

## Применение метода трассировки лучей при моделировании тепловакуумных испытаний космического аппарата с использованием имитатора солнечного излучения

А.А.Филатов, С.Б. Нестеров

Российское научно-техническое вакуумное общество им. академика С.А.Векшинского,  
Москва

[anthonyfilatov@gmail.com](mailto:anthonyfilatov@gmail.com)

Обсуждается возможность применения метода трассировки лучей для моделирования эффектов лучевого теплопереноса при проведении тепловакуумных испытаний с использованием имитатора солнечного излучения. Предположение строится на возможности импортирования 3D-модели вакуумной установки и упрощенной 3D-модели испытуемого космического аппарата в лучевую модель. Учет оптических свойств поверхностей вакуумной установки и КА (поглощение, рассеяние, зеркальное отражение) позволяет с хорошей точностью смоделировать лучистые потоки на интересующих поверхностях. Данный подход позволяет оптимизировать проведение ТВИ с точки зрения расположения КА внутри ВУ, режимов испытаний и предъявления требований к точности воспроизведения факторов космического пространства.

**Ray tracing approach applied to the modelling of the thermal vacuum test of a spacecraft using Solar Simulator A.A. Filatov, S.B. Nesterov.** This research considers application of the ray tracing method for the modelling of radiation heat transfer effects in thermal vacuum testing experiments using Sun Simulator. The proposed approach is based on importing 3D model of the vacuum chamber and (simplified) 3D model of the spacecraft under test into the ray model. Consideration of the optical properties of the vacuum chamber surface and the spacecraft surface (absorption, dispersion, mirror reflection) enables to simulate radiation flux on the spacecraft surfaces with good precision. This approach enables optimization of spacecraft Thermal Vacuum Testing experiments relating to the spacecraft positioning within the vacuum chamber, testing modes, and Space condition simulation accuracy.

Увеличение срока активного существования КА приводит к необходимости широкого использования негерметичных платформ. Теплофизические особенности негерметичных КА предъявляют специфические требования к стендам для их испытаний, в частности к криоэкранам и имитаторам солнечного излучения [1,2]. Данный вопрос детально рассмотрен в статье [3]. Одним из требований к имитатору солнечного излучения является возможность формирования на испытуемом изделии зон с различными значениями плотности мощности солнечной радиации. Неоднозначность формирования полей освещенности на поверхности негерметичного КА со сложной топологией и многочисленными затенениями одними герметичными объемами других заставляет искать способ взаимной верификации расчетной модели имитатора солнечного излучения и модели термовакуумных испытаний.

Имитатор солнечного излучения предназначен для создания в объеме вакуумной камеры параллельного пучка лучей с равномерным распределением энергетической освещенности в его поперечном сечении, с минимальной расходимостью (непараллельностью) и со спектром, близким к внеатмосферному спектру солнечного излучения. Таким образом, к параметрам, определяющим точность воздействия факторов космического пространства, применительно к имитатору солнечного излучения, следует отнести следующие параметры:

- величина энергетической освещенности (плотности мощности);
- неравномерность энергетической освещенности в плоскости;
- неравномерность энергетической освещенности в объеме;
- непараллельность;
- отклонение от спектра внеатмосферного солнца.

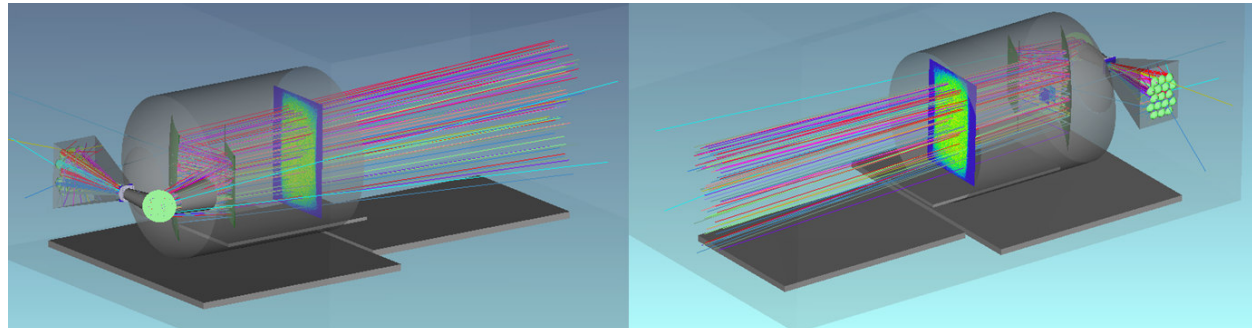
Типичными значениями приведенных параметров, принятыми в практике тепловакуумных испытаний, являются следующие:

- величина энергетической освещенности (плотности мощности) 1440...2880 Вт/м<sup>2</sup>;
- неравномерность энергетической освещенности в плоскости 5...10%;
- неравномерность энергетической освещенности в объеме 10...20%;
- непараллельность 2...4 град. (полный угол);
- отклонение от спектра внеатмосферного солнца 5...10%;

Современные программные средства для расчета хода лучей являются не только мощным инструментом для проектирования и моделирования оптических систем, в частности имитаторов солнечного излучения, но могут быть использованы для моделирования некоторых аспектов термовакуумных испытаний.

Поясним сказанное, рассмотрев типичные стадии проектирования имитатора солнечного излучения для термовакуумных испытаний космических аппаратов:

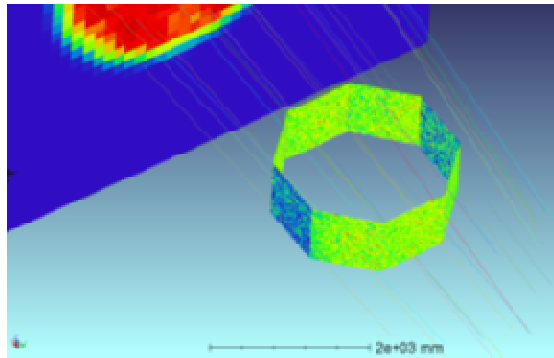
- выбор типа светооптической схемы (осевая или внеосевая) в зависимости от компоновки вакуумной установки;
- габаритный расчет светооптической схемы с учетом компоновки вакуумной установки и компоновки имитатора солнечного излучения относительно нее;
- упрощенная лучевая модель светооптической схемы (точечные источники излучения, оптические поверхности заданы встроенными в программу проектирования примитивами, минимальный набор детекторов, основные компоненты вакуумной установки также могут быть заданы встроенными примитивами);
- уточненная лучевая модель (модель источника, основанная на измерениях реальной ксеноновой лампы, учет спектральных характеристик покрытий, учет френелевских потерь на преломляющих поверхностях, задание коллимирующего зеркала составляющими его сегментами);
- полная лучевая модель (добавление в предыдущую модель 3D-моделей корпуса вакуумной установки, криозкранов, элементов поворотных механизмов и задание на них оптических свойств – спектральных коэффициентов зеркального/диффузного рассеяния и поглощения, учет рассеянного света на зеркальных покрытиях).



*Рис. 1. Лучевая модель имитатора солнечного излучения, предусматриваемого в составе комплекса ГВУ-100.*

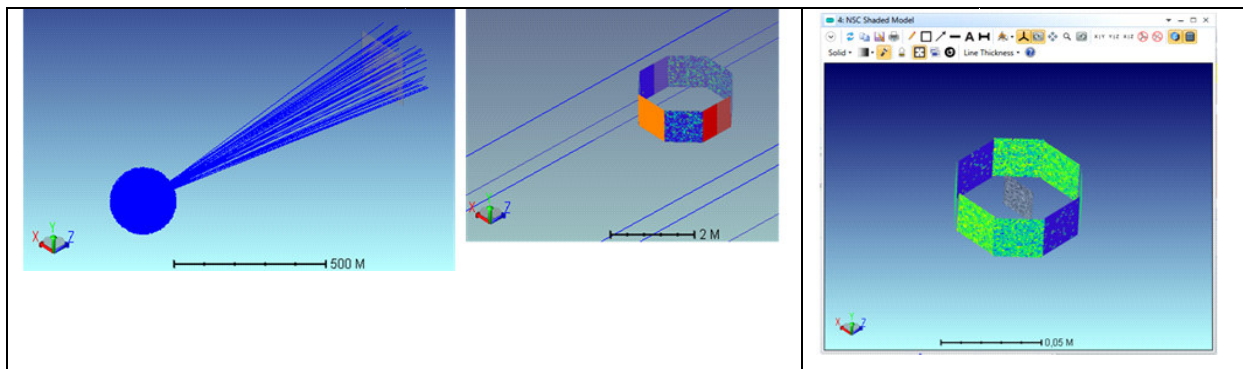
Фактором, требующим отдельного рассмотрения, является величина непараллельности светового потока. Во-первых, имитаторы, как правило, не оснащаются средствами для измерения непараллельности светового потока, поэтому оперировать приходится лишь данными модели трассировки лучей через светооптическую модель имитатора. Во-вторых, практически невозможно построить крупногабаритный имитатор, который обеспечивал бы непараллельность в 32 угл.мин., соответствующую угловому размеру Солнца; при самой рациональной светооптической схеме эту величину удастся сохранить в диапазоне 2-4 град. (полный угол). В-третьих, учесть характер взаимодействия непараллельного пучка с реальной поверхностью КА (особенно, негерметичного, с многочисленными участками затенения одного герметичного объема другим) можно только путем предварительного моделирования, когда 3D-модель КА импортируется в модель трассировки лучей солнечного имитатора и на интересующих поверхностях КА вычисляется угловое и линейное распределения энергетической освещенности, а также суммарный лучистый поток.

Эффект влияния непараллельности пучка излучения в имитаторе солнечного излучения на тепловой тест можно проиллюстрировать при помощи вычислительного эксперимента, в котором определяются значения лучистого потока на некоторых поверхностях космического аппарата в случае испытаний его с имитатором солнца и в случае облучения непосредственно Солнцем. В качестве примера примем космический аппарат в форме восьмиугольной призмы, как показано на рис. 2. Модель КА облучается пучком от имитатора солнечного излучения со значением  $1378 \text{ Вт/м}^2$  и углом непараллельности  $\pm 4$  град.



*Рис.2. Лучевая модель облучения КА с использованием имитатора солнечного излучения.*

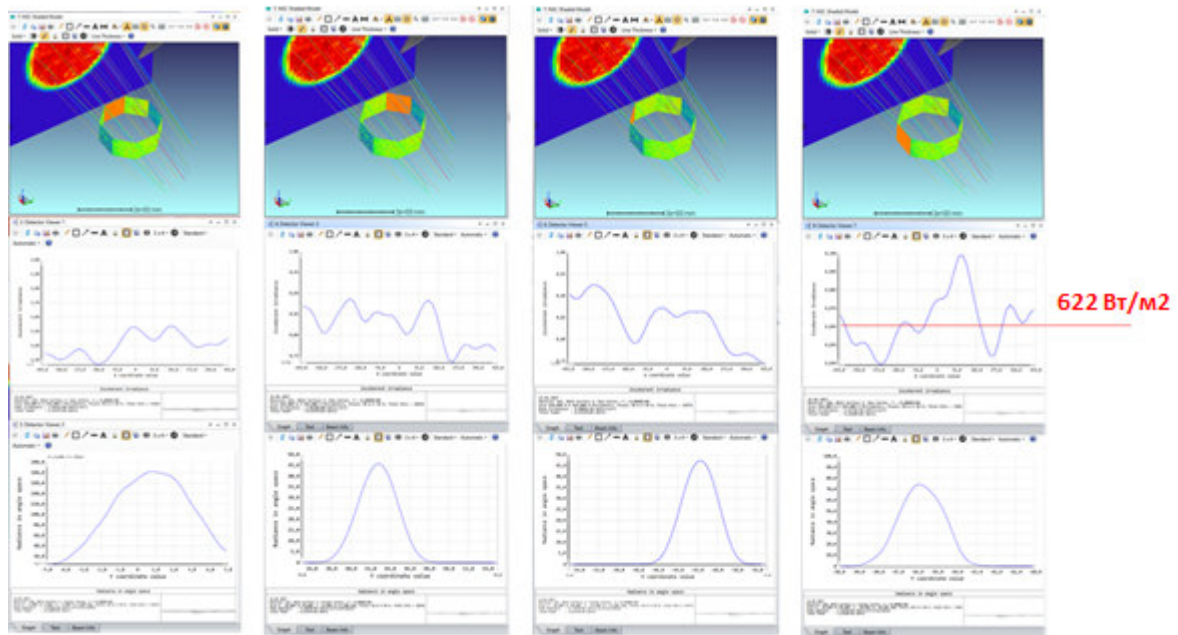
Представленная на рисунке модель космического аппарата состоит из восьми прямоугольных детекторов-плоскостей, для которых рассчитывается количество лучей, их пересекающих. В следующей модели (см. рис. 3) модель космического аппарата облучается источником, моделирующим реальное Солнце.



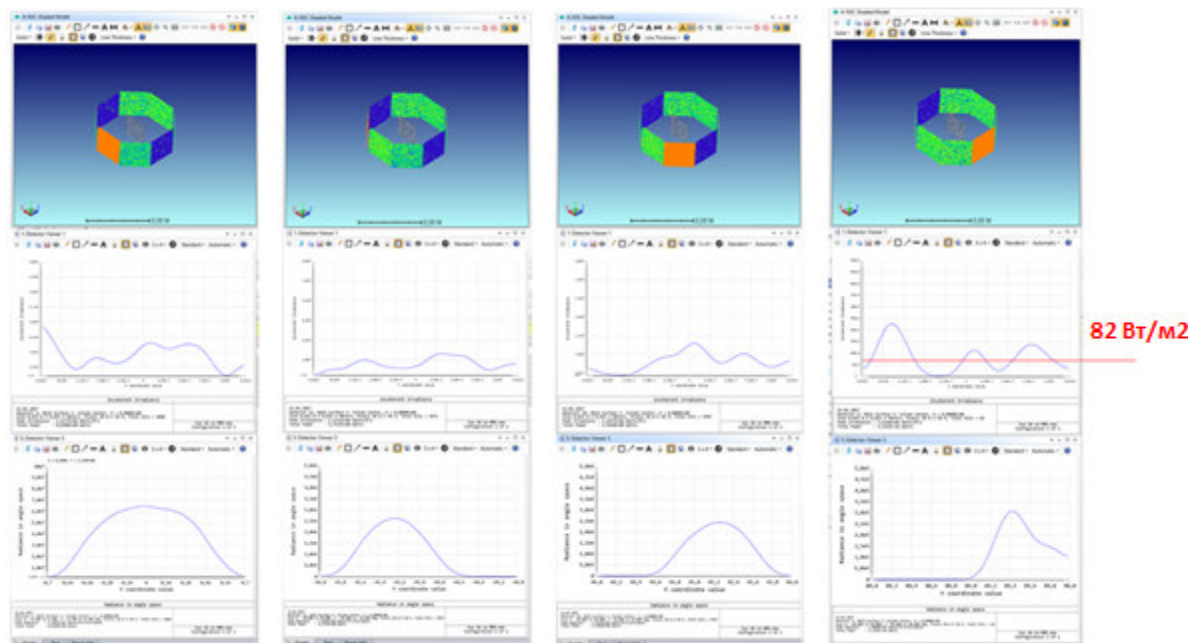
*Рис.3. Лучевая модель облучения КА источником, моделирующим реальное Солнце.*

Однако, такая модель требует масштабирования для получения достаточного количества лучей от источника излучения на тестируемой поверхности. При попытке задать источник, моделирующий реальное Солнце, с диаметром  $1,39 \cdot 10^6 \text{ км}$ , расположенный на расстоянии  $1,496 \cdot 10^8 \text{ км}$ , ни один луч от источника не достигнет детектора с размерами, например  $2 \times 2 \text{ м}$ . Это обусловлено ограничениями на количество лучей, задаваемых в модели из-за ограничений на быстродействие компьютера и объема оперативной памяти.

На рис. 4 и 5 приведены результаты моделирования распределений энергетической освещенности на четырех передних (обращенных в сторону источника излучения) поверхностях КА. Для трех поверхностей, расположенных перпендикулярно к направлению на источник, либо под углом к нему, моделирование приводит к одинаковым величинам средней энергетической освещенности на этих поверхностях. Однако, для поверхности, расположенной параллельно направлению на источник, т.е. находящейся в тени, освещенность, создаваемая имитатором солнечного излучения, почти в восемь раз превышает значение освещенности от реального Солнца.



*Рис.4. Результаты моделирования распределения энергетической освещенности на различных поверхностях КА при облучении его пучком от имитатора солнечного излучения.*

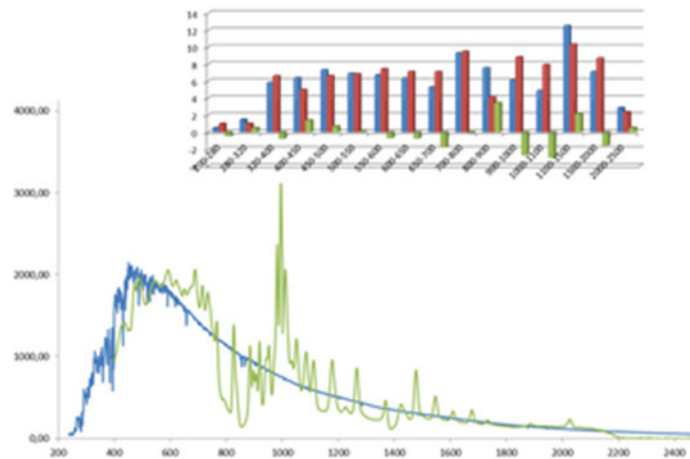


*Рис.5. Результаты моделирования распределения энергетической освещенности на различных поверхностях КА при облучении его пучком от источника, моделирующего реальное Солнце.*

Следующим соображением в пользу объединения лучевой модели имитатора и вакуумной установки с теплофизической моделью КА является возможность учета слабых световых полей, детектирование которых в реальных испытаниях напрямую невозможно из-за их крайне малых значений. Представим ситуацию, когда фронтальная часть КА облучается пучком излучения от имитатора. При диаметре пятна, например, в 6 метров, суммарная мощность светового потока, выделяемая в пределах этого пятна на мишени, составляет  $(6\text{ м})^2 \cdot 0.785 \cdot 1378 \text{ Вт/м}^2 \approx 39 \text{ кВт}$ . Из-за эффектов рассеяния излучения на стенках вакуумной камеры, криоэкранах, зеркальном покрытии коллимирующего зеркала, френелевских отражений от преломляющих поверхностей элементов светооптической схемы, отражения от экрано-вакуумной изоляции интегральные фоновые засветки на боковых поверхностях КА,

находящихся в тени прямого пучка, могут достигать величин в единицы и десятки Вт. В случае необходимости поддержания на этих поверхностях температур близких к температуре кипения азота, теплоприток даже в единицы Вт может существенно влиять на температуру этих поверхностей. Очевидно, что экспериментальное измерение интегрального лучистого потока величиной даже в десятки Вт на поверхности площадью в несколько квадратных метров возможно представляет собой нетривиальную задачу. Можно представить эксперимент, при котором проводятся измерения температуры в нескольких точках поверхности. В первом случае измерения проводятся при выключенном имитаторе, во втором – при включенном. Затем из разности температур определяется величина лучистого теплопритока на заданную поверхность. Однако, гораздо проще определить величину такого фонового лучистого потока при помощи модели трассировки лучей. Для корректного расчета такой модели требуется задание в ней оптических свойств поверхностей объектов, находящихся внутри вакуумной установки.

Лучевая модель позволяет также оценить влияние точности воспроизведения спектра Солнца. Используемые в имитаторах Солнца короткодуговые ксеноновые лампы являются наиболее близкими к реальному Солнцу с точки зрения спектра излучения источниками. Рисунок 6 показывает сравнение спектра ксеноновой лампы со спектром реального Солнца.



*Рис. 6. Сравнение спектров ксеноновой лампы со спектром внеатмосферного Солнца.*

Для такого сравнения достаточно задать спектр источника в рассмотренных выше моделях и вычислить долю мощности, сосредоточенной в заданном спектральном диапазоне, попадающей на рассматриваемую поверхность КА.

В случае успешного преодоления вычислительных проблем при создании лучевой модели КА в вакуумной камере с имитатором солнечного излучения, следующим шагом могло бы стать создание еще более сложной модели, включающей в себя тепловые и газодинамические аспекты ТВИ. Для объединения лучевой и тепловой моделей должен быть отлажен интерфейс передачи данных из лучевой модели (например, из ZEMAX® или LightTools®) о величинах и распределениях теплопритоков, обусловленных излучением имитатора солнца и излучением нагретых тел в вакуумной установке, дающих вклад в радиационный теплообмен, в тепловую модель (например, ANSYS®) для расчета и моделирования эффектов тепло- и массопереноса.

## **Выводы**

Современные программные средства для расчета хода лучей являются не только мощным инструментом для проектирования и моделирования оптических систем, в частности имитаторов солнечного излучения, но могут быть использованы для моделирования некоторых аспектов термовакuumных испытаний. Импорт модели КА в лучевую модель имитатора солнечного излучения совместно с моделью вакуумной установки открывает путь к построению еще более общей модели тепловакuumных испытаний, охватывающей не только

возможность моделирования полей освещенности на испытуемом КА, но и моделирование эффектов тепло- и массопереноса внутри вакуумной установки.

#### Литература

1. С.В.Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А.Романько, Н.А.Тестоедов, В.И.Халиманович, В.В.Христинич. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов. М.: НОБЕЛЛА, 2012. – 31 с.
2. С.В.Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А.Романько, Н.А.Тестоедов, В.И.Халиманович, В.В.Христинич. / Под редакцией профессора, д.т.н. Нестерова С.Б. Расчет и конструирование криозкранов стендов для тепловой отработки и испытания космических аппаратов. – М.: НОБЕЛЛА, 2013. 89 с.
3. А.Ю.Вшивков, С.В. Кравченко, С.А.Крат, С.Б.Нестеров, А.А.Филатов, В.И.Халиманович, В.В.Христинич.Тепловакуумные испытания современных космических аппаратов. Вакуумная техника и технология. «Унивак», 2011. Том 21. №3.С.171-176.

## **Экспериментальные исследования воздухозаборника в высокоскоростном потоке газа**

*А.И.Ерофеев, А.П.Никифоров, В.В.Плугин  
г. Жуковский, МО, ФГУП ЦАГИ, ул. Жуковского, 1.  
E-mail: alex.ivan.erofeev@gmail.com*

*Представлены результаты экспериментальных исследований моделей воздухозаборников в вакуумной установке ВАТ-103 ЦАГИ. Измерялась плотность газа в накопителе в свободномолекулярных потоках азота и гелия. Показано, что схема диффузного отражения молекул от поверхности хорошо описывает экспериментальные результаты.*

*Experimental studies of air intake in high-speed gas flow. A. I. Erofeev, A. P. Nikiforov, V.V. Plugin. The results of experimental studies of air intakes models in a vacuum wind tunnel are presented. The density of the gas at the storage was measured in the free-molecular flow of nitrogen and helium. It is shown that the model of diffuse reflection of molecules from the surface gives a good description of the experimental results.*

Изучение процессов в воздухозаборниках базируется на следующем представлении об отборе воздуха из атмосферы [1-4]. Рассматривается стационарный режим обтекания при полете КА по круговой орбите в условиях свободномолекулярного обтекания в одно- или многокомпонентной атмосфере. Общая схема возможного устройства забора атмосферных газов (УЗАГ) приведена на рис. 1.

Входящий в воздухозаборник газ (на схеме - в конфузоре, площадь входного отверстия –  $A_1$ ), имеющий скорость  $V_\infty$ , плотность  $n_\infty$  и температуру  $T_\infty$ , попадает в накопитель. В результате столкновений молекул со стенками в накопителе газ замедляется и приходит в равновесное состояние с температурой  $T_2$ , равной температуре стенок. Газ из накопителя через отверстие  $A_2$  вылетает обратно в атмосферу, а через отверстие  $A_3$  может быть отобран для использования в двигательной установке.