

УДК 519.6;004.942

Моделирование тепловых режимов космического аппарата на основе параллельной реализации метода конечных объемов

Кададова Анастасия Владимировна

akadadova@gmail.com

SPIN-код: 6317-9650

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрен программный комплекс для моделирования тепловых режимов космического аппарата. Представлено преобразование модели в равномерную трехмерную сетку, что позволяет напрямую применять метод конечных объемов и распараллеливать вычисления. Представлены методы прямой и обратной трассировки лучей, ускорение расчетов достигается за счет BVH-структур, алгоритма Мёллера — Трумбора и параллельных вычислений. Численная верификация составила расхождение, не превышающее 1,5 %. Сделаны выводы о применимости комплекса для анализа тепловых режимов спутников.

Ключевые слова: тепловое моделирование, вокселизация, трассировка лучей, космический аппарат, численные методы, параллельные вычисления

Введение. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов (КА) требует учета сложной геометрии спутника и комбинированных внешних и внутренних тепловых воздействий. Традиционные методы, основанные на поверхностных CAD-моделях и нерегулярных сетках, приводят к значительному росту вычислительных затрат при расчете радиационного обмена и теплопереноса, особенно для конструкций с большим количеством мелких деталей.

Актуальность работы определяется потребностью в высокопроизводительных отечественных инструментах теплового анализа, способных масштабироваться на GPU и обеспечивать расчет тепловых режимов для геометрически сложных КА. Предлагаемый подход направлен на создание программного комплекса (ПК), объединяющего вокселизацию, ускоренную трассировку лучей и параллельный тепловой расчет в единой архитектуре. Научная значимость определяется повышением производительности моделирования при сохранении требуемой точности.

Методы и материалы; результаты. В основе комплекса используется вокселизированное представление геометрии, при котором исходная модель, импортируемая в формате STL, преобразуется в равномерную трехмерную сетку кубических элементов. Каждый воксель рассматривается как контрольный объем. Такое представление упрощает обработку соседних связей и позволяет независимо обновлять состояние каждой ячейки, что делает задачу естественно параллелизуемой на GPU [1].

В ПК реализовано моделирование солнечного излучения и теплового воздействия от инфракрасных излучателей, выполненных без применения отражателей. Для моделирования попадания излучения от цилиндрических излучателей используется метод трассировки лучей с дискретизацией источника.

Для моделирования солнечного излучения в ПК включены два метода трассировки лучей — прямая и обратная. Для ускорения расчетов применяются алгоритм Мёллера — Трумбора и структура BVH на основе AABV-деревьев [2]. Это снижает количество проверок пересечений и повышает масштабируемость вычислений.

Расчет теплопереноса реализован методом конечных объемов на основании уравнения Фурье — Кирхгофа в нестационарной форме [3]. Применяется явная временная схема, при которой температура каждого вокселя обновляется на основе потоков через его грани [4].

В ПК предусмотрено добавление нагревательных элементов КА с возможностью задания их основных параметров. Реализованы три режима работы: постоянный, циклический и нециклический. Для анализа распределения температуры применяется система виртуальных датчиков. Датчик привязывается к конкретному вокселю, фиксирует динамику его температуры и выводит данные в виде временных графиков.

ПК выполнен на C++ с использованием OpenCL с пользовательским интерфейсом на Qt. Визуализация результатов выполняется отдельным модулем на языке Python.

Заключение. Верификация показала, что результаты моделирования в ПК согласуются с расчётами SolidWorks Flow Simulation с отклонением менее 1,5 %. Разработанный ПК позволяет выявлять локальные зоны перегрева, области затенения и особенности распределения тепловых потоков. В дальнейшем планируется учет вторичного излучения и проведение сопоставления с результатами тепловакуумных испытаний КА.

Список источников

- [1] Зверев А.В., Ипатов Д.Е. Моделирование взаимодействия излучения со средой в программном комплексе симуляции трехмерных динамических сцен. *Успехи прикладной физики*, 2023, т. 11, № 5, с. 433–445.
<https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-5-433-445>
- [2] Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection. *Journal of Graphics Tools*, 1997, vol. 2, no. 1, pp. 21–28.
- [3] Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. Москва, МЭИ, 2003, 228 с.
- [4] *Method Finite Volume — реализация на примере теплопроводности* URL: <https://habr.com/ru/articles/276193/> (дата обращения 05.11.2025).