

УДК 536.2

Анализ термонапряженного состояния многослойного анизотропного теплозащитного покрытия с учетом полупрозрачности изоляционного слоя

Леонов Виктор Витальевич^(*)

lv-05@mail.ru

SPIN-код: 6939-5898

Зарубин Владимир Сергеевич

vszarubin@gmail.com

SPIN-код: 8762-4546

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрено термонапряженное состояние многослойного теплозащитного покрытия спускаемого модуля межпланетной автоматической станции, возвращающейся на Землю по завершению лунной экспедиции. Основным слоем рассматриваемого покрытия выполнен из материала с высокой степенью анизотропии теплопроводности. Проведен анализ влияния полупрозрачности теплоизоляционного слоя покрытия в инфракрасном диапазоне излучения на его термонапряженное состояние. Показано, что при высоких рабочих температурах слоев теплозащитного покрытия неучет радиационной составляющей теплового потока в полупрозрачных слоях может привести к значительным погрешностям и ошибочным выводам о применимости этого покрытия.

Ключевые слова: возвращаемый модуль, многослойная теплозащита, теплозащитные материалы, анизотропия теплопроводности, полупрозрачность, кварцевое волокно

Введение. Автоматические межпланетные станции подходят к границе атмосферы Земли с местными параболической или даже гиперболической скоростями. Это обстоятельство, в силу очень высоких конвективных и уже значительных радиационных тепловых потоков, приводит к высокоинтенсивному тепловому нагружению аппарата и, как следствие, высоким рабочим температурам внешних слоев теплозащитного покрытия (ТЗП).

В рамках ряда предыдущих работ все материалы пакета ТЗП рассматривались как непрозрачные, а для изоляционного слоя был выбран изотропный пористый керамический материал на основе кварцевых волокон, имеющий рабочую температуру до 1520 К. В работе [1] показано, что при широком варьировании условий входа и толщин слоев возможны приемлемые варианты, когда пиковое значение температуры на границе изоляционного слоя может практически достигать его рабочей температуры. Учитывая, что изоляционные материалы на основе кварцевых волокон являются частично прозрачными в инфракрасном спектре [2], то при таком уровне температур необходимо рассмотреть и оценить, кроме теплопроводности через изоляционный слой, также и радиационный теплоперенос.

Методы и материалы; результаты. Существует достаточно большой набор методов для решения уравнения переноса излучения, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки [3, 4]. В рассматриваемой гео-

метрически достаточно простой задаче (сферический сегмент) для учета полупрозрачности слоя его полную или эффективную теплопроводность $k_{\text{эф}}$ можно представить суммой кондуктивной $k_{\text{конд}}$ и радиационной $k_{\text{рад}}$ компонент. Тогда плотность потока излучения при температуре T будет равна

$$q = -k_{\text{эф}} \nabla T = -(k_{\text{конд}} + k_{\text{рад}}) \nabla T.$$

Такой подход соответствует приближению Росселанда [3] — это упрощенный метод описания радиационного переноса излучения в оптически толстых средах, когда излучение рассеивается и поглощается настолько сильно, что можно считать его локально изотропным. Подход аналогичен диффузионному приближению в теории переноса и может быть получен из Р-1 метода [5]. Сочетание этого метода с методом конечных объемов и конечных элементов позволяет достаточно подробно проанализировать термонапряженное состояние ТЗП.

Заключение. При исследовании термонапряженного состояния ТЗП спускаемых аппаратов, в случае наличия в их структуре полупрозрачных слоев, недостаточно опираться только на кондуктивную составляющую теплопроводности. Неучет радиационного теплового потока может привести к значительным погрешностям и ошибочным выводам о применимости ТЗП. Следовательно, нужно опираться либо на эффективную теплопроводность, либо отдельно моделировать все составляющие процесса теплопереноса.

Список источников

- [1] Leonov V.V., Zarubin V.S. Multilayer Anisotropic Heat Shield: Analysis of the Structure and Thermal Stress State in Case of a Lunar Probe Re-entry Module. *Proceedings of the International Astronautical Congress*, 2024.
- [2] Черепанов В.В. *Методология исследования и прогнозирования свойств высокопористых материалов для тепловой защиты летательных аппаратов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2012, 265 с.
- [3] Modest M.F. *Radiative Heat Transfer*, Academic Press, 2013, 882 p.
- [4] Dombrovsky L.A., Baillis D. *Thermal radiation in disperse systems: an engineering approach*. New York, Begell House, 2010, 689 p.
- [5] Siegel R., Howell J.R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Boca Raton, CRC Press, 2010, 987 p.