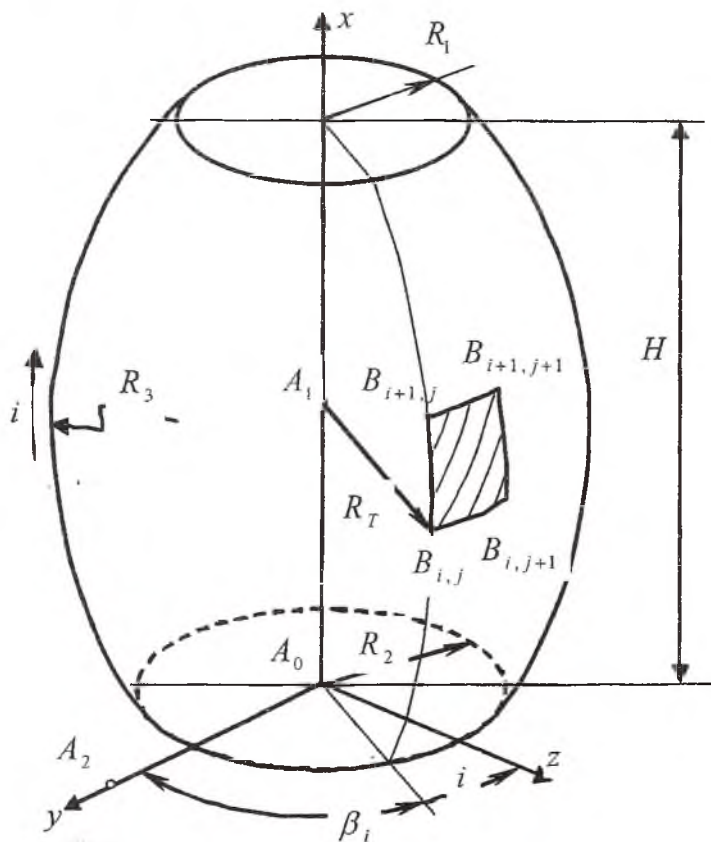


Рис.9. Схема разбиения боковой поверхности с криволинейной образующей

6. ВЕРОЯТНОСТЬ НЕПРОБОЯ ОБОЛОЧЕК КА

В соответствии с принятым законом Пуассона вероятность непогиба элемента поверхности отсека КА вычисляется по формуле

$$P_{\text{инп}} = \exp(-N_j),$$

где N_j - расчетное число пробоев на элементе поверхности за активный срок существования КА (см. раздел 1).

Еще раз отметим, что $P_{\text{инп}}$ идентична показателю надежности элемента поверхности отсека КА по критерию непогиба. Это особенно заметно при $P_{\text{инп}} = 0,99$.

Вероятность непогиба какого-либо i -го отсека КА вычисляется по формулам

$$P_{\text{ин}} = \prod_{j=n_{\text{нач}}}^{j=n_{\text{кон}}} P_{\text{инп}} \quad \text{или} \quad P_{\text{инп}} = \exp(-N_i),$$

где $N_i = \sum N_j$ - число пробоев на i -м отсеке КА;
 $n_{\text{нач}}$, $n_{\text{кон}}$ - начальный и конечный номера элементов поверхности этого отсека.

Вероятность непогиба хотя бы одного из отсеков КА (идентична показателю надежности всего КА) вычисляется по формулам

$$P_{\text{КА инп}} = \prod_{i=1}^{n_{\text{отс}}} P_{\text{инп}} \quad ; \quad \text{или} \quad P_{\text{КА инп}} = \prod_{j=1}^{n_{\text{эл}}} P_{\text{инп}} \quad ;$$

$$\text{или} \quad P_{\text{КА инп}} = \exp(-N_{\text{КА}}),$$

где $n_{\text{отс}}$ - число отсеков в КА;

$n_{\text{эл}}$ - число элементов поверхностей отсеков КА;

$$N_{\text{КА}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{эл}}} N_j \quad \text{- число пробоев на поверхностях всех отсеков КА.}$$

Условно принято, что если $P_{\text{инп}} < 0,99$, то этот отсек повреждается за время активного существования хотя бы одной метеорной или техногенной частицей.

Число пробоев на элементе поверхности отсека КА вычисляется по формуле модели метеорно - техногенного окружения (см. подразд. 1.1)

$$N_j = A \cdot T \cdot k_j \cdot \delta_j^{-3 \cdot S} \cdot F_j \text{ (пробойн).}$$

Так как полет КА происходит не в “чистом космосе” и оболочки отсеков не всегда изготовлены из Д16АТ, то при вычислении числа соударений приходится вводить ряд допущений и предположений, учитывающих специфику работы КА.

В формуле для определения числа пробоев имеется три параметра (k_j , δ_j и F_j), относящихся к элементам поверхности отсека КА, которые требуют отдельного рассмотрения.

6.1. Определение поправочного коэффициента k_j

Поправочный коэффициент k_j имеет несколько составляющих (индекс j опущен):

$$k = \alpha_f \cdot k_L \cdot k_3 \cdot k_{\text{экp}}.$$

α_f коэффициент сохранения площади (задается при проектировании);

$$0 \leq \alpha_f \leq 1;$$

$\alpha_f = 0$, если воздействие частиц на поверхность отсека безразлично и/или безопасно, например, если отсек представляет собой панель солнечных батарей;

$\alpha_f = 1$, если из-за пробоя КА может выйти из строя;

$\alpha_f < 1$, если только о некоторой части поверхности отсека следует беспокоиться по поводу появления пробоя. Например, каналы на навесном холодном радиаторе имеют малую толщину стенки (0,8 мм), но занимают только 15% площади НХР. Тогда $\alpha_f = 0,15$.

k_L - коэффициент, учитывающий подлет частицы к элементу поверхности. Если скалярное произведение векторов N и V положительно, то частица попадает на тыльную сторону элемента поверхности. Т.е. если $(N, V) \geq 0$, тогда $k_L = 0$, иначе $k_L = 1$.

k_3 - коэффициент, учитывающий то, что при своем движении частица, прежде чем попасть в элемент поверхности, может встретить Землю. Так называемое “экранирование элемента поверхности Землей” На рис.10 показано взаимное расположение элемента поверхности отсека КА и Земли.

$$\psi = \arctg \frac{1}{\sqrt{2H_{\text{отн}} + H_{\text{отн}}^2}},$$

где $H_{\text{отн}} = \frac{H}{R_3}$ - относительная высота полета.

Из этой схемы видно, что если $\varphi > \psi$, то $\kappa_3 = 1$, иначе $\kappa_3 = 0$.

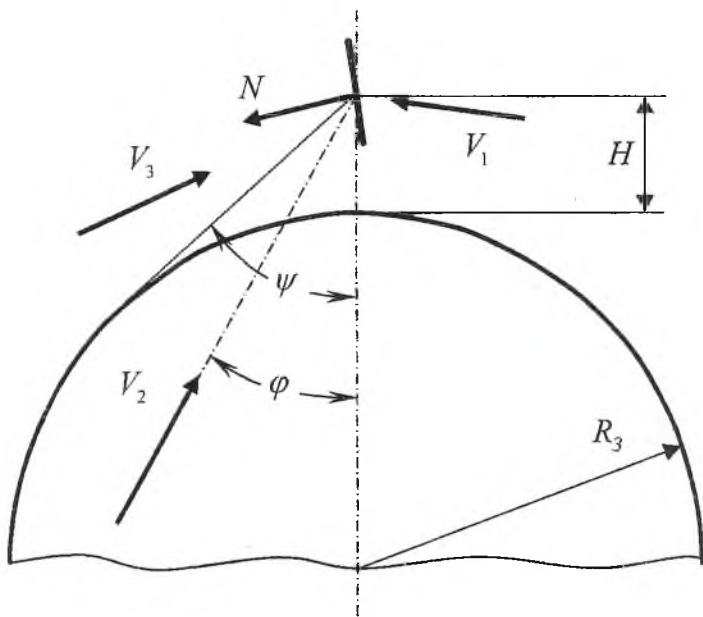


Рис.10. Схема подхода частицы к элементу поверхности: N - нормаль к элементу поверхности; $R_3 = 6371$ км - радиус Земли; V_1 - вектор скорости частицы, не попадающей на лицевую сторону; V_2 - вектор скорости частицы, экранируемой Землей; V_3 - вектор скорости частицы, попадающей на лицевую сторону

$\kappa_{\text{экр}}$ - коэффициент, учитывающий то, что каждый элемент поверхности может быть заэкранирован другими элементами. На каждом j -м элементе поверхности отсеков могут появиться проекции одного или нескольких элементов поверхности других отсеков, т.е. другие элементы поверхности загораживают подлет частицы к этому элементу, появляются "тени" на расчетном элементе поверхности. Если сумма площадей "теней" становится равной или больше площади расчетного элемента поверхности, то считается, что j й элемент полностью заэкранирован и на него частица попасть не может.

Коэффициент экранирования вычисляется по формуле

$$K_{\text{экр}} = 1 - \frac{\sum F_1}{F_j},$$

где $\sum F_1$ — сумма площадей проекций i -х элементов на j -й элемент поверхности;

F_j — площадь расчетного элемента поверхности.

Если расчетный элемент поверхности полностью заэкранирован, то коэффициент экранирования $K_{\text{экр}} = 0$.

Точные вычисления размера заэкранированной части, исходя из геометрии сравниваемых элементов поверхности, достаточно сложны, поэтому предлагается упрощенный метод с использованием случайных чисел.

На рис.11 показана схема экранирования элемента I элементом II. Элемент II лежит выше элемента I, на котором лежит "тень" от элемента II. Суть метода заключается в том, что на элементе I случайным образом располагают $N_{\text{сл}}$ точек, оценивают положение каждой точки и если к какой-либо точке подход загораживается элементом II, то соответствующий счетчик увеличивается на 1.

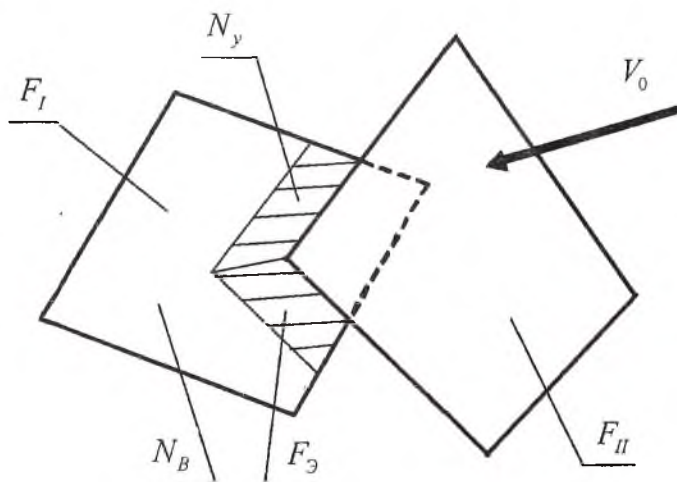


Рис.11. Схема экранирования одного элемента другим:

F_I — площадь экранируемого элемента; F_{II} — площадь экранирующего элемента; $F_э$ — заэкранированная площадь; N_B — точка вне "тени";

N_y — точка внутри "тени"

Тогда заэкранированная площадь равна

$$F_3 = F_1 \frac{N_0}{N_{св}}$$

где N_0 - счетчик точек внутри "тени", $N_0 = \sum N_y$;
 $N_{св}$ - полное число пробных точек на элементе I .

6.2. Определение расчетной толщины δ

Расчетной толщиной δ является толщина однослойной оболочки из материала Д16АТ. Если конструкция оболочки другая, то вычисляется дюралевый эквивалент по методике разд. 2.4.

6.3. Определение расчетной площади элемента поверхности F_j

Величина расчетной площади элемента поверхности отсека зависит от угла подлета частицы к лицевой стороне. Этот угол α вычисляется через скалярное произведение векторов N и V по формуле

$$\alpha = \arccos \frac{(N, V)}{|N| |V|},$$

где N - нормаль к элементу поверхности;
 V - вектор скорости подлетающей частицы.

Тогда расчетная площадь элемента поверхности равна

$$F_j = F_{0j} \cos \alpha,$$

где F_{0j} - площадь элемента поверхности, определяемая при вводе геометрии КА и разбиении поверхности на элементы.

6.4. Определение числа пробоев метеорными частицами

Подход метеорных частиц к Земле подчиняется некоторым вероятностным зависимостям. Но так как КА не стоит на месте, а движется по орбите, поворачиваясь к потоку частиц различным "боком", то в модели воздействия частиц на элементы поверхности КА принято, что направление подхода частиц к КА в данный момент времени равновероятно и скорость подхода равна 20 км/с. В этом случае вектор скорости частицы, попадающий на КА, равен

$$V_{уд} = V_{\eta} - V_{ка},$$

где $V_{уд}$ - вектор скорости соударения частицы с элементом поверхности КА;

V_{φ} - вектор скорости частицы;

$V_{ка}$ - вектор скорости КА.

В расчете равномерность подлета частицы обеспечивается тем, что каждый элемент поверхности КА условно “накрывается” сферой, на которой располагаются равномерно точки, откуда, как из радиантов, выходят частицы.

Число этих точек задается пользователем и чем больше этих точек, тем точнее будет расчет. Эти точки задаются в сферической системе координат углами α и β по следующим зависимостям:

$$\alpha = 2\pi c_1;$$

$$\beta = \arctg \frac{2c_2 - 1}{2c_2 \sqrt{1/c_2 - 1}},$$

c_1 и c_2 - случайные числа с равномерным распределением от 0 до 1;

$$0 < c_1 < 1;$$

$$0 < c_2 < 1.$$

Заметим, что если угол β вычислять в соответствии с равномерно распределенным случайным числом от $-\pi/2$ до $\pi/2$, то у полюсов в сферической системе координат точек будет слишком много и равномерность будет нарушена.

Зная положение элемента поверхности КА и векторы скорости $V_{уд}$, выходящие из всех точек сферы, можно определить среднее число пробоев по формуле

$$N_j^{cp} = \frac{1}{n_p/2} \sum_{k=1}^{k=n_p} N_{jk},$$

где k - номер точки на сфере;

n_p - число равномерно распределенных по сфере точек;

N_{jk} - число пробоев, вычисляемых по формуле разд. 1.

6.5. Определение числа пробоя техногенными частицами

Большая часть техногенных частиц движется по орбитам, близким к круговым, и если КА тоже движется по круговой орбите, то подход частиц к КА происходит вблизи плоскости XOZ в скоростной системе координат. Исходя из этого принято, что точки, откуда частицы подлетают к КА, равномерно распределены по окружности, лежащей в плоскости XOZ , но скорость частиц равна не 20 км/с, а 8 км/с. Это основное отличие техногенных частиц от метеорных, а сходство заключается в том, что методика определения числа пробоев от техногенных частиц принята той же, что и для методики расчета числа пробоев от метеорных частиц (см. разд. 4.4).

6.6. Определение площади экранирования одного элемента другим

В разд. 5.1. сказано, что для вычисления коэффициента экранирования $K_{\text{эк}}$ необходимо знать, насколько один элемент поверхности отсека “загораживает” другой. Точные вычисления размера заэкранированной части, исходя из геометрии сравниваемых элементов поверхности, достаточно сложны, поэтому предлагаются упрощенные методы.

6.6.1. Метод с применением случайных чисел

На рис. 12, а показана схема экранирования элемента I элементом II. Элемент II лежит выше элемента I, на котором лежит “тень” от элемента II. Суть метода заключается в том, что на элементе I случайным образом располагают $N_{\text{сл}}$ точек, оценивают положение каждой точки и если к какой-либо точке подход загораживается элементом II, то соответствующий счетчик увеличивается на 1.

Тогда заэкранированная площадь равна

$$F_3 = F_1 \frac{N_o}{N_{\text{сл}}},$$

где N_o - счетчик “неудачных” точек;

$N_{\text{сл}}$ - полное число пробных точек на элементе I.

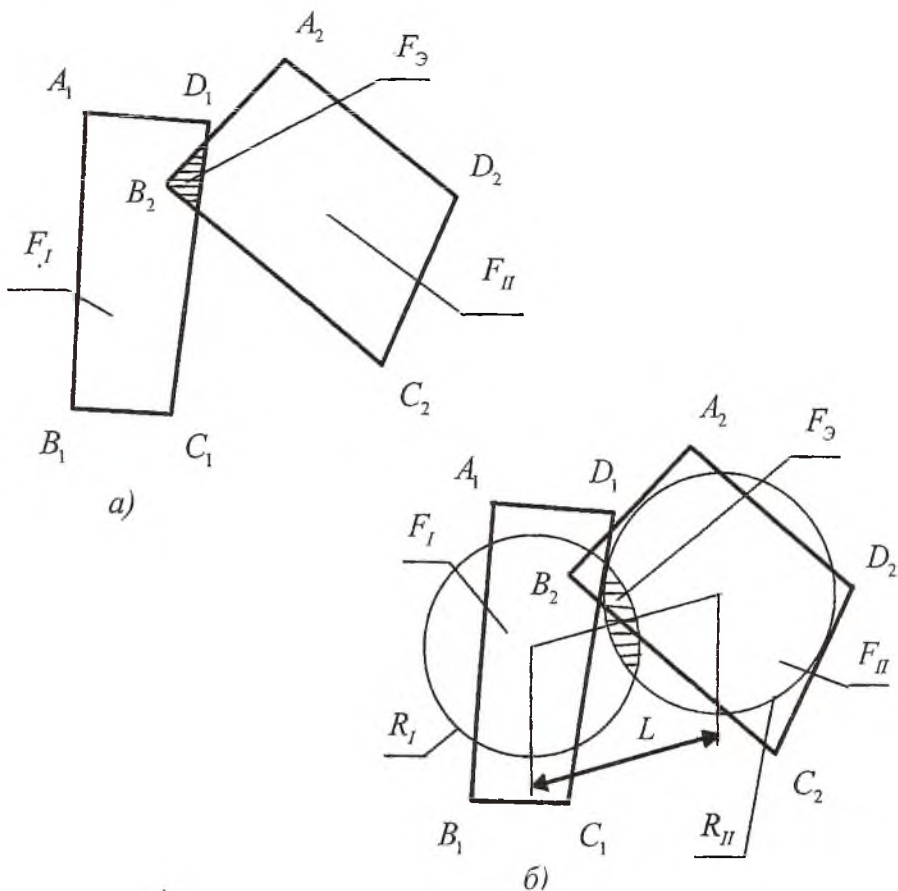


Рис. 12. Схема экранирования одного элемента другим :

а-применение случайных чисел; б-упрощенный метод;

F_I - площадь экранируемого элемента; F_{II} - площадь экранирующего элемента; F_3 - заэкранированная площадь; R_I - радиус окружности, эквивалентной площади элемента I; R_{II} - радиус окружности, эквивалентной площади элемента II; L - расстояние между центрами элементов; а - малая ось эллипса; б - большая ось эллипса.

6.6.2. Упрощенный метод

На рис. 12, б показан другой, более простой метод отыскания заэкранированной площади. Суть метода заключается в том, что строятся круги с радиусами R_I и R_{II} , площади которых равны площадям соответствующих элементов поверхности. Если

$(R_I + R_{II}) < L$, то считается, что круги пересекаются и появляется пересечение этих кругов, площадь которого уподобляется эллипсу с осями a и b . Эта площадь и есть заэкранированная часть элемента I.

$$R_I = \sqrt{F_I / \pi};$$

$$R_{II} = \sqrt{F_{II} / \pi};$$

$$a = (R_I + R_{II} - L) / 2;$$

$$b = 2 S / L,$$

где $S = \sqrt{P(P - R_I)(P - R_{II})(P - L)}$;

$$P = (R_I + R_{II} + L) / 2;$$

$$F_s = \pi a b.$$

7. КОНТРОЛЬ

Как бы тщательно ни готовилась документация, как бы правильно ни работала программа, все равно необходимо все подвергать проверке, проводить контроль на всех этапах:

- контроль на этапе ввода информации. Оценивается предлагаемый список материалов. Если этот список не устраивает пользователя, то имеется возможность исправить этот список. Проводится визуальный контроль ввода геометрии отсеков КА, данных по конструкции оболочек отсеков. Программа сама проверяет соотношения параметров, например, ортогональность осей. Можно проследить правильность ввода данных, выдавая распечатку на экран монитора или на принтер;

- так как программа имеет дело с геометрическими объектами, то необходимо проводить так называемый графический контроль, когда на экран выдается изображение объекта в любом ракурсе, причем объект может быть выдан целиком или по частям;

- контроль на этапе счета. Выдается информация о том, что программа работает и работает в заданной последовательности;

- к контролю можно отнести и выдачу иллюстративной информации, например, изображение на экране монитора объекта, как при графическом контроле с выделением цветом зон уязвимости, отмечая зоны с наибольшей уязвимостью воздействием метеорного и техногенного окружений;

выдаваемые на экран монитора или на принтер результаты расчета также можно отнести к контролю за общей работой программы.

7.1. Список применяемых материалов

На диске хранится список с данными по предлагаемым материалам (см.разд. 2.2). Если этот список не устраивает пользователя, то он может изменить этот список, вводя с клавиатуры такие параметры, как:

- марка материала;
- признак пористости. Плотный материал имеет признак, равный единице, пористый - нулю;
- плотность материала, $г/см^3$;
- для плотного материала - модуль упругости, ГПа;
- прочность плотного материала временное сопротивление разрыву, ГПа;
- новый список можно запомнить для дальнейшего использования в файле на диске, выдать список на экран монитора или выдать на принтер.

Выданный на принтер список материалов может служить в качестве отчетной документации.

7.2. Геометрические данные отсеков

Данные по геометрии отсеков контролируются в процессе ввода визуально, а также самой программой. Тем не менее , все данные могут быть выданы на экран монитора или на принтер. Данные, выданные на принтер, могут служить отчетной документацией.

Данные на принтер выдаются последовательно:

о пластинах:

- координаты вершин в связанной системе координат;
- программа проверяет, лежат ли все вершины в одной плоскости (о контроле - см. разд. 3.1);
- параметры разбиения;
- число слоев в конструкции пластины;
- коэффициент сохранности площади;
- *о телах вращения:*

- координаты трех базовых точек в связанной системе координат (о контроле - см. разд. 3.2);
- радиус верхнего основания;
- радиус нижнего основания;

- радиус образующей. Для прямолинейной образующей радиус образующей принимается равным нулю;
- высота отсека;
- угол вращения образующей;
- параметры разбиения;
- число слоев в конструкции оболочки;
- коэффициент сохранности площади;
- о параллелепипеде:*
- координаты трех вершин в связанной системе координат (о контроле - см. разд. 2.1.3);
- длины трех ребер;
- число слоев в конструкции оболочки;
- коэффициент сохранности площади.

7.3. Данные по конструкции оболочек

Принято, что все оболочки имеют слоистую конструкцию с числом слоев не более четырех. Если коэффициент сохранности площади равен нулю, то конструкцию можно задавать любой - она на расчет вероятности непробоя оболочек КА не влияет. Контроль данных по конструкции проводится визуально на экране монитора при вводе их с клавиатуры или путем выдачи данных на принтер. В каждой строке выдаваемой таблицы, если коэффициент сохранности площади не равен нулю, приводятся данные о каждом слое (марка материала и толщина слоя), в противном случае выдается информация о том, что отсек является только экраном.

7.4. Графический контроль

При графическом контроле задаются отсеки или целиком КА, изображение которых выдается на экран монитора под направлением взгляда, определяемым углами α и β . На рис.13 приведена схема, на которой показаны скоростные оси x_0, y_0, z_0 , оси проекции $x_p, y_p, z_p, 0$, образованные поворотом на углы α и β . Координаты на плоскости x_p, y_p соответствуют координатам экрана на мониторе. Преобразование координат какой-либо точки A_{ck} в скоростной системе координат проводится путем умножения этих координат на матрицу преобразования $M_{пр}$.

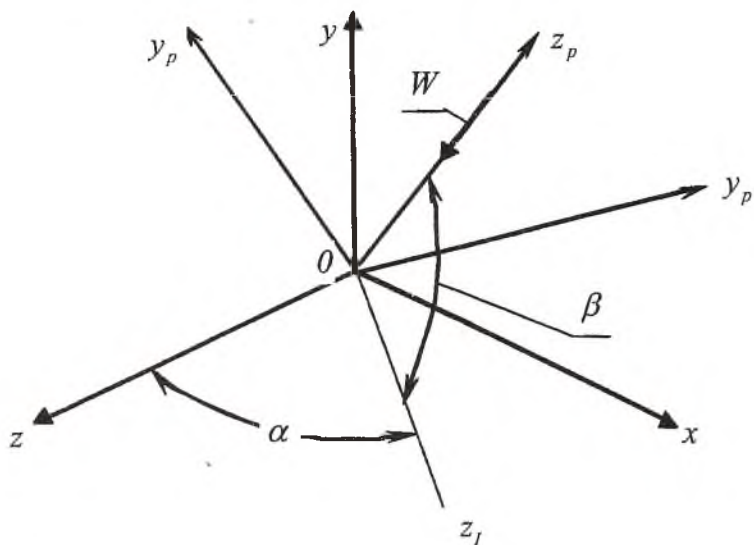


Рис.13. Схема поворота координатных осей : W - вектор взгляда; Oz_1 - вспомогательная ось

Матрица преобразования имеет вид

$$M_{\text{пр}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ -\sin \alpha \sin \beta & \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

Координаты точки после преобразования равны

$$A_p = M_{\text{пр}} \cdot A_{\text{ск}}$$

В соответствии с заданием последовательно преобразуются координаты вершин каждого элемента поверхности и изображения выдаются на экран линиями, соединяющими соответствующие точки.

Если задано рисовать только видимые элементы, то те элементы, у которых скалярное произведение нормали элемента и направление вектора взгляда больше нуля, рисованию не подлежат.

На экране, кроме того, выдается положение скоростных осей координат.

7.5. Контроль на этапе счета

Расчет вероятностей непробоя оболочек КА длится сравнительно долго. Для того чтобы видеть, что ЭВМ работает, на экран монитора постоянно выдается информация:

- Обрабатывается элемент No =
- Отсек Notс =,

т.е. сообщение о вычислении вероятности непробоя слоя на соответствующем элементе поверхности отсека.

Предусмотрено, что после обработки очередной десятки элементов результаты расчета записываются в специальный файл на диске. Программа для такого хранения результатов счета резервирует дополнительный файл, который заканчивается буквой "w". Такое хранение информации позволяет в любой момент времени прервать счет и возобновить его с того момента, когда была занесена последняя "десятка". Это же исключает потерю информации при случайном сбое и непредусмотренном выключении электроэнергии.

На этом этапе предусмотрено два режима:

- **Начало расчета** очищаются все рабочие массивы и расчет начинается с элемента No =1;

- **Продолжение и окончание расчета** - считывается последняя, записанная на диск информация и делается переход на продолжение счета, начиная с обработки следующего по номеру элемента.

Естественно, отсеки, имеющие коэффициент сохранения площади равный нулю, обработке не подвергаются.

7.6. Иллюстрация уязвимости

Иллюстрация уязвимости заключается в том, что на экран монитора выдается изображение разбитого на элементы поверхности самого КА или его пронумерованных отсеков. Во время расчета вероятности непробоя поверхности отсека от действия метеорных и техногенных частиц для каждого j-го элемента подсчитываются:

- площ аль элемента поверхности F_j ;

- число пробоев оболочки метеорными частицами $N_{пробj}^M$;

- число пробоев оболочки техногенными частицами $N_{пробj}^T$;

- вероятность непробоя элемента поверхности метеорными частицами $P_{нпj}^M = \exp(-N_{пробj}^M)$;

- вероятность непробоя элемента поверхности техногенными частицами $P_{нпj}^T = \exp(-N_{пробj}^T)$;

вероятность пробоя элемента поверхности отсека метеорными частицами $P_{прj}^M = 1 - P_{нпj}^M$;

- вероятность пробоя элемента поверхности отсека техногенными частицами $P_{прj}^T = 1 - P_{итj}^T$;

максимальное значение среди всех вероятностей пробоя элементов поверхности метеорными частицами $m^M = \max (P_{прj}^M)$;

- максимальное значение среди всех вероятностей пробоя элементов поверхности техногенными частицами $m^T = \max (P_{прj}^T)$;

покрытие поверхности элемента точками желтого цвета (для иллюстрации воздействия метеорных частиц). Число точек определяется по формуле $n^M = P_{прj}^M \cdot F_j \cdot k_{жм}$. Точки располагаются на элементе поверхности случайным образом;

- покрытие поверхности элемента точками белого цвета (для иллюстрации воздействия техногенных частиц). Число точек определяется по формуле $n^T = P_{прj}^T \cdot F_j \cdot k_{кт}$. Точки располагаются на элементе поверхности случайным образом.

Таким образом выделяются зоны, наиболее уязвимые метеорными и техногенными частицами. Коэффициенты контрастности $k_{жм}$ и $k_{кт}$, которые можно изменять, характеризуют “густоту” покрытия точками соответствующего цвета.

7.7. Результаты расчета вероятности непробоя оболочек КА

Еще одним видом контроля являются выдаваемые в виде таблицы на экран монитора или на принтер результаты расчета. В таблице приводится для каждого отсека, не имеющего нулевого коэффициента сохранения площади, вероятность непробоя оболочки как метеорными, так и техногенными частицами. В заключение выдаются значения вероятности непробоя всего КА по отдельности метеорными и техногенными частицами и общей вероятности непробоя оболочек всего КА всеми частицами.

Для большей определенности в заголовке таблицы приводятся имя КА и срок его активного существования.

8. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

Программа МТОПКА позволяет кроме вычисления вероятности непробоя КА метеорными и техногенными частицами определять дополнительно:

- количество пробоин на отсеках, имеющих очень малую толщину оболочки;

- характеристики системы наддува отсеков, имеющих пробоины; степень эрозии поверхностей, чувствительных к внешним повреждениям.

Проведение этих работ осуществляется на этапе проектных разработок, но вначале должен быть проведен расчет по определению вероятности непробоя КА метеорными и техногенными частицами.

8.1. Определение числа пробитых отверстий в тонкой оболочке

Иногда для выполнения некоторых функций на КА устанавливают (или разворачивают в космосе) отсеки, изготовленные из очень тонкой пленки. Для создания и сохранения формы такие отсеки должны либо иметь каркас, либо внутри должен находиться под небольшим давлением газ, например азот. В бескаркасной схеме появление в оболочке отверстий вызывает травление газа и, как следствие этого, отсек теряет форму. Для устранения этого должна быть предусмотрена система наддува оболочки, запас газа в которой зависит от числа и диаметра отверстий, полученных в результате воздействия потока метеорных и техногенных частиц.

Для определения числа отверстий вводится предположение, что при достижении вероятности непробоя $P_{\text{нп}} = 0,99$ в оболочке появляется одно отверстие, при меньшем значении отверстий несколько.

Число отверстий вычисляется по формуле

$$n_{\text{отв}} = \frac{T_0}{T_d},$$

где T_0 - время активного существования отсека, сут.;

T_d - отрезок времени, за который появится одна пробоина, сут.,

$$T_d = -\frac{\ln 0,99}{D};$$

D - обобщенный коэффициент из зависимости, определяющей число пробоев за время активного существования (см. разд. 1),

$$D = \frac{N_{\text{отс}}}{T_0};$$

$N_{\text{отс}}$ - число пробойн (из расчета КА).

Тогда
$$n_{\text{отв}} = -\frac{N_{\text{отс}}}{\ln 0,99}.$$

Зная из расчета КА дюралевый эквивалент оболочки δ_3 (см), можно найти диаметр частицы, которая способна пробить эту оболочку:

$$d_0 = \frac{\delta_3}{1,18 \left(\frac{\rho_0 \cdot V_0}{\sqrt{\rho_{\text{АЛ}} \cdot \sigma_{\text{АЛ}}}} \right)^{0,38}},$$

где ρ_0 - плотность частицы, г/см³ ;
 $\rho_{\text{АЛ}}$ - плотность Д16АТ, г/см³ ;
 V_0 - скорость соударения, км/с;
 $\sigma_{\text{АЛ}}$ - прочность Д16АТ, ГПа.

8.2. Запас газа для наддува оболочки

Для компенсации потери газа через пробойны за время активного существования необходимо иметь запас, кг

$$M_{\text{газ}} = Q \cdot T_0,$$

где Q - расход газа через отверстия в оболочке, кг/с,
$$Q = W_{\text{сумм}} \cdot a \cdot \rho_{\text{В}} ;$$

$W_{\text{сумм}}$ - суммарная площадь отверстий, м²,

$$W_{\text{сумм}} = n_{\text{отв}} \cdot k \frac{\pi d_0^2}{4} ;$$

k - коэффициент, учитывающий, что диаметр пробитого отверстия больше диаметра частицы;

$a = 20,1\sqrt{t}$ - скорость в пробойне, равная скорости звука, м/с;

t - температура газа, К;

$\rho_{\text{В}}$ - плотность газа в оболочке, кг/м³.

8.3. Определение степени эрозии поверхности отсека

На КА могут иметься не только поверхности, задающие объем отсека, но и поверхности, которые должны иметь определенные оптические свойства. К таким поверхностям можно отнести стекла иллюминаторов, линзы и стеклянные зеркала оптических приборов, полированные металлические поверхности и пр. Соударение таких поверхностей с ВСМЧ может привести к ухудшению оптических свойств за счет появления на поверхности кратеров с растрескиванием и с ухудшением чистоты из-за дополнительных выступов и впадин. Ухудшение оптических свойств это та эрозия, которая вредит выполнению заданного предназначения.

Следует отметить, что ухудшение оптических свойств может происходить при осаждении на поверхностях продуктов сгорания и выплесков жидкости, например, из сопел и клапанов ЖРД и микро ЖРД. Это следует учитывать при компоновке КА и не допускать такого осаждения на оптические приборы.

Вероятность отказа в работе оптического элемента поверхности зависит от относительной площади повреждений на этом элементе.

Эрозия зависит в основном от выбранного материала и его твердости, от положения поверхности на КА, от времени экспонирования ее, от распределения метеорных и техногенных частиц по массам.

При разработке математической модели для оценки повреждающего действия метеорных и техногенных частиц принимают следующие допущения:

1. Вероятностная площадь повреждения поверхности оптического элемента от одной частицы любой массы равна

$$F_{\Pi}(m) = P(m) \cdot F_p(m),$$

где $P(m)$ - вероятность попадания частицы массой больше m на поверхность элемента;

$F_p(m)$ - площадь разрушения поверхности частицей массой m при условии попадания частицы с вероятностью, равной единице.

2. Площадь повреждения поверхности частицами различной массы

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} F_m = \sum_{i=1}^{i=n} P(m_i) \cdot F_p(m_i),$$

где n - количество участков в законе распределения частиц по массам, принимаемых за средние значения в i -м диапазоне ($i = 1, n$).

3. Вероятность попадания частицы массой больше m_i оценивается по формуле

$$P(m) = 1 - \exp(-D \cdot m^{-s}),$$

где s - показатель степени в интегральном законе распределения частиц по массам.

$$N = D \cdot m^{-s} \quad (\text{см. разд. 1}),$$

$$s = 0,4 \quad \text{при } \ln(m) \leq 5,75;$$

$$s = 1,2 \quad \text{при } \ln(m) > 5,75;$$

D - коэффициент, получаемый из расчета КА по определению вероятности непрооя P_i отсека, на котором размещается оптический элемент:

$$D = \frac{\ln(P_i)}{m_i^{-s}},$$

m_i - масса частицы, способной пробить оболочку с расчетной величиной дюралевого эквивалента.

4. Диаметр разрушения D_p принимается пропорциональным диаметру частицы:

$$D_p = k \cdot d,$$

где k - коэффициент пропорциональности. (Для стекла $k = 30$, для металлов $k = 5$);

d - диаметр частиц с массой на соответствующем участке из разбиения частиц по массам.

5. Глубина кратера принята равной

$$L_{кр} = 2,5 d.$$

Исходя из принятых предположений, суммарная площадь повреждения

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} \left[1 - \exp(-D \cdot m^{-s}) \right] \cdot A \cdot (m_i)^{2/3},$$

$$\text{где } A = 0,025 \pi \cdot k^2 \left(\frac{6}{\pi \cdot \rho} \right)^{2/3};$$

ρ плотность частицы, равная $2,5 \text{ г / см}^3$.

Разбиение диапазона масс ведется начиная с массы, способной пробить гладкую оболочку толщиной, равной дюралевому эквиваленту. Далее ряд строится так, что последующая частица имеет массу в 10 раз меньше предыдущей. Ряд заканчивается, когда частица делает кратер, глубина которого меньше среднеквадратичной глубины впадины микронеровностей, являющейся одной из характеристик оптического элемента.

Относительная площадь повреждения, т.е. степень повреждения поверхности эрозией, равна

$$F_{\text{отн}} = \frac{F_{\Sigma}}{F},$$

где F - площадь элемента оптической поверхности

9. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Программа МТОПКА предназначена в основном для учебных целей. Ее можно использовать при выполнении дипломных проектов по проектированию КА различного назначения. Для приобретения навыков по этой тематике в учебных планах в разделе “Проектирование ЛА” запланированы курсовой проект или классная работа на эту тему.

Исходными данными для оценки опасности полета проектируемого КА служат:

- общий вид или габаритный чертеж (или эскиз) КА с разделенными на нем образмеренными отсеками, учитывая, что в программе размеры вводятся в метрах;

- на габаритном чертеже (или отдельно) приводятся данные по конструкции оболочек:

- число слоев;
- толщина каждого слоя;
- материал каждого слоя;

- числа , определяющие разбиение поверхностей на элементы; характеристики орбиты (высота орбиты и ее наклонение). В модели расчета принято, что орбита КА круговая;

- срок активного существования;

- положение КА на орбите. Если КА имеет ось симметрии, то

желательно, чтобы эта ось совпадала с осью Ox скоростной системы координат, а при наличии у КА плоскости симметрии желательно, чтобы ось Oy связанной системы лежала в плоскости XOy скоростной системы. В программе имеется возможность проводить расчет при любом положении осей;

- предполагаемый год запуска КА в космос.

По исполнению расчета в дипломном проекте исходные данные и результаты расчета оформляются отдельным разделом или главой. В курсовом проекте оформляется отчет с пояснительной запиской, содержание и объем которой дается в задании на проектирование КА

Все три программы работают в диалоговом режиме, когда на экране ЭВМ появляются вопросы к пользователю, на которые тот должен ответить, либо появляются различные сообщения, либо высвечивается окно с меню, выполнение пунктов которого должен выбрать пользователь. Чаще всего меню оформляется в виде имеющего название окна с перечнем задач, которые пользователь может выполнить или перейти к выполнению какой-либо процедуры. Пункты подсвечиваются курсором, положение которого меняется нажатием стрелок “вверх/вниз”. Переход на выполнение задания осуществляется нажатием клавиши “Enter” При вводе данных рядом с окном появляется столбец с уже имеющимися в памяти значениями вводимых параметров, а при первом нажатии клавиши “Enter” появляется окошко, в которое надо занести значение вводимого параметра. При повторном нажатии “Enter” это значение переносится в столбец памяти. Каждое меню имеет строку выхода и перехода на дальнейший счет.

Перед началом счета необходимо, особенно если намечается выдача рисунков на принтер, обратиться и выполнить программу, находящуюся в DOS, а именно: DOS \ graphics.com.

Ради удобства желательно для работы заготовить рабочий каталог, в котором разместить файлы:

```
egavga.bgi;  
ummt3_1.exe;  
ummt3_2.exe;  
ummt3_3.exe;  
graph.tpu;  
strcat1.tpu;  
umchvm00.tpu;  
umt00.tpu;
```

При чтении файлов с МД или записи их на него пользователь должен указывать заготовленные ранее имена этих файлов.

Последовательность работы с программами такова, что вначале должны быть введены ИД с занесением их на МД. Затем можно обращаться к другим программам. Желательно перед счетом провести контроль ИД.

Расчет по программам идет в следующем порядке:

Работает программа UMMT3_1.EXE. (Ввод ИД)

п.1. Вызов и запуск программы UMMT3_1.EXE;

п.2. Высвечивается заголовок N 1. Нажать <Enter>;

п.3. Высвечивается заголовок N 2. Если пользователь не знаком с программой (Нажмет <N>), то выдаются краткие сведения о программе, иначе переход к п.4;

п.4. Вызывается меню “Материалы” со строками, выбираемыми пользователем:

- ввод стандартного (см. разд. 2) списка материалов, используемых в конструкции КА. Файл stm.dat имеется на МД;

- формирование или исправление списка материалов с помощью клавиатуры;

- запись на МД или чтение с МД файла , составленного пользователем, со списком материалов;

- выдача для проверки на экран или принтер списка материалов;

- работа со списком материалов закончена. Переход к п.5;

п.5. Вызывается меню “Работа с ИД” со строками:

- вызов с МД сформированных ранее исходных данных по КА;

- ввод вновь или исправление ИД;

- изъятие введенных ранее строк с ИД;

- запись ИД на МД;

- поворот связанных осей КА относительно скоростных;

- восстановление положения связанных осей КА;

- работа с ИД закончена. Переход к п.6;

п.6. Обработка ИД. Вычисление коэффициентов для дальнейшего определения дюралевого эквивалента оболочек отсеков;

п.7. Запрос: Закончить счет (Y/N)? Если надо повторить (Ввод <Y>), то осуществляется переход к п.2;

п.8. Высвечивается заголовок окончания работы программы;

п.9. Выход из программы.

Работает программа UMMT3_2.EXE. (Контроль ИД)

- п.1. Вызов и запуск программы UMMT3_2.EXE;
- п.2. Высвечивается заголовок N 1. Нажать <Enter>;
- п.3. Высвечивается заголовок N 2. Нажать <Enter>;
- п.4. Вызов из МД файла с характеристиками материалов;
- п.5. Чтение с МД файла с ИД;
- п.6. Проведение графического контроля. На экран выдается изображение КА, поверхность отсеков которого разбита на элементы;
- п.7. Если необходимо, то можно выдавать изображение КА на принтер;
- п.8. Если необходимо, то можно выдать ИД на принтер;
- п.9. Если необходимо повторить контроль, то перейти к п.6, иначе - выйти из программы контроля;
- п.10. Высвечивается заголовок окончания работы программы;
- п.11. Выход из программы.

Работает программа UMMT3_3.EXE (Расчет вероятности непробоя и выдача схемы уязвимости)

- п.1. Вызов и запуск программы UMMT3_3.EXE;
- п.2. Высвечивается заголовок N 1. Нажать <Enter>;
- п.3. Высвечивается заголовок N 2. Нажать <Enter>;
- п.4. Чтение с МД файла с ИД;
- п.5. Ввод числа проб для задания распределения случайных векторов подхода метеорных и техногенных частиц к элементам поверхности оболочек отсеков КА;
- п.6. Вызывается меню "Режимы работы" со строками:
 - начало расчета;
 - продолжение и окончание расчета;
выдача результатов расчета на экран и принтер;
выдача схемы уязвимости на экран и принтер;
 - выход из меню. Переход к п.7;
- п.7. Запрос: Закончить счет (Y/N)? Если надо повторить (Ввод <Y>), то осуществляется переход к п.6;
- п.8. Высвечивается заголовок окончания работы программы;
- п.9. Выход из программы.

Если результаты расчета неудовлетворительны, то ввести соответствующие изменения в исходные данные и повторить счет.

10. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ НЕПРОБОЯ КА

В качестве примера расчета вероятности неprobоя КА предлагается тестовый КА UMPRIM, габаритный чертеж которого показан на рис.14.

10.1. Исходные данные КА

Исходные данные примера:

- габаритный чертеж дан на эскизе;
конструкция отсеков и разбиение поверхности на элементы определены описанием;
- орбита круговая, высота орбиты $H_{\text{орб}} = 500$ км;
наклонение орбиты $i = 65^\circ$;
- время активного существования $T_{\text{акт}} = 3$ года;
- ось OX КА совпадает с вектором скорости ;
запуск КА в 2010 году;
- вероятность неprobоя оболочек отсеков КА метеорными и техногенными частицами $P_{\text{нпц}} \geq 0.95$.

10.2. Порядок расчета

Обращение к программе DOS\graphics.com:

Обращение к программе *UMMT3_1.EXE*;

Вызов списка предлагаемых материалов ;

- Выдача списка материалов на экран монитора;
Выдача списка материалов на принтер (табл. 4);
Ввод геометрии КА и данных по конструкции оболочек отсеков;
- Запись ИД на диск.

Обращение к программе *UMMT3_2.EXE*;

- Вызов списка предлагаемых материалов ;
Считывание ИД с МД;
Проведение графического контроля;
Выдача на принтер изометрии КА (рис. 15);
Выдача на принтер геометрических данных КА(табл. 5; 6);
Выдача на принтер данных по конструкции оболочек (табл. 7).

Обращение к программе *UMMT3_3.EXE*;

- Начать счет сначала;
- После прерывания расчета перейти к продолжению счета;
- Выполнить окончание счета ;

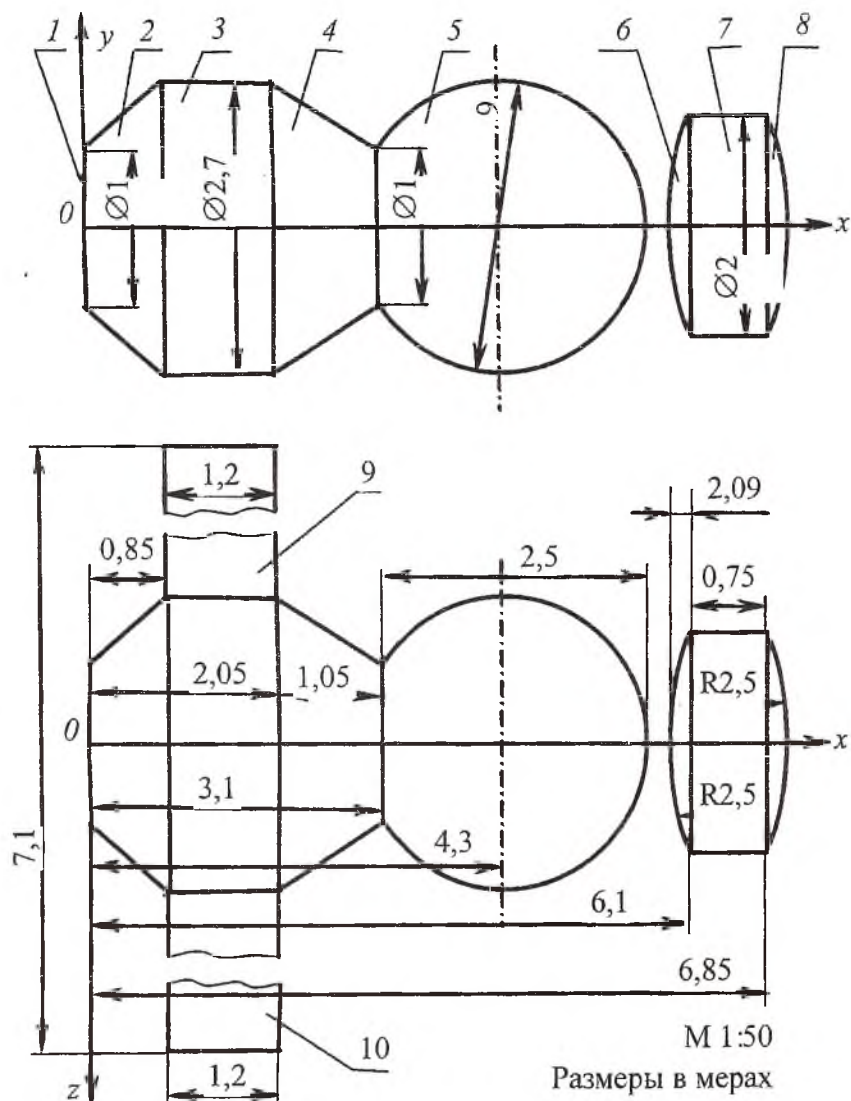


Рис.14. Габаритный чертёж КА UMPRIM :1 - доньшко;

2 - нижний конус; 3 - навесной холодный радиатор (НХР); 4 - верхний конус; 5 - спускаемый аппарат (СА); 6 - нижнее днище навесного отсека; 7 - обечайка навесного отсека; 8 - верхнее днище навесного отсека; 9,10 - солнечные батареи.

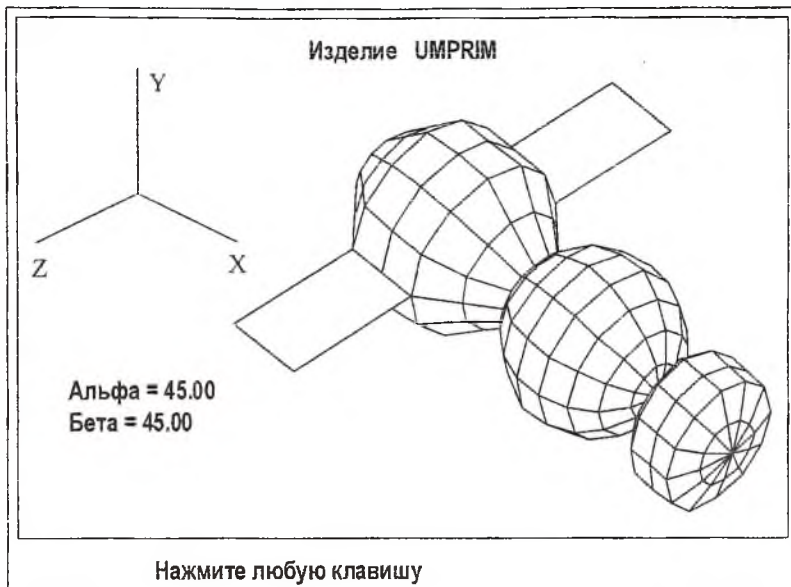


Рис.15. Изометрия КА UMPRIM

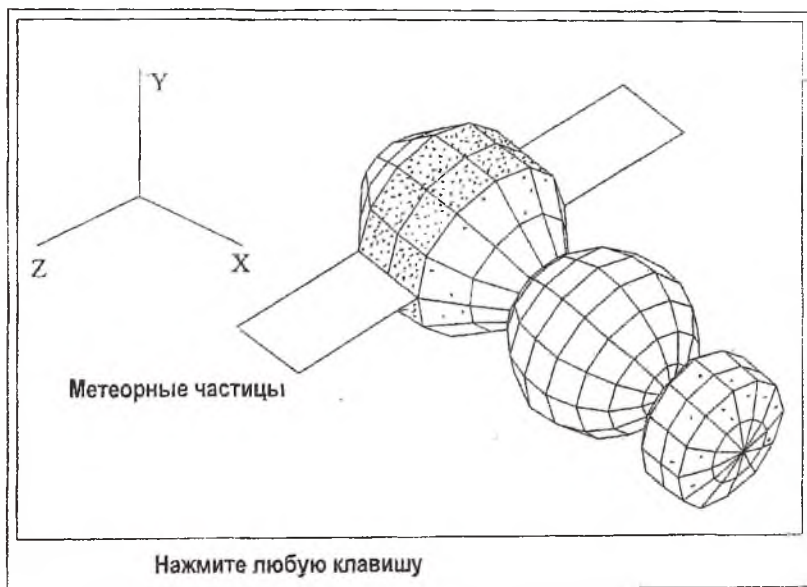


Рис.16. Схема уязвимости КА метеорными частицами

- Выдать результаты расчета на экран;
 Выдать результаты расчета на принтер (табл. 8);
 - Выдать схемы уязвимости метеорными частицами (рис. 16);
 Выдать схемы уязвимости техногенными частицами (рис. 17);

Таблица 4

Изделие imprim.dat
Список используемых материалов

№ п/п	Марка материала	Признак пористости	Плотность, г/куб.м	Модуль упругости, ГПа	Прочность, ГПа
1	Д16АТ	1	2,78	72,000	0,460
2	АД1	1	2,70	70,000	0,120
3	АМГ6	1	2,64	70,000	0,320
4	МА8	1	1,76	43,000	0,300
5	30ХГСА	1	7,85	200,000	1,100
6	Х18Н10Т	1	7,90	190,000	0,900
7	СВИНЕЦ	1	11,34	16,000	0,020
8	ОТ4-1	1	4,55	100,000	0,600
9	СТЕКЛО	1	2,00	50,000	0,300
10	СОЛ	1	1,10	3,0	0,080
11	РЕЗИНА	0	1,20	0,000	0,000
12	УГЛЕПЛАСТ	0	1,55	0,000	0,000
13	ЭВТИ	0	0,02	0,000	0,000
14	ПОРОЛОН	0	0,04	0,000	0,000
15	ПЕНОПЛАСТ	0	0,05	0,000	0,000
16	АСБОТЕКСТ.	0	1,90	0,000	0,000
17	СТЕКЛОТЕКСТ.	0	1,85	0,000	0,000
18	ПТК	0	1,40	0,000	0,000

Таблица 5

Исходные данные (пластина)

№ отс.	A1			A2			A3			A4			Ni	Nj	AF
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4			
10	2.05	0.00	1.35	0.85	0.00	1.35	0.85	0.00	3.55	2.05	0.00	3.55	1	1	0.00
11	0.85	0.00	-1.35	2.05	0.00	-1.35	2.05	0.00	-3.55	0.85	0.00	-3.55	1	1	0.00

Таблица 6

Исходные данные (тело вращения)

№ отс.	A1			A2			A3			R			Ni	Nj	H	ALF	AF	PR
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	R1	R2	R3						
1	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.50	-	12	1	0.00	360	1.00	1
2	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.35	0.50	-	12	2	0.85	360	1.00	1
3	0.85	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.85	1.00	0.00	1.35	1.35	-	12	2	1.20	360	0.15	1
4	2.05	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	2.05	1.00	0.00	0.50	1.35	-	12	2	1.05	360	1.00	1
5	3.10	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	3.10	1.00	0.00	0.00	0.50	1.30	12	8	2.50	360	1.00	1
6	6.10	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	6.10	1.00	0.00	0.00	1.00	2.50	12	2	0.21	360	1.00	1
7	6.10	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00	6.10	1.00	0.00	1.00	1.00	-	12	2	0.75	360	1.00	1
8	6.85	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00	6.85	1.00	0.00	0.00	1.00	2.50	12	2	0.21	360	1.00	1

Исходные данные (слои оболочек)

№ отс.	1 слой		2 слоя		3 слоя		4 слоя	
	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)
1	ЭВТИ	15.00	АМГ6	1.00	АМГ6	2.50		
2	ЭВТИ	15.00	АД1	1.00				
3	АД1	0.80						
4	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.50				
5	АСБО	40.00	АМГ6	3.00				
6	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.00				
7	ЭВТИ	2.00	АМГ6	2.00				
8	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.00				
10отсек		- экран.....					
11отсек		- экран.....					

**Результаты расчета вероятности непробоя корпуса КА
метеорными и техногенными частицами**

№ отс.	F ₃ кв.м	Метеорная опасность		Техногенная опасность		Дэв, мм
		N _{1м}	P _{1м}	N _{1т}	P _{1т}	
1	0.750	5.90E-0003	0.994120	0.0000E+0000	1.0000000	1.27
2	6.790	1.43E-0005	0.999986	3.1014E-0010	1.0000000	12.10
3	10.063	1.98E-0001	0.819964	4.0688E-0005	0.9999593	0.62
4	7.659	9.27E-0003	0.990770	3.1559E-0006	0.9999968	2.59
5	19.681	1.25E-0006	0.999999	2.7558E-0010	1.0000000	37.96
6	3.122	1.23E-0003	0.998773	1.1851E-0009	1.0000000	2.15
7	4.659	1.19E-0002	0.988164	2.6202E-0006	0.9999974	1.88
8	3.122	1.35E-0002	0.986608	6.5016E-0006	0.9999935	2.15

Изделие шпріп

Высота Норб=500.0 км. Срок существования Т срок=1195.0 сут. Расчет метеорно-техногенной опасности. Вероятность непробоя аппарата метеорными частицами Рнпм=0.7863947. Вероятность непробоя аппарата техногенными частицами Рнпт=0.9999470. Общая вероятность непробоя аппарата Рнпо=0.7863530.

На основе результатов расчета вероятности непробоя корпуса КА (см. табл.8) и выданных схем уязвимости метеорными и техногенными частицами (начальное приближение) проводится оценка выбранной конструкции оболочки КА. Если оценка неудовлетворительна, то вводятся в исходные данные соответствующие изменения и проводятся расчеты для последующей оценки принятых решений.

10.3. Последующие расчеты для оценки МТОПКА

После получения результатов расчетов метеорно-техногенной опасности полета КА (МТОПКА) (при очередном приближении к наилучшему сочетанию параметров) проводится очередная ее проверка. При этом особое внимание обращается на наиболее уязвимые места, выявленные при выполнении предыдущих расчетов. Оценке соответствия предлагаемых значений параметров заданным могут подвергаться, в принципе, все параметры:

- летные характеристики;
- орбитальные характеристики;
- состав оборудования и его компоновка;
- конструкция отсеков КА и его механизмов;

экономические параметры;
другие параметры проектируемого КА.

В предлагаемом примере изменению подвергся отсек N 3 -навесной холодной радиатор (НХР). В этом предлагается изменить конструкцию каналов для теплоносителя, заменив овальные, вздутые в листе материалы, на специальные профили (см. вариант V в разд. 4.1). Для удобства счета отсек N3 выполнен трехслойным без каналов, а все каналы -профили, условно для расчета, объединить в отсеке N 9. Расчет проводился согласно правилам разд. 9.1 с выдачей информации на принтер (рис. 18-20, табл. 9-12).

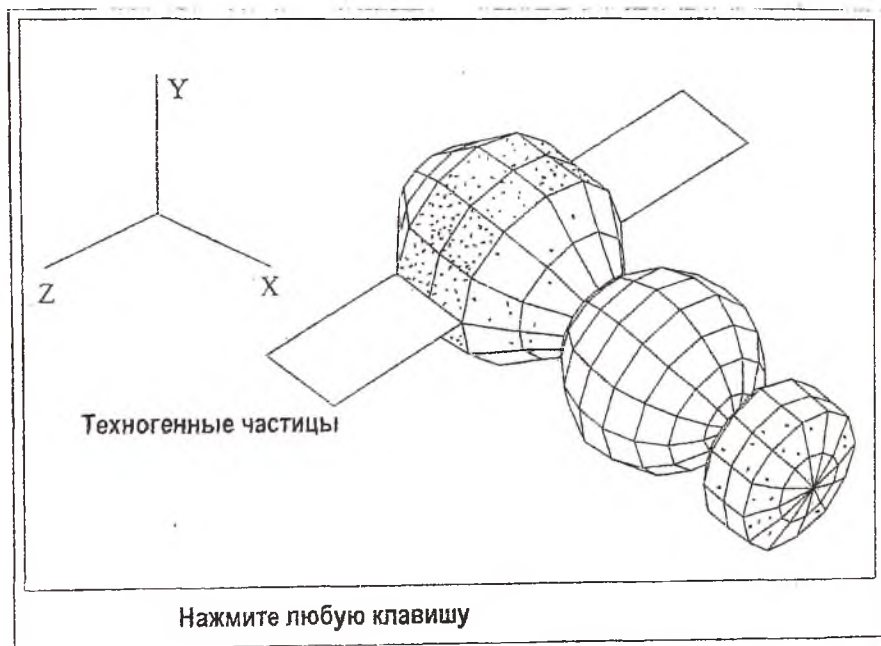


Рис.17. Схема уязвимости КА техногенными частицами

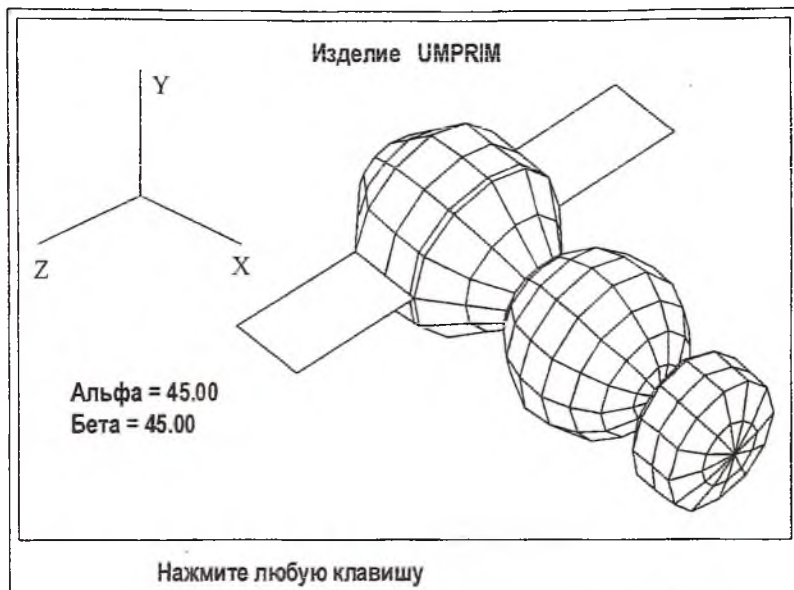


Рис.18 Изометрия КА UMPRIM (второй вариант)

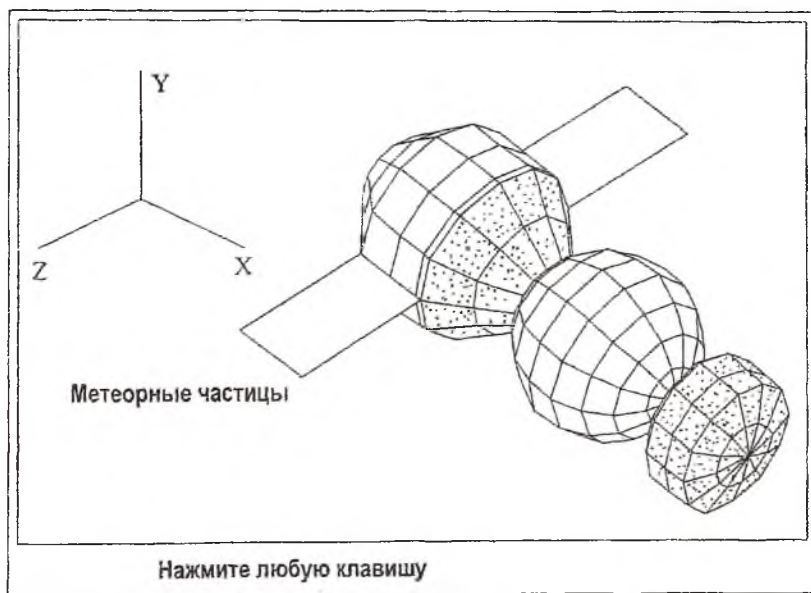


Рис.19. Схема уязвимости КА метеорными частицами (2-й вариант)

Таблица 9

Исходные данные (пластина)

№ отс.	A1			A2			A3			A4			Ni	Nj	AF
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	X4	Y4	Z4			
10	2.05	0.00	1.35	0.85	0.00	1.35	0.85	0.00	3.55	2.05	0.00	3.55	1	1	0.00
11	0.85	0.00	-1.35	2.05	0.00	-1.35	2.05	0.00	-3.55	0.85	0.00	-3.55	1	1	0.00

Таблица 10

Исходные данные (тело вращения)

№ отс.	A1			A2			A3			R			Ni	Nj	H	ALF	AF	PR
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	Z3	R1	R2	R3						
1	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.50	-	12	1	0.00	360	1.00	1
2	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.35	0.50	-	12	2	0.85	360	1.00	1
3	0.85	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.85	1.00	0.00	1.35	1.35	-	12	2	1.20	360	1.00	1
4	2.05	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	2.05	1.00	0.00	0.50	1.35	-	12	2	1.05	360	1.00	1
5	3.10	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	3.10	1.00	0.00	0.00	0.50	1.30	12	8	2.50	360	1.00	1
6	6.10	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	6.10	1.00	0.00	0.00	1.00	2.50	12	2	0.21	360	1.00	1
7	6.10	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00	6.10	1.00	0.00	1.00	1.00	-	12	2	0.75	360	1.00	1
8	6.85	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00	6.85	1.00	0.00	0.00	1.00	2.50	12	2	0.21	360	1.00	1
9	1.93	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	1.93	1.00	0.00	1.35	1.35	-	12	1	0.12	360	1.00	1

Исходные данные (слои оболочки)

№ отс.	1 слой		2 слой		3 слой		4 слой	
	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)	Марка	Толщ. (мм)
1	ЭВТИ	15.00	АМГ6	1.00				
2	ЭВТИ	15.00	АД1	1.00	АМГ6	2.50		
3	АМГ6	0.50	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.50		
4	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.50				
5	АСБО	40.00	АМГ6	3.00				
6	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.00				
7	ЭВТИ	2.00	АМГ6	2.00				
8	ЭВТИ	15.00	АМГ6	2.00				
9	АД1	1.00	АД1	1.00				
10отсек		- экран.....					
11отсек		- экран.....					

**Результаты расчета вероятности непробоя корпуса КА
метеорными и техногенными частицами (второй вариант)**

№ отс.	Fi, кв. м	Метеорная опасность		Техногенная опасность		D экв, мм
		Ni м	Pi м	Ni т	Pi т	
1	0.750	5.90E-00 03	0.994120	0.0000E+0000	1.00000000	1.27
2	6.790	1.43E-00 05	0.999986	3.1014E-0010	1.00000000	12.10
3	9.057	8.00E-00 05	0.999920	1.6317E-0008	1.00000000	9.06
4	7.659	9.27E-00 03	0.990770	3.1559E-0006	0.9999968	2.59
5	19.681	1.25E-00 06	0.999999	2.7558E-0010	1.00000000	37.96
6	3.122	1.23E-00 03	0.998773	1.2851E-0009	1.00000000	2.15
7	4.659	1.19E-00 02	0.988164	2.6202E-0006	0.9999974	1.88
8	3.122	1.35E-00 02	0.986554	6.6217E-0006	0.9999934	2.15
9	1.006	1.30E-00 05	0.999987	1.8181E-0009	1.00000000	8.11

Изделие - шпгim.

Высота Норб=500.0 км. Срок существования T срок=1195.0 сут. Расчет метеорно-техногенной опасности. Вероятность непробоя аппарата метеорными частицами $R_{нпм}=0.9589190$. Вероятность непробоя аппарата техногенными частицами $R_{нпт}=0.9999876$. Общая вероятность непробоя аппарата $R_{нпо}=0.9589070$.

Анализ двух вариантов расчета МТОПКА показал, что второй вариант дает лучший, чем у первого, показатель по варианту непробоя оболочки КА метеорными и техногенными частицами.

Для первого варианта $R_{нпц} = 0,78635$,

для второго варианта $R_{нпо} = 0,9589$

Из этого следует, что во втором приближении изменения допустимы. Тем не менее для улучшения показателя желательно провести еще некоторые изменения.

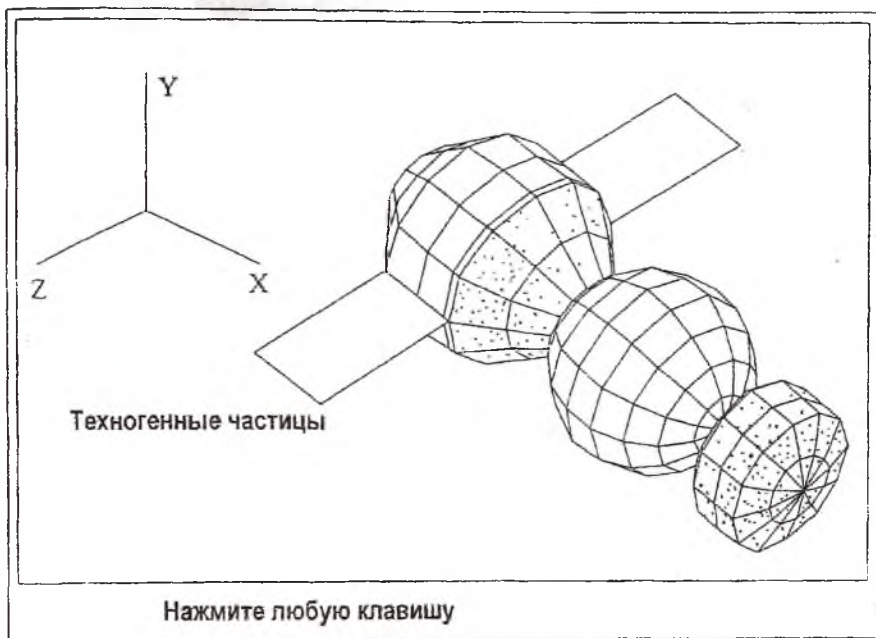


Рис.20. Схема уязвимости КА техногенными частицами (2-й вариант)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Крошкин М.Г. Физико-технические основы космических исследований. - М.: Машиностроение, 1969. - 287 с.

2. Инженерный справочник по космической технике / Под общ. ред. проф. А.В. Солодова. - М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1969. - 693 с.

3. Справочник по безопасности космических полетов / Г.Т. Береговой, В.И. Ярополов, И.И. Бранецкий и др. М.: Машиностроение, 1989. - 336 с.

4. Степанов С.Л., Тимшин В.Т., Юмашев Л.П. Космическая среда и условия пребывания в ней летательных аппаратов: Учебное пособие. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - 76 с.

5. Куренков В.И. Основы безопасности космических полетов: Конспект лекций. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1999. - 68 с.

6. Куренков В.И. Оценка метеорно-техногенной безопасности полета космического аппарата с использованием в панелях навесных холодных радиаторов тепловых труб // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Тр. IX Всерос. науч.-техн. семинара (Самара, 29-30 июня 1999 г.). Самара: Самарский филиал Российской академии космонавтики, 1999. Ч. 2. С. 216-219.

7. Живучесть космических аппаратов в условиях воздействия метеорных и техногенных частиц: Конспект лекций / В.И. Куренков, В.И. Кузнецов, Л.Г. Лукашев, Л.П. Юмашев. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2000. 46 с.

8. Куренков В.И. Математические модели для оценки площади повреждения оптических элементов космических аппаратов при воздействии метеорных и техногенных частиц. // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Тр. X Всерос. науч. техн. семинара (Самара, 26-27 июня 2002 г.). Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. С. 232-236.

Учебное издание

Куренков Владимир Иванович
Лукашев Леонид Григорьевич

Юмашев Леонард Петрович

**ОЦЕНКА МЕТЕОРНО-ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ
ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и н а
Компьютерная верстка О. А. А н а н ь е в

Подписано в печать 28.09.04. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печл. 4,0. Усл. кр.-отг. 4,12. Уч.-издл 4,25.

Тираж 100 экз. Заказ 65 . Арт. С-4/2004.

Самарский государственный аэрокосмический
университет. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного аэрокосмического
университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.