

УДК 629.783

К вопросу оценки метеорно-техногенных воздействий на околоземных орбитах

Добрица Дмитрий Борисович

dobritsadb@laspace.ru

SPIN-код: 4802-1841

Гордиенко Евгений Сергеевич

gordienko.evgenyy@gmail.com

SPIN-код: 7908-1736

Розин Петр Евгеньевич

RozinPE@laspace.ru

SPIN-код: 1671-7820

АО «НПО Лавочкина», Химки, Московская обл., Россия

Аннотация. Рассмотрено соотношение уровней воздействия метеороидов и частиц космического мусора на космический аппарат на низких околоземных орбитах. Разработаны алгоритмы и методы решения задачи расчета вероятности непробоя, позволяющие использовать российские модели пространственного распределения метеороидов и пространственно-временного распределения частиц космического мусора для расчета потока на объект, движущийся по заданной траектории. Отмечены наиболее опасные направления их воздействия на аппарат. Оценка уровня воздействий проводилась на КА в виде условного куба, ориентированного в космическом пространстве.

Ключевые слова: баллистическое уравнение, вероятность непробоя, космический аппарат, космический мусор, метеороиды

Введение. Последние несколько лет космической эры отличаются резким ростом количества запусков на околоземных орбитах, нарастанием опасности космического мусора и ростом интереса к проблематике защиты находящихся на околоземных орбитах КА. В настоящее время требование сохранения работоспособности элементов КА в соответствии с положениями ОСТ 134-1031-2003 включается в технические задания на разрабатываемую космическую технику. Уровень риска определяется расчетным путем на основе актуальных моделей метеороидов и частиц космического мусора с использованием баллистических предельных уравнений (БПУ), определяющих стойкость конструкции к высокоскоростным воздействиям. Актуальной задачей является разработка новых методов и подходов, позволяющих в максимальной степени использовать возможности существующих моделей. С использованием разработанных методик проведена оценка уровня воздействий на КА метеороидов и частиц космического мусора для околокруговых орбит в области низких околоземных орбит. Для всех рассматриваемых траекторий полета проведен расчет плотности потока частиц на грани условного куба стороной 1 м с алюминиевой 1 мм стенкой, ориентированного относительно подвижной связанной с КА системы координат, в виде одиночной и двойной стенки.

Методы и материалы; результаты. При определении скорости столкновения КА с метеороидом необходимо принимать во внимание собственную

орбитальную скорость КА и угол между векторами скорости сталкивающихся объектов. С использованием метеороидной модели определяются интегральные характеристики потоков метеороидов, падающих на открытые поверхности КА — плотность потока, распределение по массе, угол подлета.

Для оценки характеристик потока частиц на КА на основе действующей российской метеороидной модели необходимо определить вектор скорости КА и нормаль к рассматриваемой площадке в системе координат, в которой задано пространственное распределение воздействующих частиц. Разработаны алгоритмы, позволяющие использовать действующие российские модели пространственного распределения метеороидов и космического мусора для определения характеристик потока частиц на рассматриваемый элемент. В качестве исходных данных орбитального полета КА используются параметры орбиты: наклонение, долгота восходящего узла, аргумент перицентра ω , для эллиптических орбит задается высота апогея и эксцентриситет, для круговых — высота. Параметры орбиты КА, задающие ориентировку орбитальной плоскости в пространстве (наклонение, долгота восходящего узла) пересчитываются в эклиптической геоцентрической системе координат. Орбита разбивается на N точек с равным временным шагом $\Delta t = T/N$, где T — период обращения КА. Положение КА на орбите определяется аргументом широты $u = F + \omega$, где F — истинная аномалия, рассчитываемая с использованием уравнения Кеплера. Координаты вектора нормали к выбранной для расчета движущейся площадке задаются в системе координат, связанной с КА, в которой ось абсцисс совпадает с направлением радиус-вектора Земля — КА, ось аппликат — по направлению трансверсальной составляющей вектора скорости КА, а ось ординат дополняет систему до правой тройки векторов. Координаты векторов скорости и нормали к площадке далее определяются в эклиптической геоцентрической системе координат, в которой рассчитываются угловые координаты радианта метеороида и модуля его скорости. Использован алгоритм расчета потока метеороидов на связанную с КА площадку, опорные моменты которого приведены в работе [1].

Учет затенения метеороидов в окрестности Земли осуществляется с помощью анализа заданных направлений подлета частиц. Среди возможных направлений подлета исключаются те, которые перед соударением с КА пересекаются с Землей или ее верхней атмосферой, толщина которой в расчетах составляет 100 км. Эффект затенения алгоритмически реализован с применением углов Эйлера, при этом орбитальные координаты спутника преобразуются к равноденственным геоцентрическим координатам [2].

Расчет воздействий частиц космического мусора проведен на основе методики, изложенной в монографии [3]. Баллистические уравнения используются для выделения пробивающего потока, рассматривая который как реализацию пуассоновского процесса, можно определить вероятность непробоя. Конечным результатом производимых вычислений является величина результирующего пробивающего потока на площадку условного ориентиро-

ванного куба. При использовании критерия повреждения в виде перфорации стенки применялись баллистические предельные уравнения для одностенной и двустенной конструкций [4]. Проведено исследование низких околоземных орбит высотой от 200 до 2000 км с различными наклонениями.

Заключение. Анализ результатов показал, что космический мусор в настоящий момент преобладает в общем пробивающем потоке частиц на орбитах высотой 400–1100 км (выборочно до 1400 км), что сравнимо с зарубежными исследованиями [5]. Усредненное распределение скоростей соударения для частиц космического мусора, построенное для орбиты высотой 400 км, характеризуется наличием участка до 7 км/с, охватывающего интервал низких скоростей и дробления, где защита конструкции в виде добавления переднего тонкостенного бампера отрабатывает свою функцию не полностью. Преимущественно подвергаются воздействиям передняя и боковые по направлению полета грани ориентированного куба. Отдельные рассматриваемые орбиты, например, солнечно-синхронные, могут иметь особенности, связанные с преимущественным воздействием метеороидов на одну из боковых сторон куба.

Список источников

- [1] Добрица Д.Б., Рябова Г.О., Гордиенко Е.С., Симонов А.В. К вопросу оценки метеорной опасности при перелете Земля — Венера. *Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина»*, 2025, № 2, с. 45–53. <https://doi.org/10.26162/LS.2025.20.33.007>
- [2] Крылов В.И. *Основы теории движения ИСЗ (часть первая: невозмущенное движение)*. Москва, МИИГАиК, 2015, 52 с.
- [3] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [4] Ryan S., Christiansen E.L. A ballistic limit analysis programme for shielding against micrometeoroids and orbital debris. *Acta Astronautica*, 2011, vol. 69, no. 5–6, pp. 245–257.
- [5] Moorhead A.V., Matney M. The ratio of hazardous meteoroids to orbital debris in near-Earth space. *Advances in Space Research*, 2021, vol. 67 (1), pp. 384–392.