

Ю.Б. Дылько, П.В. Просунцов

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МНОГОРАЗОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведено сравнение моделей эффективной теплопроводности и радиационно-кондуктивного теплообмена при проектировании теплозащитных покрытий многоразовых космических аппаратов. Показано, что использование модели эффективной теплопроводности приводит к завышению значений температур в волокнистом материале по сравнению с моделью радиационно-кондуктивного теплопереноса и, как следствие, к увеличению необходимой толщины теплоизоляционного материала.

E-mail: prosuntsov@tochka.ru

Ключевые слова: многоразовые космические аппараты, теплозащитные покрытия, волокнистые теплоизоляционные материалы, комбинированный теплообмен, модель эффективной теплопроводности, модель радиационно-кондуктивного теплопереноса, оптимальное тепловое проектирование.

В настоящее время создаются и совершенствуются многоразовые космические аппараты (МКА), такие как X-33, Venture Star, X-37, X-43 [1]. Для аппаратов данного класса важной задачей является обеспечение эффективной тепловой защиты силовой конструкции в условиях интенсивного аэродинамического нагрева. В теплозащитных покрытиях (ТЗП) современных МКА для блокирования переноса теплоты от нагретой фронтальной поверхности используют высокотемпературные теплоизоляционные материалы из волокон SiO_2 и Al_2O_3 [2]. Ввиду частичной прозрачности волокон и высокой пористости материалов перенос теплоты происходит одновременно и взаимосвязанно несколькими механизмами: теплопроводностью по твердому каркасу и газовой среде в порах, конвективным путем в объеме материала и за счет энергии излучения [3].

Существует два основных подхода к математическому описанию процесса теплопереноса в частично прозрачных волокнистых материалах.

Первый из них основан на понятии эффективной теплопроводности. В данном случае все механизмы переноса энергии в материале суммарно описываются одним параметром — эффективной теплопроводностью. Основными преимуществами этого подхода являются простота программной и алгоритмической реализации и возможность

использования коммерческих пакетов программ для конечно-элементных расчетов.

Однако эффективная теплопроводность существенно зависит от условий теплового нагружения элементов ТЗП, оптических свойств границ частично прозрачных слоев и их толщины. Это приводит к необходимости определения эффективной теплопроводности частично прозрачных материалов в условиях, максимально приближенных к реальным эксплуатационным, и потому усложняет и удорожает экспериментальные исследования.

Альтернативным является подход, основанный на использовании модели радиационно-кондуктивного теплообмена (РКТ). В этом случае в математическую модель включают уравнение переноса излучения, что позволяет детально исследовать процесс переноса энергии в частично прозрачном материале и существенно повысить точность расчета поля температур. Основную сложность в этом случае представляет решение интегродифференциального уравнения переноса излучения, для чего применяют приближенные методы (дискретных ординат, моментов, сферических гармоник и др.). К настоящему времени созданы эффективные методы и программы решения задач РКТ для анализа процессов теплообмена в элементах ТЗП [4].

При создании систем тепловой защиты МКА традиционно применяют модели эффективной теплопроводности. Данная работа посвящена сравнению моделей РКТ и эффективной теплопроводности для целей теплового проектирования элементов ТЗП.

Постановка задачи. Рассмотрим нестационарный одномерный процесс теплообмена в элементе ТЗП из N слоев толщиной d_i ,

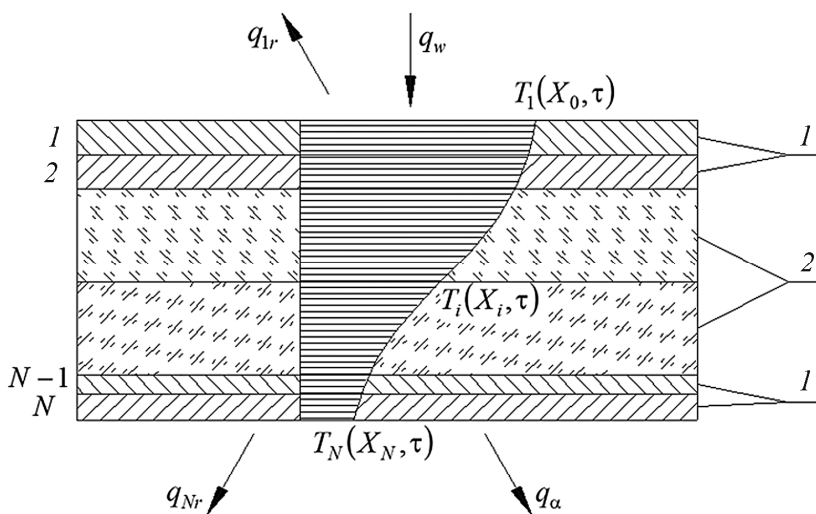


Рис. 1. Геометрическая модель многослойного ТЗП:

1 — непрозрачные слои; 2 — частично прозрачные слои

$i = \overline{1, N}$, с произвольным чередованием частично прозрачных и непрозрачных материалов (рис. 1). Будем считать, что теплофизические и оптические характеристики всех материалов зависят от температуры. Оптические свойства материалов и граничных поверхностей не зависят от длины волны, что оправдано на этапе теплового проектирования. Тепловой контакт между отдельными слоями принимаем идеальным. Для решения уравнения переноса излучения применим метод полумоментов [5], показавший высокую точность расчета всех компонент поля излучения в широком диапазоне варьирования характеристик материалов и условий теплового нагружения.

При сделанных выше допущениях математическую модель процесса теплопереноса в элементе ТЗП можно представить в следующем виде.

1. Уравнение теплопроводности для непрозрачного слоя:

$$C_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \right),$$

$$x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

2. Уравнение теплопроводности для прозрачного слоя:

$$C_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \right) + k_i(T) [U_i(x) - 4n_i(T)^2 \sigma_0 T_i(x, \tau)^4],$$

$$x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

3. Начальные условия уравнения теплопроводности:

$$T_i(x, \tau_{\min}) = T_{0,i}(x), \quad x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N}.$$

4. Граничные условия на фронтальной поверхности ТЗП:

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(X_0, \tau)}{\partial x} = q_w(\tau) - q_{1r}(T),$$

$$q_{1r}(T) = \varepsilon_1(T) \sigma_0 [T_1(X_0, \tau)^4 - T_f(\tau)^4],$$

$$\tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

5. Граничные условия на тыльной поверхности:

$$-\lambda_N(T) \frac{\partial T_N(X_N, \tau)}{\partial x} = q_\alpha(T) + q_{Nr}(T),$$

$$q_\alpha(T) = \alpha_f(T) [T_N(X_N, \tau) - T_f(\tau)],$$

$$q_{Nr}(T) = \varepsilon_N(T) \sigma_0 [T_N(X_N, \tau)^4 - T_f(\tau)^4], \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

6. Система уравнений переноса излучения:

$$\frac{dU_i^+(x)}{dx} = 6[k_i(T) + \sigma_i(T)][F_i^+(x) - U_i^+(x)] + \frac{3\sigma_i(T)}{2}[U_i^+(x) + U_i^-(x)] + 6k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0T(x,\tau)^4, \quad x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N};$$

$$\frac{dF_i^+(x)}{dx} = -[k_i(T) + \sigma_i(T)]U_i^+(x) + \frac{\sigma_i(T)}{2}[U_i^+(x) + U_i^-(x)] + 2k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0T(x,\tau)^4, \quad x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N};$$

$$\frac{dU_i^-(x)}{dx} = 6[k_i(T) + \sigma_i(T)][F_i^-(x) + U_i^-(x)] - \frac{3\sigma_i(T)}{2}[U_i^+(x) + U_i^-(x)] - 6k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0T(x,\tau)^4, \quad x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N};$$

$$\frac{dF_i^-(x)}{dx} = -[k_i(T) + \sigma_i(T)]U_i^-(x) + \frac{\sigma_i(T)}{2}[U_i^+(x) + U_i^-(x)] + 2k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0T(x,\tau)^4, \quad x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N},$$

где

$$U_i^+(x) = 2\pi \int_0^1 I(x, \mu) d\mu; \quad U_i^-(x) = 2\pi \int_{-1}^0 I(x, \mu) d\mu;$$

$$F_i^+(x) = 2\pi \int_0^1 I(x, \mu) \mu d\mu; \quad F_i^-(x) = 2\pi \int_{-1}^0 I(x, \mu) \mu d\mu;$$

$$U_i(x) = U_i^+(x) + U_i^-(x); \quad F_i(x) = F_i^+(x) + F_i^-(x),$$

$$x \in (X_{i-1}, X_i), \quad i = \overline{1, N}.$$

7. Условия баланса энергии на границах непрозрачных слоев:

$$\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(X_i, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T_{i+1}(X_i, \tau)}{\partial x}, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

8. Условия баланса энергии на границах частично прозрачного и непрозрачного слоев (рис. 2):

$$-\lambda_{i-1}(T) \frac{\partial T_{i-1}(X_{i-1}, \tau)}{\partial x} = -\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(X_{i-1}, \tau)}{\partial x} + F_i(X_{i-1}),$$

$$i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

$$-\lambda_i(T) \frac{\partial T_i(X_i, \tau)}{\partial x} + F_i(X_i) = -\lambda_{i+1}(T) \frac{\partial T_{i+1}(X_i, \tau)}{\partial x},$$

$$i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}].$$

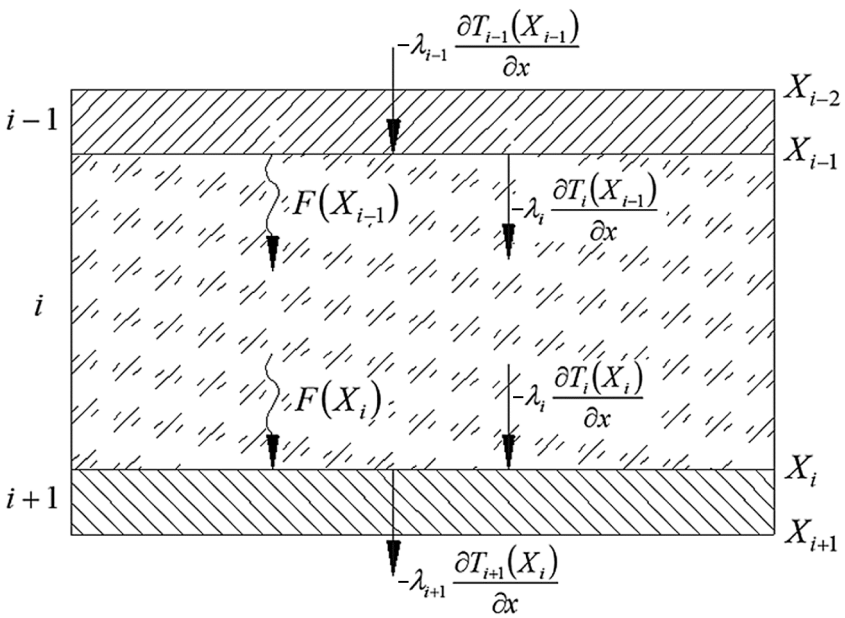


Рис. 2. Условия баланса энергии на границах частично прозрачного и непрозрачного слоев

9. Граничные условия на стыке частично прозрачного и непрозрачного слоев для уравнения переноса излучения в материале:

$$U_i^+(X_{i-1}, \tau) - r_{i-1}(T)U_i^-(X_{i-1}, \tau) = 2[1 - r_{i-1}(T)]n_i(T)^2 \sigma_0 T_i(X_{i-1}, \tau)^4, \\ i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

$$F_i^+(X_{i-1}, \tau) - \frac{1}{2}r_{i-1}(T)U_i^-(X_{i-1}, \tau) = [1 - r_{i-1}(T)]n_i(T)^2 \sigma_0 T_i(X_{i-1}, \tau)^4, \\ i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

$$U_i^-(X_i, \tau) - r_{i+1}(T)U_i^+(X_i, \tau) = 2[1 - r_{i+1}(T)]n_i(T)^2 \sigma_0 T_i(X_i, \tau)^4, \\ i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

$$F_i^-(X_i, \tau) + \frac{1}{2}r_{i+1}(T)U_i^+(X_i, \tau) = -[1 - r_{i+1}(T)]n_i(T)^2 \sigma_0 T_i(X_i, \tau)^4, \\ i = \overline{1, N-1}, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

где C — объемная теплоемкость материала; i — номер слоя; T — температура, К; x — пространственная координата, м; τ — время, с; λ — теплопроводность материала, Вт/(м · К); k — коэффициент поглощения излучения, 1/м; n — показатель преломления излучения; U^+ , U^- — плотности энергии излучения в положительном и отрица-

тельном направлениях, Вт/м^2 ; F^+ , F^- — плотности потока энергии излучения в положительном и отрицательном направлениях, Вт/м^2 ; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; X_i — координата границы i -го и $(i + 1)$ -го слоев, м; q_w — внешний конвективный тепловой поток, подводимый к поверхности элемента ТЗП, Вт/м^2 ; ε — степень черноты материала; α_f — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; r — отражательная способность; σ — коэффициент рассеяния излучения, $1/\text{м}$; $\mu = \cos \varphi$ (φ — угол между направлением распространения излучения и осью x).

Результаты моделирования. В качестве объекта исследования был выбран типовой элемент ТЗП перспективного МКА (рис. 3). Теплофизические и оптические свойства материалов указаны в работах [2, 3]. Считалось, что на тыльной стороне элемента ТЗП имеет место естественная конвекция с коэффициентом теплоотдачи $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и радиационный теплообмен с окружающей средой при температуре 300 К . Степень черноты алюминиевого сплава принималась равной $0,5$. На фронтальной поверхности элемента ТЗП задавался конвективный тепловой поток (рис. 4). Также учитывался радиационный сброс энергии с фронтальной поверхности в окружающее пространство с температурой 300 К .

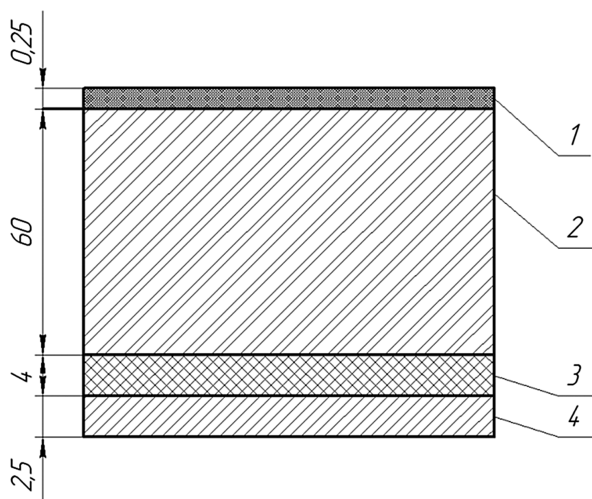


Рис. 3. Схема типового элемента ТЗП:

1 — эрозионно-стойкое покрытие; 2 — теплоизоляционный материал Saffil; 3 — переходный слой из материала Nomex; 4 — силовая конструкция из алюминиевого сплава

Результаты математического моделирования процесса теплопереноса показывают (рис. 5), что использование модели эффективной теплопроводности приводит к завышению значений температуры по

сравнению с моделью РКТ до 78 К. Различие температур по толщине типового элемента ТЗП показано на рис. 6. Видно, что на стыке эрозионно-стойкого покрытия и изоляционного материала Saffil различие в значениях температур практически отсутствует (кривые 1 и 2 на рисунке практически совпадают). При этом в середине слоя теплоизоляционного материала оно достигает значений почти 70 К.

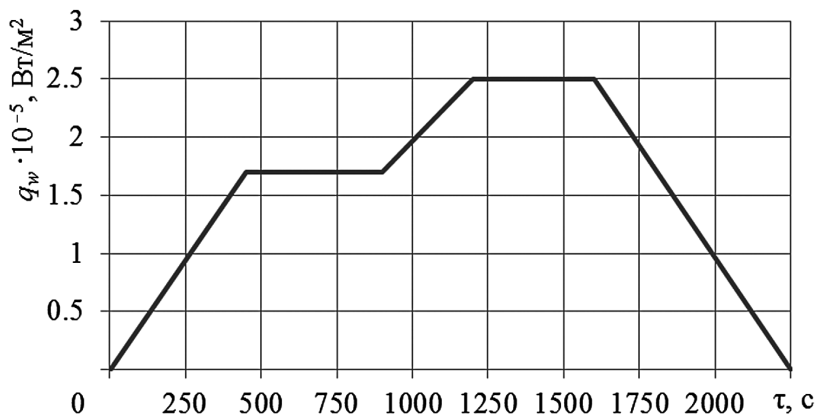


Рис. 4. Изменение теплового потока на фронтальной поверхности элемента ТЗП

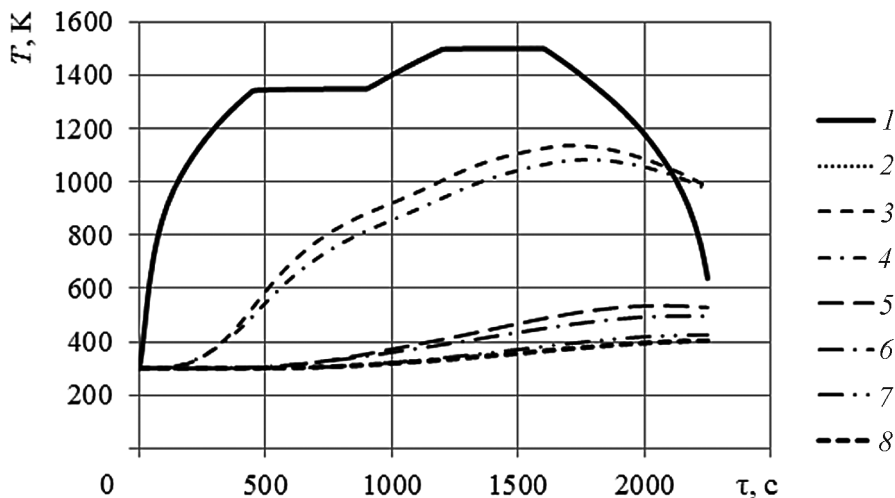


Рис. 5. Результаты математического моделирования процесса теплопереноса в элементе ТЗП:

1, 3, 5 — температура материала Saffil для координат $x = 0, 30$ и 60 мм соответственно, модель эффективной теплопроводности; 2, 4, 6 — то же, модель РКТ; 7 — температура тыльной поверхности, модель эффективной теплопроводности; 8 — то же, модель РКТ

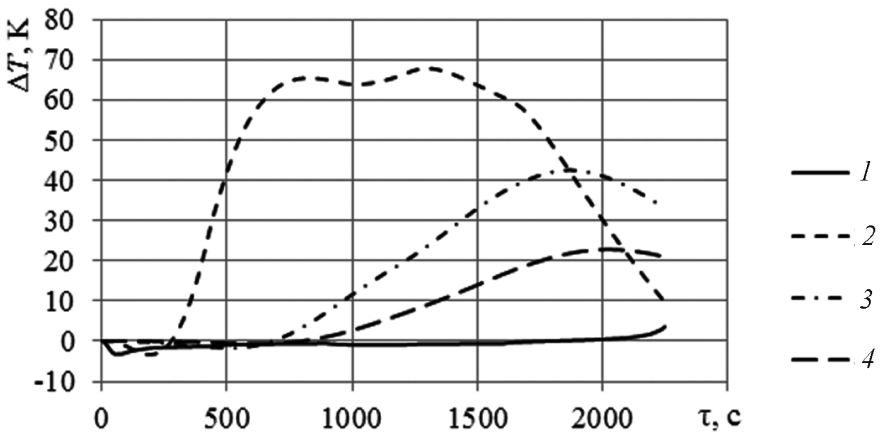


Рис. 6. Различие значений температур для моделей эффективной теплопроводности и РКТ:

1, 2, 3 — в материале Saffil для координат $x = 0, 30$ и 60 мм соответственно; 4 — на тыльной поверхности элемента ТЗП

Расхождение значений температуры тыльной поверхности при использовании двух различных моделей теплопереноса в элементе ТЗП составляет 21 К. Таким образом, применение при тепловом проектировании модели эффективной теплопроводности будет приводить к завышению необходимой толщины теплоизоляционного материала. Для количественной оценки этого завышения была решена задача оптимального теплового проектирования элемента ТЗП. При этом на основе аппарата обратных задач теплообмена [6] определялась минимально допустимая толщина слоя волокнистого теплоизоляционного материала при ограничении температуры внутренней поверхности элемента ТЗП в 430 К. Обратная задача теплообмена решалась с помощью генетического алгоритма [7].

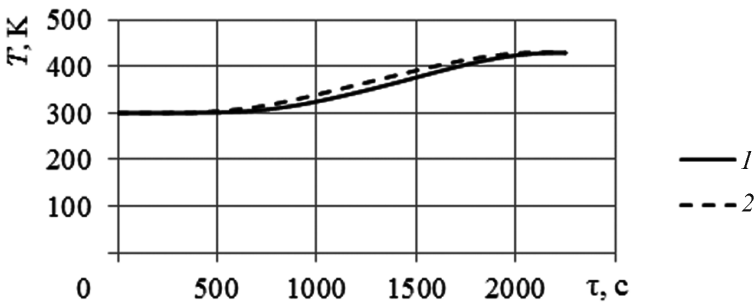


Рис. 7. Зависимость температуры тыльной поверхности от времени для двух конфигураций элемента ТЗП:

1 — модель эффективной теплопроводности (толщина слоя Saffil 58,7 мм); 2 — модель РКТ (толщина слоя Saffil 51,2 мм)

Для модели эффективной теплопроводности была получена минимально необходимая толщина слоя материала Saffil, равная 58,7 мм, в то же время использование модели РКТ позволяет сократить ее до 51,2 мм. На рис. 7 представлена зависимость температуры тыльной поверхности от времени для этих конфигураций элемента ТЗП.

Таким образом, применение математической модели РКТ позволяет уменьшить необходимую толщину теплоизоляционного материала на 7,5 мм, что приводит к снижению удельного веса волокнистого материала в элементе ТЗП на 12,8 %. Учитывая тот факт, что площадь поверхности многоразовых космических аппаратов, покрываемая элементами ТЗП, обычно составляет сотни квадратных метров, такой подход к тепловому проектированию может существенно снизить суммарную массу ТЗП аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glass D.E. Ceramic matrix composite thermal protection system and hot structures for hypersonic vehicles // AIAA Paper. – 2008. – N 2682. – 36 p.
2. Parametric weight comparison of advanced metallic, ceramic tile and ceramic blanket thermal protection systems / D. Myers et al. // NASA, Langley Research Center. – 2000. – N 21018. – 49 p.
3. Daryabeigi K. Heat transfer modeling and validation for optically thick alumina fibrous insulation // Proc. 30th Int. Thermal Conductivity Conf. (Pittsburgh, PA, USA, Aug. 29 – Sept. 2, 2009). – 12 p.
4. Михалев А.М., Просунцов П.В., Резник С.В. Математико-алгоритмическое и программное обеспечение исследования процессов радиационно-кондуктивного теплообмена в частично прозрачных материалах // Передовые термические технологии и материалы: Матер. 1-го Междунар. симп. (Кацивели, Крым, Украина, 22–26 сент. 1997 г.). – М., 1999. – Ч. 2. – С. 40–49.
5. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 с.
6. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем / О.М. Алифанов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
7. Parallel PIKAIA homepage: <http://whitedwarf.org/parallel/>

Статья поступила в редакцию 19.09.2012