УДК 536.2:536.33

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,

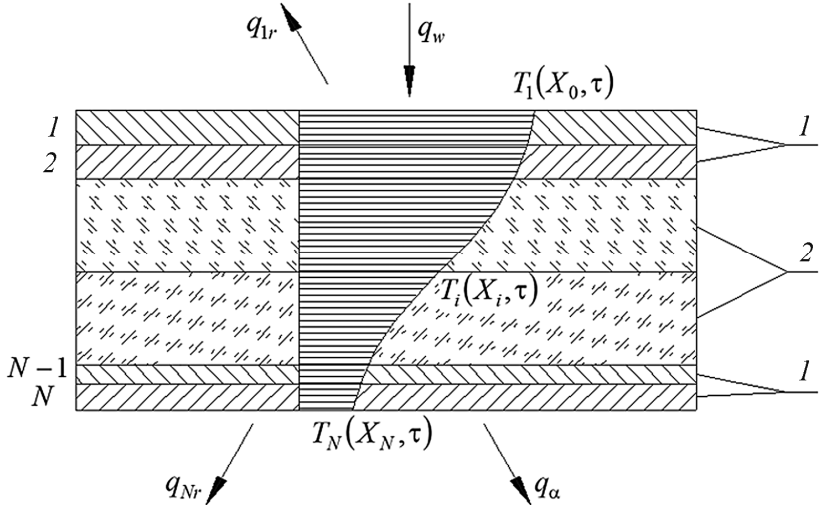


Рис. 1. Геометрическая модель многослойного ТЗП:
1 — непрозрачные слои; *2* — частично прозрачные слои

$i=\overline{1,N}$, 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:

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

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

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:

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

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

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

5. Граничные условия на тыльной поверхности:

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

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

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

6. Система уравнений переноса излучения:

$$\frac{dU_i^+(x)}{dx} = 6\left[k_i(T)+\sigma_i(T)\right]\left[F_i^+(x)-U_i^+(x)\right]+\frac{3\sigma_i(T)}{2}\left[U_i^+(x)+U_i^-(x)\right]+$$
$$+6k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0 T(x,\tau)^4,\quad x\in(X_{i-1},X_i),\quad i=\overline{1,N};$$

$$\frac{dF_i^+(x)}{dx} = -\left[k_i(T)+\sigma_i(T)\right]U_i^+(x)+\frac{\sigma_i(T)}{2}\left[U_i^+(x)+U_i^-(x)\right]+$$
$$+2k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0 T(x,\tau)^4,\quad x\in(X_{i-1},X_i),\quad i=\overline{1,N};$$

$$\frac{dU_i^-(x)}{dx} = 6\left[k_i(T)+\sigma_i(T)\right]\left[F_i^-(x)+U_i^-(x)\right]-\frac{3\sigma_i(T)}{2}\left[U_i^+(x)+U_i^-(x)\right]-$$
$$-6k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0 T(x,\tau)^4,\quad x\in(X_{i-1},X_i),\quad i=\overline{1,N};$$

$$\frac{dF_i^-(x)}{dx} = -\left[k_i(T)+\sigma_i(T)\right]U_i^-(x)+\frac{\sigma_i(T)}{2}\left[U_i^+(x)+U_i^-(x)\right]+$$
$$+2k_i(T)n_i(T)^2\sigma_0 T(x,\tau)^4,\quad x\in(X_{i-1},X_i),\quad i=\overline{1,N},$$

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):

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

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

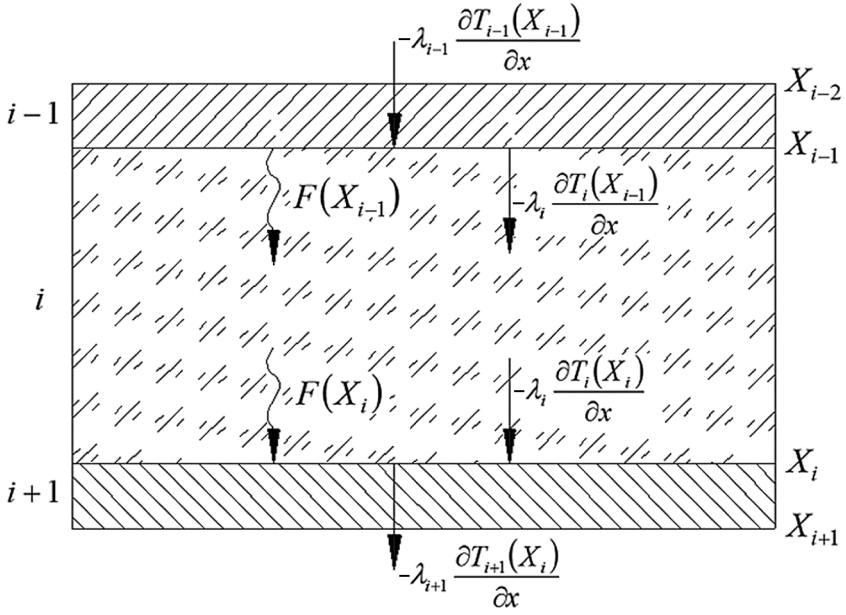


Рис. 2. Условия баланса энергии на границах частично прозрачного и непрозрачного слоев

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, K; x — пространственная координата, м; τ — время, с; λ — теплопроводность материала, Вт/(м · K); 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, Вт/(м^2·К); r — отражательная способность; σ — коэффициент рассеяния излучения, 1/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 Вт/(м^2 · 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.

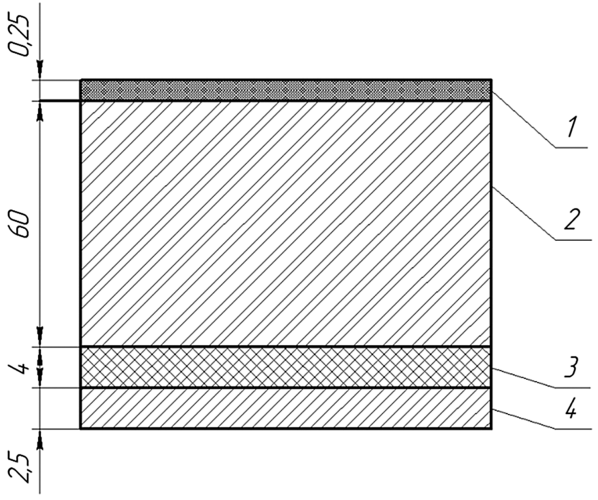


Рис. 3. Схема типового элемента ТЗП:

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 K. 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 K.

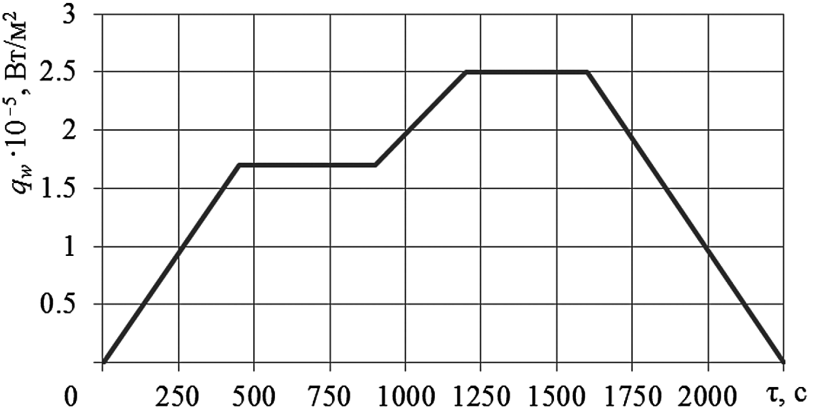


Рис. 4. Изменение теплового потока на фронтальной поверхности элемента ТЗП

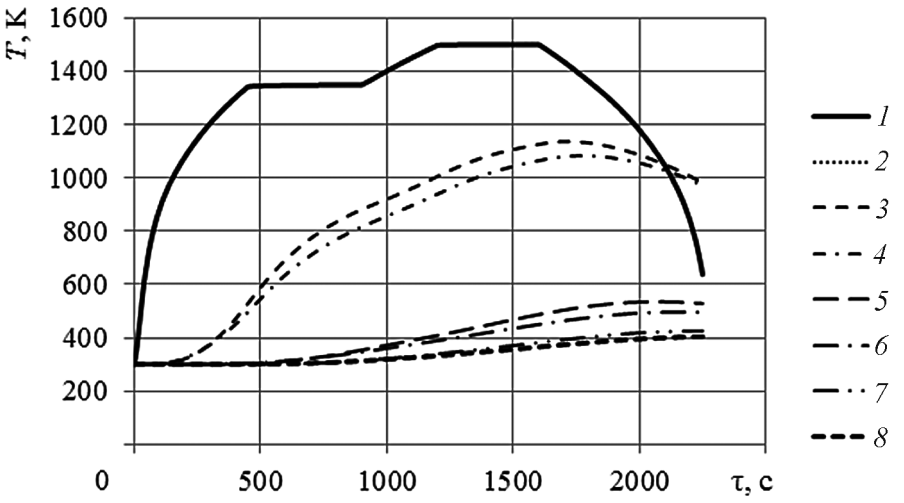


Рис. 5. Результаты математического моделирования процесса теплопереноса в элементе ТЗП:

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

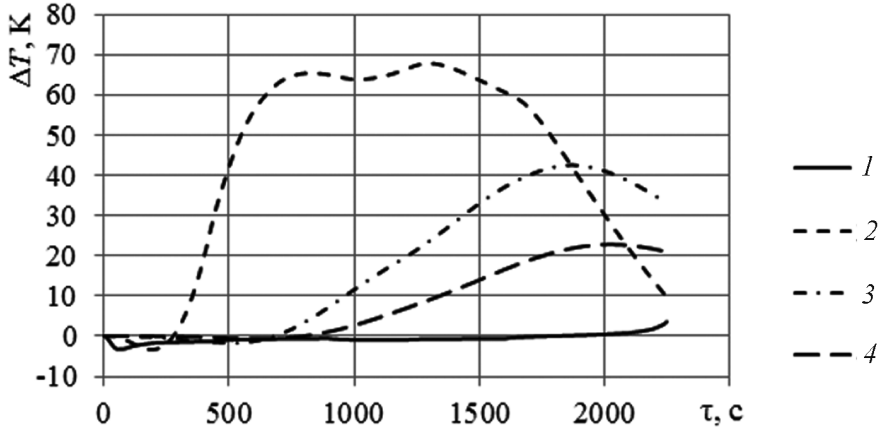


Рис. 6. Различие значений температур для моделей эффективной теплопроводности и РКТ:

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 K. 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 K. Обратная задача теплообмена решалась с помощью генетического алгоритма [7].

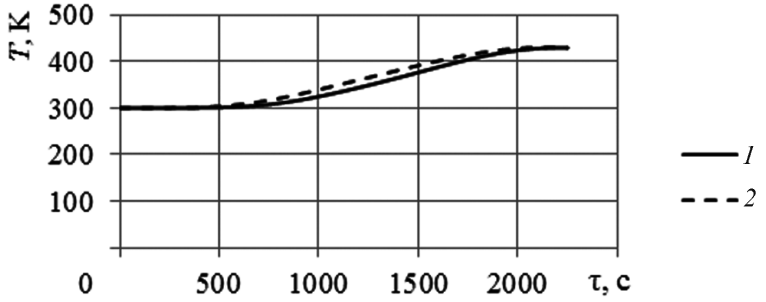


Рис. 7. Зависимость температуры тыльной поверхности от времени для двух конфигураций элемента ТЗП:

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