

Д.А. Данилова, П.В. Просунцов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕНА
И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ
С СИСТЕМОЙ РАДИАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ**

Построена математическая модель процесса комбинированного теплообмена в теплозащитном покрытии с системой радиационных экранов. Исследовано влияние числа, расположения и отражающей способности экранов на эффективность теплозащитного покрытия. Показано, что использование экранов с высокой отражательной способностью, расположенных на оптимальном расстоянии друг от друга, позволяет уменьшить толщину слоя волокнистого материала в сравнении с покрытием без экранов и, соответственно, снизить удельную массу теплозащитного покрытия.

E-mail: prosuntsov@tochka.ru

Ключевые слова: многоразовые космические аппараты, теплозащитные покрытия, волокнистые теплоизоляционные материалы, радиационные экраны, комбинированный теплообмен.

Обеспечение эффективной тепловой защиты аппаратов, совершающих полет в атмосфере при возвращении с орбиты, — одна из сложных задач современной ракетно-космической техники. Теплозащитные покрытия (ТЗП) современных многоразовых космических аппаратов (МКА) должны эффективно предохранять силовую конструкцию от аэродинамического нагрева при минимальной массе [1]. Основу ТЗП современных и перспективных МКА составляют высокотемпературные теплоизоляционные материалы из волокон SiO_2 и Al_2O_3 . Сложность моделирования процессов теплообмена в таких материалах обусловлена одновременным и взаимосвязанным переносом энергии теплопроводностью (по твердому каркасу и газовой среде) и радиационным переносом (в объеме материала). С ростом температуры роль радиационного переноса энергии увеличивается и при высоких температурах становится определяющей [2].

Для блокирования радиационного теплообмена в волокнистом материале используют: нанесение отражающих покрытий на волокна, включение в волокна частиц оксида хрома Cr_2O_3 , заполнение пор волокнистого материала мелкодисперсными непрозрачными частицами, установку радиационных экранов [2—5]. Исследования, проведенные в научно-исследовательском центре NASA [3], показали, что

наиболее эффективным способом является применение радиационных экранов. Однако были получены лишь качественные оценки эффективности радиационных экранов [3, 5]. Цели настоящей работы заключаются в построении математической модели процесса комбинированного теплопереноса в ТЗП с радиационными экранами и исследовании влияния их количества, расположения и отражающей способности на эффективность ТЗП в целом.

Постановка задачи. Рассмотрим одномерный процесс радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойном ТЗП из N слоев как непрозрачных, так и частично-прозрачных материалов толщиной d_i , $i = 1, N$ (рис. 1). Теплофизические и оптические свойства материалов зависят от температуры, оптические свойства не зависят от длины волны. Тепловой контакт между слоями считаем идеальным.

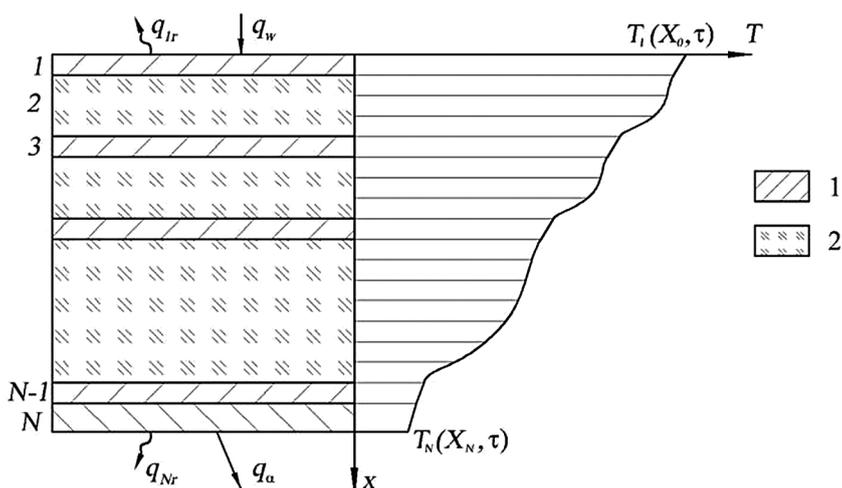


Рис. 1. Схема расчетной модели:

1 — непрозрачный слой; 2 — частично прозрачный слой

Математическая модель процесса радиационно-кондуктивного теплообмена содержит интегродифференциальное уравнение переноса излучения. Для решения этого уравнения используем метод полу-моментов [6], показавший высокую точность в случае малых оптических толщин. Математическая модель процесса теплообмена приведена в работе [8].

Результаты исследований. При математическом моделировании рассматривалось ТЗП перспективного МКА на основе материала Saffil из волокон Al_2O_3 (плотность 120 кг/м^3) с системой радиационных экранов (рис. 2). Фронтальная поверхность ТЗП защищена эрозионно-стойким покрытием. Между силовой конструкцией из алю-

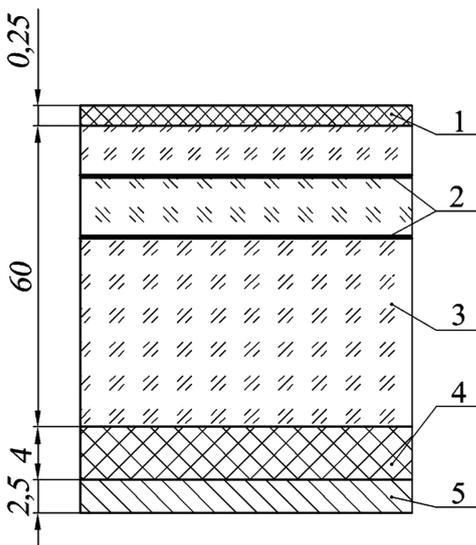


Рис. 2. Схема ТЗП с системой радиационных экранов:

1 — эрозионно-стойкое покрытие; 2 — радиационные экраны; 3 — волокнистый материал Saffil; 4 — термокомпенсатор; 5 — силовая конструкция

экраны и экраны без покрытия. Зависимость отражательной способности этих экранов от температуры приведена на рис. 3.

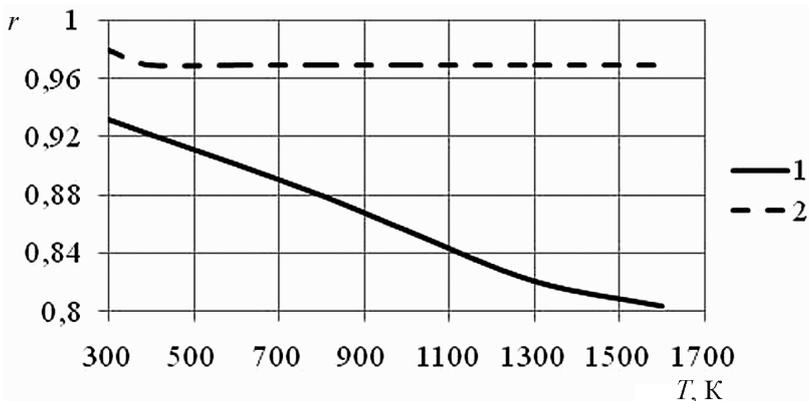


Рис. 3. Зависимость отражательной способности r никелевого (1) и позолоченного (2) экранов от температуры T

Анализ влияния отражательной способности радиационных экранов на температуру тыльной поверхности ТЗП проводили для случая равномерного расположения экранов в слое волокнистого материала толщиной 60 мм. Из результатов (рис. 4) видно, что использование

миниевого сплава и материалом Saffil размещен слой материала Nomex, который играет роль термокомпенсатора.

На тыльной стороне покрытия имеют место естественная конвекция с коэффициентом теплоотдачи $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и радиационный теплообмен с окружающей средой, температура которой составляет 300 К. Степень черноты алюминиевого сплава равна 0,5. К фронтальной поверхности ТЗП подводится тепловой поток аналогично рассмотренному в работе [8].

В качестве материала для радиационных экранов использовали никелевую фольгу толщиной 0,01 мм. При этом рассматривались позолоченные

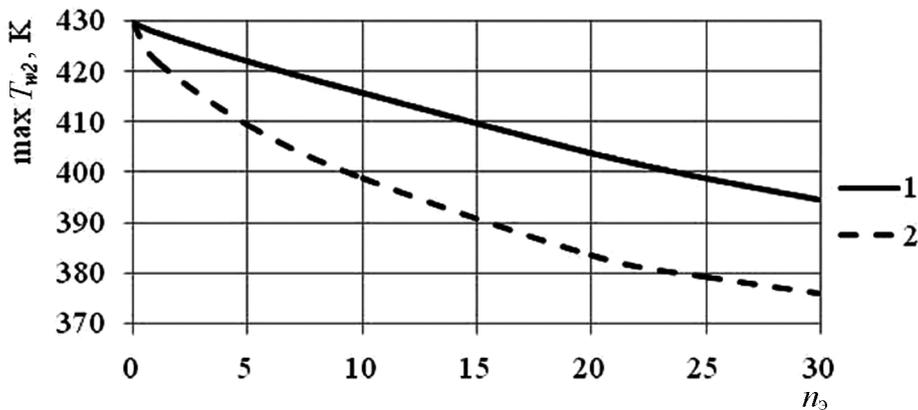


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры T_{w2} тыльной поверхности ТЗП от числа n_s равномерно расположенных никелевых (1) и позолоченных (2) экранов

позолоченных экранов позволяет в существенно большей степени снизить температуру тыльной поверхности.

При этом следует учитывать, что с увеличением числа экранов общая масса теплозащитного покрытия возрастает линейно, тогда как уменьшение максимальной температуры тыльной поверхности носит более плавный характер (рис. 5).

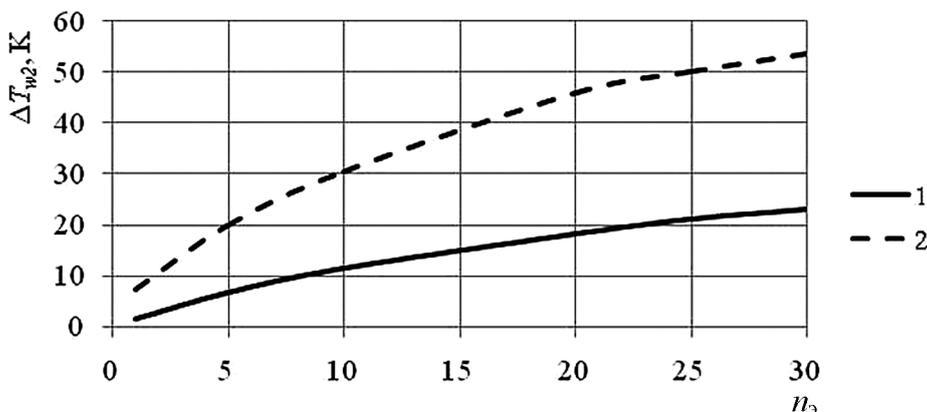


Рис. 5. Зависимость снижения максимальной температуры ΔT_{w2} тыльной поверхности ТЗП от числа n_s равномерно расположенных никелевых (1) и позолоченных (2) экранов

Был выполнен анализ влияния отражательной способности радиационных экранов на необходимую толщину d_{saf} слоя волокнистого материала при ограничении максимальной температуры тыльной поверхности ТЗП в 430 К. Показано (рис. 6), что и в этом случае экраны с большей отражательной способностью оказываются более эффек-

тивными. Так, для уменьшения толщины слоя волокнистого материала на 3 мм требуется установка пяти экранов без покрытия или одного позолоченного экрана.

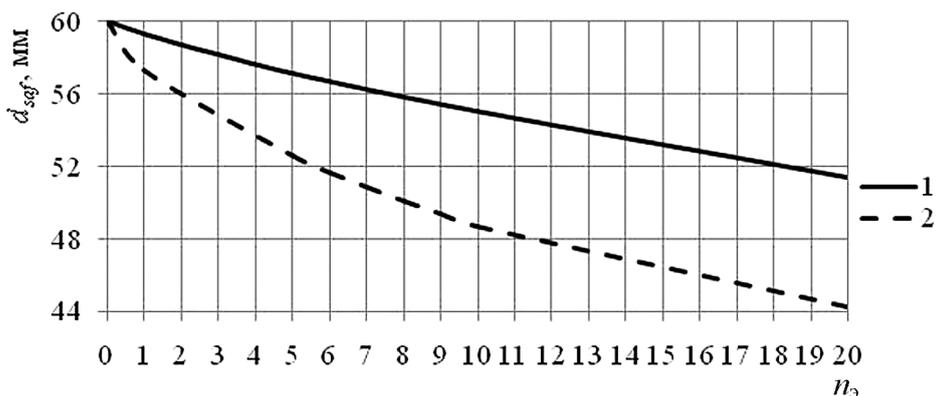


Рис. 6. Зависимость толщины d_{saf} слоя волокнистого материала от числа n_s никелевых (1) и позолоченных (2) экранов

Как видно из рис. 7, использование системы с никелевыми экранами без покрытия не позволяет уменьшить суммарную массу ТЗП. В этом случае снижение массы ТЗП за счет уменьшения толщины слоя волокнистого материала перекрывается массой самих радиационных экранов. При этом применение позолоченных экранов позволяет снизить общую массу ТЗП на 6,61 % при использовании восьми экранов.

Эффективность ТЗП с системой радиационных экранов можно повысить при оптимизации их расположения в слое волокнистого материала. Такая задача относится к геометрическим обратным [7] и

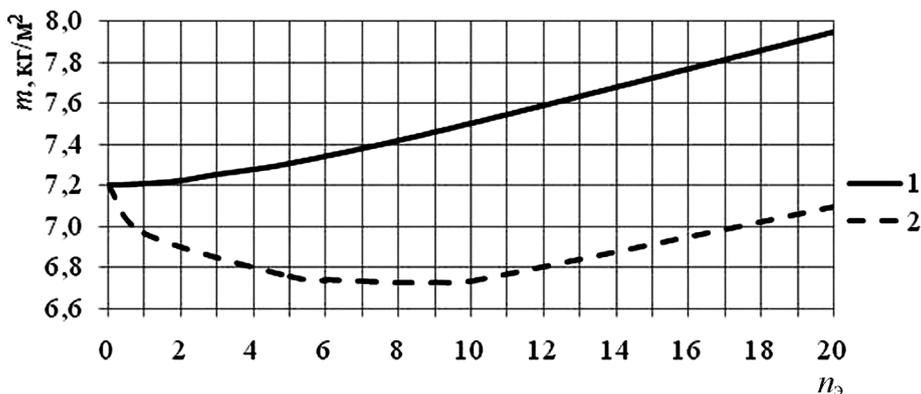


Рис. 7. Зависимость суммарной удельной массы m ТЗП от числа n_s никелевых (1) и позолоченных (2) экранов

может быть решена с использованием генетического алгоритма. В качестве минимизируемой величины была выбрана максимальная температура тыльной поверхности ТЗП. Из технологических соображений накладывалось ограничение на минимальное расстояние между экранами — 1 мм.

Таблица 1

Оптимальная глубина h расположения экранов, мм

Тип экрана	Значение h при n_3 , равном	
	1	5
Без покрытия	3,3	1,4; 3,8; 6,4; 9,4; 12,6
Позолоченный	6,0	2,4; 7,3; 13,1; 19,4; 26,8

Таблица 2

Максимальная температура T_{w2} на тыльной поверхности ТЗП для различных вариантов расположения экранов

Расположение экранов	Значение T_{w2} , К, при n_3 , равном	
	1	5
Равномерное	427,75 / 422,21	421,96 / 409,54
Оптимальное	427,76 / 422,83	422,07 / 412,96

Примечание. Через косую черту даны значения T_{w2} для экранов без покрытия и позолоченных.

Таблица 3

Параметры ТЗП при применении оптимально расположенных экранов

Параметр	Значение параметра при n_3 , равном		
	6	7	8
Суммарная удельная масса, кг/м ²	6,546	6,527	6,508
Толщина слоя волокнистого материала, мм	50,1	49,2	48,3
Координаты установки экранов, мм	2,2; 6,8; 12,3; 19,0; 26,0; 33,3	2,1; 6,6; 12,7; 18,9; 25,6; 32,2; 39,4	2,1; 6,4; 11,5; 17,3; 23,4; 29,9; 36,8; 44,0
Снижение массы относительно модели ТЗП без экранов, %	9,08	9,35	9,61

Были рассмотрены модели ТЗП с одним и пятью экранами. Установлено (табл. 1), что при повышении отражательной способности увеличивается оптимальная глубина расположения экранов (от фронтальной поверхности), при этом расстояния между ними также возрастают. Данные табл. 2 показывают, что оптимизация расположения экранов без покрытия не позволяет заметно уменьшить температуру тыльной поверхности, в то время как для позолоченных экранов снижение температуры по сравнению с равномерным расположением достигает 3,42 К.

Задача снижения массы покрытия решалась для случая установки шести, семи и восьми позолоченных экранов. Как и ранее, максимальная температура тыльной поверхности ограничивалась 430 К. Суммарная удельная масса ТЗП, минимальная расчетная толщина слоя волокнистого материала и другие параметры ТЗП для этих вариантов приведены в табл. 3.

Выводы. Применение ТЗП с системой радиационных экранов, расположенных на оптимальном расстоянии друг от друга, позволяет снизить суммарную удельную массу ТЗП на 9,61 %, что с учетом большой площади защищаемой поверхности, характерной для МКА, обеспечивает существенное улучшение весовых характеристик аппарата в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myers D.E., Martin C.J., Blosser M.L. Parametric weight comparison of advanced metallic, ceramic tile, and ceramic blanket thermal protection systems // NASA Technical Memorandum. – 2000. – N 210289. – 44 p.
2. Reflective coating on fibrous insulation for reduced heat transfer / D.D. Hass et al. // NASA Contractor Report. – 1997. – N 201733. – 24 p.
3. Heat transfer in high temperature multilayer insulation / K. Daryabeigi et al. // Proc. 5th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures (Noordwijk, Netherlands, 17–19 May 2006). – 9 p.
4. Miller W.C., Collins J.O. Opacification of high temperature fibrous insulation // NASA Contractor Report. – 1984. – N 166578. – 30 p.
5. Weiland S., Handrick K., Daryabeigi K. Thermal testing and analysis of an efficient high-temperature multi-screen internal insulation // Proc. 29th Int. Thermal Conductivity Conf. (ITCC) – 17th Int. Thermal Expansion Symp. (ITES) (Birmingham, AL, USA, May 2007). – 12 p.
6. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 с.
7. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 281 с.

8. Дылько Ю.Б., Просунцов П.В. Применение моделей комбинированного теплообмена для проектирования теплозащитных покрытий многоразовых космических аппаратов // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Сер. Машиностроение. – Спец. вып. Прогрессивные материалы, конструкции и технологии ракетно-космического машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 50–58.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012