

СЕКЦИЯ 5. ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Имитация «холодного» Солнца: моделирование теплопритоков к космическому аппарату при проведении термовакуумных испытаний

*С.Б. Нестеров, П.Г. Смирнов, А.А. Филатов
Москва, РНТВО им. академика С.А. Векинского*

Элементы оптической схемы имитатора солнечного излучения в ходе работы подвергаются существенным лучевым нагрузкам и могут нагреваться без принятия должных мер по их охлаждению. Нагреваясь, они становятся источниками теплового излучения, которое может приводить к нежелательным теплопритокам к объекту испытаний. Статья посвящена расчету величин таких паразитных теплопритоков, моделированию характеристик теплопритоков к объекту испытаний. Также в статье рассматриваются способы минимизации паразитных теплопритоков. Особенное внимание уделено вопросам охлаждения коллимирующего зеркала. Обсуждаются вопросы мультифизического моделирования, включающего в себя моделирование расчета хода лучей и теплофизическое моделирование.

Simulation of the “cold” Sun: modeling of heat inflows to the spacecraft during thermal vacuum tests. S.B. Nesterov, P.G. Smirnov, A.A. Filatov. During operation, the elements of the optical circuit of a solar radiation simulator are exposed to significant radiation loads and can be heated without taking proper measures to cool them. When heated, they become sources of thermal radiation, which can lead to undesirable heat inflows to the test object. The article is devoted to calculating the values of such spurious heat inflows, modeling the characteristics of heat inflows to the test object. The article also discusses ways to minimize spurious heat inflows. Particular attention is paid to the cooling of the collimating mirror. The issues of multi-physical modeling are discussed, including the simulation of the calculation of the rays path and thermo-physical modeling.

Введение

Традиционно, оптическая схема имитатора солнечного излучения включает в себя осветительную часть, интегратор, иллюминатор и коллимирующее зеркало. Типичная компоновка ИСИ с внеосевым зеркалом показана на рис. 1. Рассмотрим функциональное назначение частей ИСИ, сосредоточив внимание на оптических и тепловых аспектах, не углубляясь в вопросы электрики, электроники и системы управления.

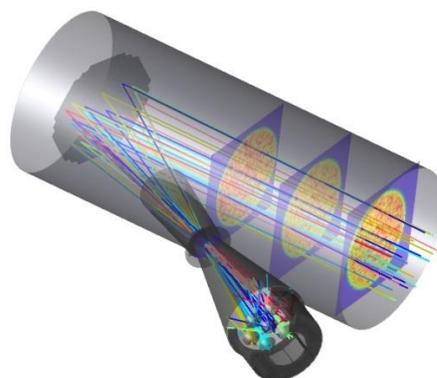


Рис. 1. Пример компоновки ИСИ с внеосевым коллимирующим зеркалом.

Моделирование тепловых нагрузок на оптические элементы ИСИ при помощи лучевой модели

Осветительная часть представляет собой набор короткодуговых ксеноновых ламп с отражателями, формирующими квазипараллельный пучок излучения от каждой из лампы. Эти пучки вводятся в интегратор, который включает в себя два линзовых массива. Интегратор выравнивает распределение энергетической яркости в пучке, который затем преобразуется коллимирующим зеркалом в квазипараллельный пучок, направляемый на объект испытаний. Благодаря интегратору и некоторым приемам рационального проектирования оптической схемы, выходной пучок обеспечивает высокую степень равномерности энергетической освещенности как в плоскости, так и в некотором объеме. Под объемной равномерностью понимается равномерность, одновременно достигаемая сразу в нескольких плоскостях, перпендикулярных направлению распространения излучения. Так, на рисунке 1 показаны три такие плоскости в зоне установке объекта испытаний.

Путем моделирования хода лучей через оптическую схему ИСИ можно смоделировать величины лучистых потоков на оптических элементах схемы. В приведенном моделировании принимается радиометрическая мощность ламп, обеспечивающая уровень энергетической освещенности в 2 кВт/м² в круглом пятне диаметром 2 м. На рис. 2 показано распределение энергетической освещенности в плоскости перед интегратором.

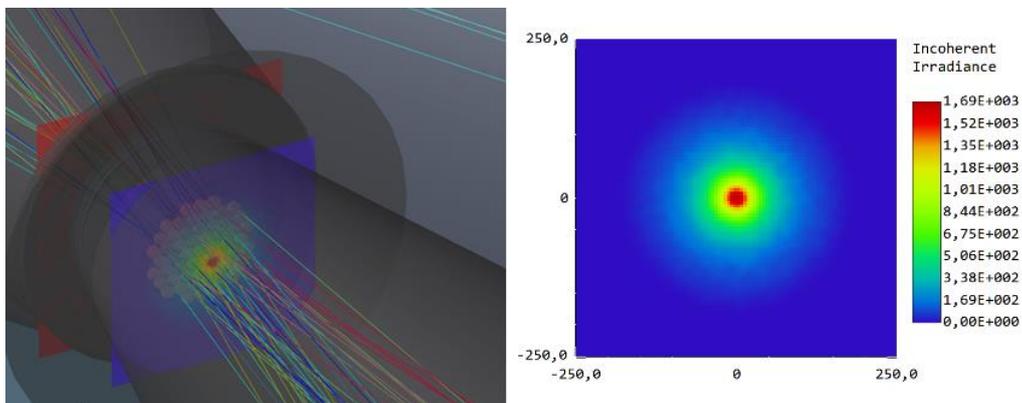


Рис. 2. Ход лучей через интегратор и распределение энергетической освещенности в плоскости перед интегратором.

Для указанных выше условий суммарная величина светового потока составляет 17,2кВт. На рис. 3 приведено распределение энергетической освещенности в плоскости позади интегратора.

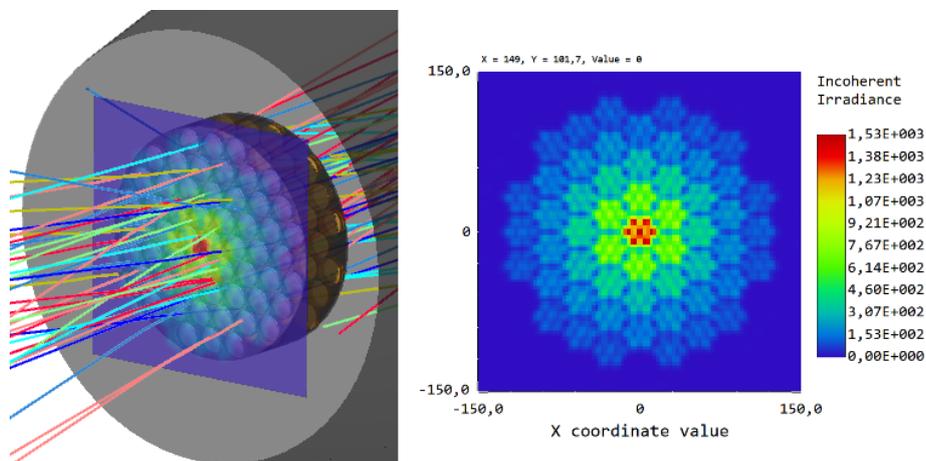


Рис.3. Ход лучей за интегратором и распределение энергетической освещенности в плоскости сразу за интегратором.

Суммарная мощность, выходящая из интегратора, составляет 10,6 кВт. Так, моделирование расчета хода лучей позволяет вычислить величину мощности, рассеиваемую внутри интегратора. Эта величина, в свою очередь, позволяет обоснованно определить параметры системы охлаждения интегратора. Система охлаждения интегратора позволяет стабильно поддерживать температуру на уровне, например, 50°C. При этом появление заметного паразитного теплопритока от интегратора представляется маловероятным.

Моделирование тепловых режимов оптических элементов ИСИ при помощи теплофизической модели

Более критичным с точки зрения минимизации паразитных теплопритоков является учет влияния коллимирующего зеркала. При величине внешнего теплопритока к зеркалу в 10,6 кВт за счет несовершенства отражающего покрытия на зеркале рассеивается в тепло примерно 1,6 кВт.

Можно показать, что в отсутствие принудительного охлаждения зеркала его температура может достигать 180-200°C, так как охлаждение в данном случае происходит только из-за теплового излучения с поверхности конструкции зеркала. Очевидно, что в этом случае величина паразитного теплопритока будет достаточно велика и, при допущении, что весь этот тепловой поток попадает на мишень, сравнима с основной мощностью. При наличии термостатирования зеркала паразитный тепловой поток уменьшается пропорционально разности четвертых степеней температур зеркала и мишени: $\sim(T_r^4 - T_o^4)$. Видно, что нулю он будет только при тепловом равновесии зеркала, мишени и камеры, что недостижимо. Для практических задач допустимой является величина паразитного теплового потока от зеркала порядка 10 Вт/м² (при средней энергетической освещенности объекта испытаний, обеспечиваемой ИСИ в «солнечном» диапазоне длин волн 0,2...2,5 мкм, в 1378 Вт/м²).

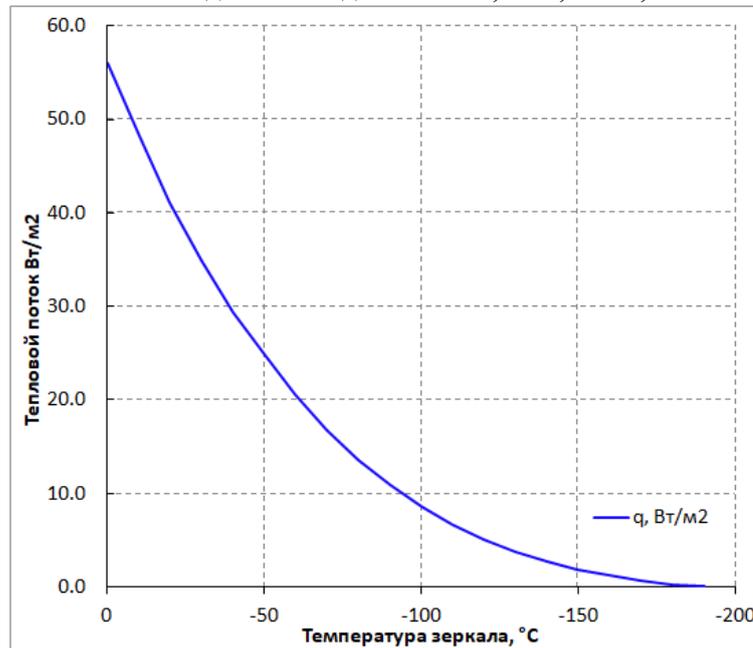


Рис. 4. Зависимость плотности паразитного теплового потока на объекте испытаний от температуры термостатирования зеркала.

Для обеспечения заданного теплового потока оценочное значение температуры термостатирования зеркала должна быть на уровне -90°C, что определяет тип теплоносителя для охлаждения.

В реальной камере расчет теплового потока осложнен геометрией взаимного расположения объекта, зеркала и корпуса камеры. Для расчета потока применяется численное моделирование излучения методом DO-ordinates. Данный метод использует разбиение поверхности на излучающие участки (пиксели) и расчет трассировки лучей из полученных пикселей.

На рис. 5 показан расчет теплового потока от зеркала к объекту испытаний. Зеркало представляет собой двухслойный элемент стекло-алюминий. В рамках данной модели задается фиксированная температура алюминиевой подложки -90°C и температура термостатирования объекта -190°C . Стенки камеры адиабатические. При таком подходе тепловой поток от задней части зеркала будет нагревать стенки до какой-то температуры, что система «зеркало-стенка камеры-объект» будут находиться в равновесии.

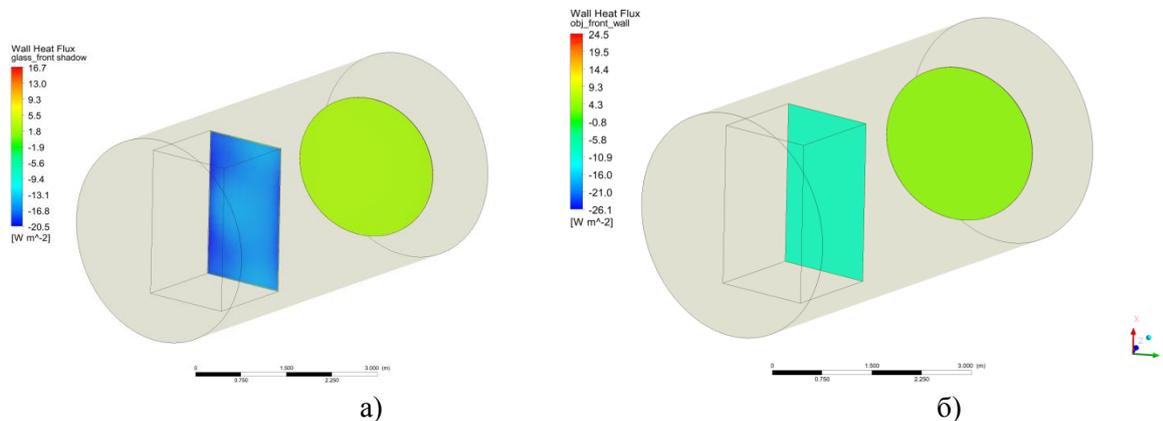


Рис. 5. Плотность теплового потока от зеркала к объекту испытаний при различной степени черноты задней части зеркала при адиабатических стенках камеры. а) $\epsilon_{ps} = 0.5$, б) $\epsilon_{ps} = 0.07$.

Для степени черноты задней поверхности 0.5 тепловой поток на объект составляет $\sim 18 \text{ Вт/м}^2$, что выше ожидаемого. Очевидно, что необходимо снижать излучательную способность поверхности задней части зеркала. При термостатировании стенок камеры эффект передачи теплового потока не будет таким выраженным.

Выводы

Совместное моделирование тепловых режимов оптических элементов ИСИ при помощи комбинации лучевой и теплофизической моделей решает две задачи. С одной стороны, удается смоделировать тепловые режимы оптических элементов и обоснованно подойти к вопросу проектирования надлежащей системы охлаждения. С другой стороны, такое моделирование позволяет предсказать величину теплопритоков от ИС к объекту испытаний, обусловленных нагревом элементов ИСИ. Учет таких теплопритоков повышает достоверность термовакuumных испытаний. Представляется перспективным распространение данного метода на моделирование термовакuumного эксперимента целиком- с учетом оптических и теплофизических свойств вакуумной камеры и самого объекта испытаний для рационального планирования испытаний и повышения точности воспроизведения действующих факторов космического пространства.