

ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю. В. Голобурда

Белорусский государственный университет, г. Минск;

yuliya.goloburda@gmail.com;

науч. рук. – Н. С. Конева, канд. техн. наук, доц.

В рамках настоящей работы был проведен анализ и моделирование тепловых полей конструкции спутника CubeBel-1 с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics. Данный анализ позволяет на основе трехмерной и двухмерной моделей КА спрогнозировать изменение тепловых характеристик при выполнении космического полета, что очень важно для обеспечения стабильной и долговечной работы КА на околоземной орбите. В результате были получены распределения температур конструкции спутника для двух характерных тепловых режимов, так называемых «горячей» и «холодной» фазы.

Также результаты теплового анализа используются для научных исследований и разработки новых моделей CubeBel. Исследованные модели в дальнейшем могут быть использованы для проектирования систем терморегулирования, охлаждения и оптимизации элементов внутренней структуры CubeSat.

Ключевые слова: CubeSat; наноспутник; тепловой анализ; теплообмен; тепловая модель.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие обозначился существенный рост количества запусков космических аппаратов (КА) формата CubeSat для научных и исследовательских целей. CubeSat – это формат наноспутников, исполненный в виде куба, длина ребра которого составляет 10 см, объем составляет 1 литр, а масса не превышает 1,33 кг. Космический аппарат, выполненный в таком формате, принято обозначать как 1U. Для CubeSat существуют специальные стандарты, в которых определены размеры 1U, 2U, 3U и т.д.

CubeBel-1 относится к КА стандарта 2U CubeSat и разработан командой студентов и молодых ученых Белорусского государственного университета. Основные цели проекта BSUSat-1 – разработка, производство, запуск на низкую околоземную орбиту первого белорусского научно-образовательного спутника CubeSat и последующее сопровождение его орбитальной эксплуатации.

ТЕПЛОВАЯ СРЕДА

В общем случае КА на низкой околоземной орбите непрерывно получает тепло от следующих источников:

- Прямое солнечное излучение;
- Альbedo, или отраженное от планеты солнечное излучение;
- Собственное излучение планет;
- Внутренние источники: приборы КА (полезная нагрузка);
- Излучение от космического аппарата, уходящее в космос [1, с. 232].

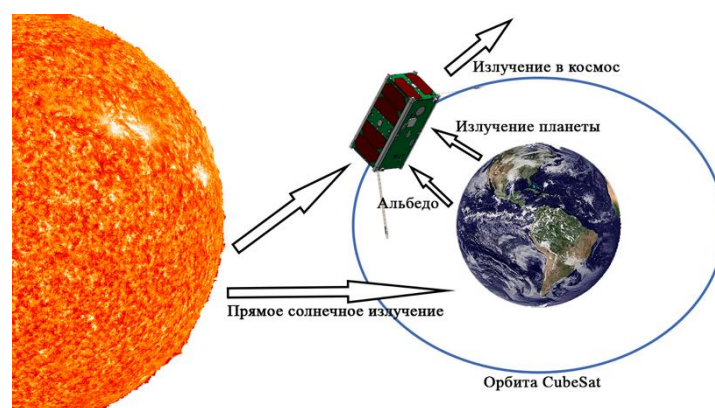


Рис. 1. Тепловая среда CubeSat

Характерной особенностью источников является то, что количество передаваемого ими спутнику тепла не постоянно. Так при заходе спутника в тень планеты исчезает прямое солнечное излучение и альbedo; количество тепла, излучаемого полезной нагрузкой, зависит от режима работы и т.д. В связи с этим выделяют так называемые «горячую» и «холодную» фазы. «Горячая фаза» наступает во время нахождения КА на орбите под прямым солнечным излучением, а «холодная» во время нахождения в тени. Средние тепловые характеристики источников излучения на околоземной орбите приведены в таблице 2 [2, с. 564].

Таблица 1

Тепловые характеристики околоземной орбиты (500 км)

Источник излучения	Горячая фаза	Холодная фаза
Прямое солнечное излучение	1367 Вт/м ²	0
Альbedo (среднее 0,3)	410 Вт/м ²	0
Собственное излучение планеты	237 Вт/м ²	237 Вт/м ²

Из обобщенного уравнения теплового баланса для сохранения энергии:

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{выд}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{солн}} + Q_{\text{альб}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{внутр}} - Q_{\text{изл}} = 0, \quad (2)$$

где $Q_{\text{солн}}$ – тепловой поток от Солнца; $Q_{\text{альб}}$ – тепловой поток альбедо; $Q_{\text{пл}}$ – тепловой поток от Земли; $Q_{\text{внутр}}$ – тепловой поток внутренних источников КА; $Q_{\text{изл}}$ – тепловой поток, излучаемый КА в космос [3, с. 304].

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ CUBEDEL-1 CUBESAT

В COMSOL Multiphysics с использованием модуля теплопередачи была создана нестационарная конечно-элементная модель температурного распределения спутника CubeBel-1. Для построения модели были введены следующие допущения: тепловой поток от элементов электроники предполагался равным нулю, поскольку его значение пренебрежимо мало по сравнению с тепловым потоком от Солнца; тепловой поток от Солнца предполагался постоянным; в качестве геометрии спутника использовался только каркас, а не вся структура КА, который также был упрощен для эффективного построения сетки (Рисунке 7). Упрощенная модель CubeBel-1, была построена в пакете Autodesk Fusion 360 и затем импортирована в COMSOL. Основным материалом каркаса CubeBel-1 является Al 6063-T83. В таблице 2 приведены тепловые свойства данного материала [4, с. 130].

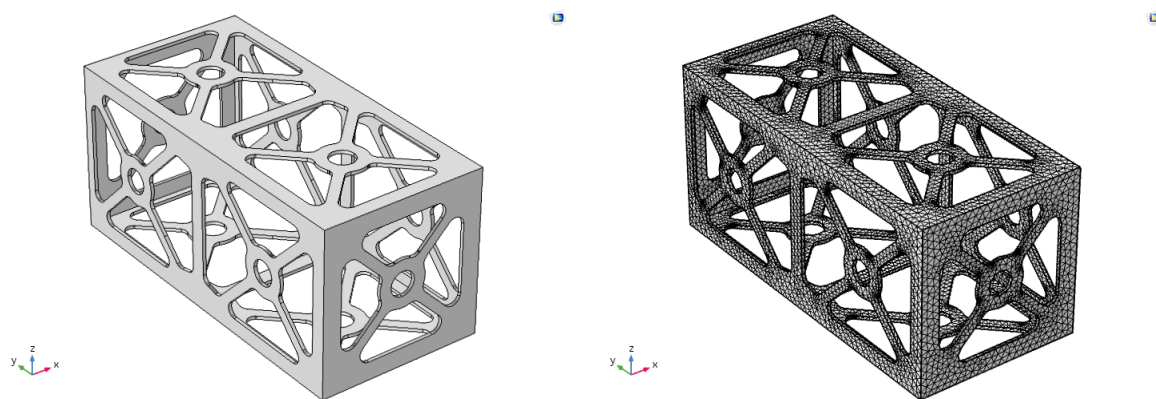


Рис. 2. Каркас (слева) и сетка (справа) CubeBel-1 в COMSOL Multiphysics

Таблица 2

Тепловые характеристики материала

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/кг*К	Теплопроводность, Вт/м*К	ε
Al 6063-T83	2700	900	201	0,77

Модуль Heat Transfer in Solid в COMSOL Multiphysics использовался для решения поставленной теплофизической задачи. Теплопередача между твёрдыми телами определяется уравнением (3), которое используется в COMSOL:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоёмкость материала; T – температура; k – коэффициент теплопроводности; Q – мощность; u – коэффициент теплопередачи между двумя материалами.

Граничные и начальные условия модели включают в себя все параметры, указанные в таблице 1.

В результате было получено распределение температурных полей для двух критических случаев: «горячей» и «холодной» фаз (Рисунок 3). Для «горячей фазы» максимальная температура в момент времени $t=40000$ с составила 457 К, а минимальная – 412 К. Для «холодной фазы» в момент времени $t=25000$ с максимальная температура составила 348 К, а минимальная – 335 К.

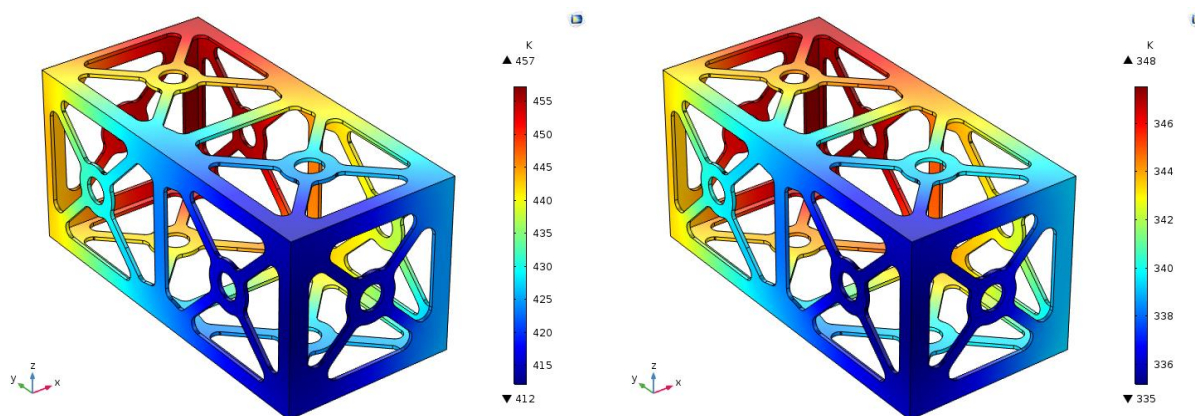


Рис. 3. Распределение температур каркаса спутника:
горячая фаза (слева) и холодная фаза (справа)

По полученным данным был построен график зависимости температуры от времени в четырех точках на поверхности спутника (Рисунок 4), из которого видно, что максимальное значение температуры в установленном режиме приходится на 457 К, минимальное – на 335 К.

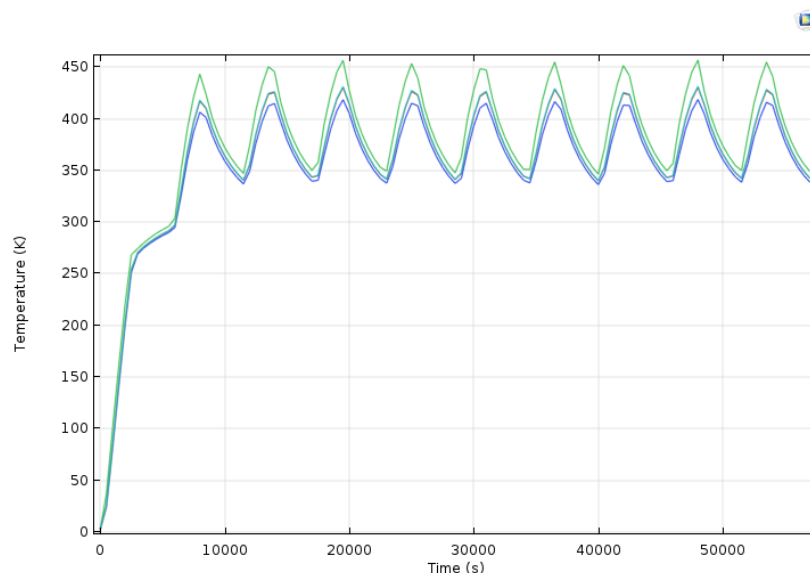


Рис. 4. График зависимости температуры T от времени t в 4 точках на поверхности спутника

В результате проделанной работы был проведен тепловой анализ наноспутника CubeBel-1, а также получена модель распределения тепловых полей каркаса данного спутника на низкой околоземной орбите (500 км) с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics.

- Максимальная температура составила 457 K;
- Минимальная температура – 335 K;

Анализ показал, что конструкция спутника поддерживает рабочий температурный диапазон в условиях солнечного излучения, таким образом была подтверждена эффективность использования материала Al 6063, поскольку полученный в результате диапазон температур согласуется с рабочим диапазоном температур Al 6063.

Библиографические ссылки

1. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. М., 1980.
2. Кондратьев К. Я. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. М., 1969.
3. Панкратов Б. М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. М., 1988.
4. Аксаментов В. А., Беднов С. М., Залетаев С. В. Руководство для конструкторов по обеспечению тепловых режимов. М., 1988.