

УДК 629.78

Выбор параметров траектории и определение аэродинамических нагрузок на надувное тормозное устройство малого космического аппарата при его движении в свободномолекулярном потоке

Гусельников Артем Владимирович^(*)

a.v.guselnikov@gmail.com

Федюнина Екатерина Руслановна

ashikhmina.ekaterin@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена определению нагружения надувной оболочки тормозного устройства микроспутника CubeSat 1U при спуске с рабочей орбиты высотой 500 км. Произведен расчет коэффициента лобового сопротивления связки «микроспутник-надувное тормозное устройство», получены поля давлений и температур при его движении в свободномолекулярном потоке газа с помощью программного комплекса OpenFoam. Построена математическая модель (ММ) движения микроспутника в комплексе Comsol Multiphysics.

Ключевые слова: микроспутник, коэффициент лобового сопротивления, свободномолекулярный поток, надувное тормозное устройство, метод прямого моделирования Монте-Карло

Введение. В настоящее время все большую актуальность приобретает вопрос утилизации отработавших космических аппаратов (КА) на околоземной орбите. По данным на 2024 г. на орбите находится более миллиона объектов космического мусора [1], с каждым годом их количество растет ввиду увеличения числа запусков КА. Часть из них после завершения эксплуатации вводятся на орбиту захоронения. При этом малые КА, например, микроспутники CubeSat, ввиду отсутствия двигателей, после окончания эксплуатации остаются на рабочей орбите, чем представляют опасность для новых КА, так как могут повредить их в результате столкновения.

Одно из решений — увод отработавших микроспутников с орбиты с использованием надувного тормозного устройства (НТУ), представляющего собой тонкую сферическую оболочку из полимерных материалов. НТУ увеличивает аэродинамическое сопротивление конструкции, ускоряет спуск в атмосферу Земли и утилизацию.

При разработке НТУ возникает проблема определения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки в процессе ухода с орбиты. Для этого необходимо определить поля давлений и температур на разных этапах спуска связки «спутник — НТУ». Для их определения необходимо определить траекторные параметры связки и провести моделирование ее обтекания свободномолекулярным потоком газа.

При анализе обтекания НТУ на заатмосферном участке полета долгое время использовались эмпирические зависимости. В конце 20 века Г. Берд

описал теорию, основанную на численном методе прямого моделирования Монте-Карло, заключающуюся в том, что в расчетной области моделируются частицы, включающие в себя определенное количество реальных молекул газа [2]. На основе теории был создан специальный модуль в OpenFoam.

Материалы и методы; результаты. Объект исследования — связка «спутник-НТУ». НТУ представляет собой сферическую оболочку диаметром 3 м [3]. При моделировании аэродинамического обтекания связки в OpenFoam использовалась модель пятикомпонентного газа, состав атмосферы [4]. Моделирование проводилось в стационарной постановке в диапазоне высот 100...500 км с шагом 100 км.

В результате были получены значения коэффициента лобового сопротивления, используемые для определения траекторных параметров связки в ММ модели в Comsol Multiphysics. ММ позволяет вычислить высоту орбиты, скорость и угол отклонения оси аппарата от вектора скорости в любой момент времени. Данные использовались при определении аэродинамических нагрузок на связку.

Определено нагружение связки «микроспутник-НТУ» при спуске с рабочей орбиты высотой 500 км. Получены поля давлений и температур, которые можно использовать для анализа НДС конструкции. Определены коэффициенты лобового сопротивления в диапазоне высот 100-500 км. Построена ММ движения микроспутника в Comsol Multiphysics, которая позволила определить время увода связки с орбиты.

Заключение. Сформулирована методика расчета аэродинамического обтекания НТУ микроспутника на заатмосферном участке полета. Полученные данные могут использоваться в формировании картины НДС аппарата, что позволит рационально выбрать силовой набор НТУ.

Список источников

- [1] *ESA's annual space environment report*. ESA Space Debris Office, 2024, 121 p.
- [2] Bird G.A. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*. Oxford, Clarendon Press, 1994, 458 p.
- [3] Резник С.В., Абрамова Е.Н. Ключевые вопросы создания надувных тормозных устройств для увода вышедших из строя спутников в плотные слои атмосферы. Часть 1. Проектный облик. Движение в разреженной атмосфере. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 101–111.
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-101-111>
- [4] Allen C.W. *Astrophysical Quantities*. Moscow, MIR, 1977, 446 p.