

Список литературы

- 1 Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications / E. P. Simonenko [et al.] // Russ. J. Inorg. Chem. 2013. – Vol. 58, no. 14. – P. 1669–1693. – DOI : 10.1134/S0036023613140039.
- 2 **Jacobson, N.** Active oxidation of SiC / N. Jacobson, D. L. Myers Oxid. Met. – 2011. – Vol. 75. – P. 1–25. – DOI : 10.1007/s11085-010-9216-4.
- 3 Theoretical investigation for the active-to-passive transition in the oxidation of silicon carbide / J. Wang [et al.] // Am. Ceram. Soc. – 2008. – Vol. 91. – P. 1665–1673. – DOI : 10.1111/j.1551-2916.2008.02353.x.
- 4 Preparation and hydrothermal corrosion behavior of C_p/SiCN and C_p/SiHfBCN ceramic matrix composites / J. Yuan // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – Vol. 35, no. 12. – P. 3329–3337.
- 5 Advances in ultra-high temperature ceramics, composites, and coatings / D. Ni [et al.] // J. Adv. Ceram. – 2022. – Vol. 11. – P. 1–56. – DOI : 10.1007/s40145-021-0550-6.
- 6 Microstructure and ablation behavior of C/C-SiC-(Zr_xHf_{1-x})C composites prepared by reactive melt infiltration method / Z. Liu [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16. – P. 2120. – DOI : 10.3390/ma16052120.
- 7 Ultra-high-temperature ablation behavior of SiC-ZrC-TiC modified carbon/carbon composites fabricated via reactive melt infiltration / Y. Zeng [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2020. – Vol. 40, is. 3. – P. 651–659. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.027.
- 8 Effects of LaB₆ on composition, microstructure and ablation property of the HfC-TaC-SiC doped C/C composites prepared by precursor infiltration and pyrolysis / C. Fang [et al.] // Corros. Sci. – 2021. – Vol. 184. – P. 109347. – DOI : 10.1016/j.corsci.2021.109347.
- 9 Effect of PAN-based and pitch-based carbon fibres on microstructure and properties of continuous C_p/ZrB₂-SiC UHTCMCs / D. Sciti [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. – Vol. 41. – Es. 5. – P. 3045–3050. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.05.032.
- 10 Ablation behavior and thermal conduction mechanism of 3D ZrC-SiC-modified carbon/carbon composite having high thermal conductivity using mesophase-pitch-based carbon fibers and pyrocarbon as heat transfer channels / D. Huang [et al.] // Composites Part B. – 2021. – Vol. 224. – P. 109201. – DOI : 10.1016/j.compositesb.2021.109201.
- 11 Influence of carbon preform density on the microstructure and ablation resistance of CLVD-C/C-ZrC-SiC composites / Q. He [et al.] // Corros. Sci. – 2021. – Vol. 190. – P. 109648. – DOI : 10.1016/j.corsci.2021.109648.
- 12 Effect of PyC interface phase on the cyclic ablation resistance and flexural properties of two-dimensional C_p/HfC composites / T. Feng [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. – 2021. – Vol. 41. – Es. 1. – P. 158–166. – DOI : 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.08.049.
- 13 The effect of carbon source addition order during sol-gel process on the properties of C/C-ZrC-SiC composites / C. Zeng [et al.] // Ceram. Int. – 2021. – Vol. 47, is. 24. – P. 35366–35377. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2021.09.080.
- 14 Microstructural regulation, oxidation resistance, and mechanical properties of C_p/SiC/SiHfBOC composites prepared by chemical vapor infiltration with precursor infiltration pyrolysis / Y. Lyu [et al.] // J. Adv. Ceram. – 2022. – Vol. 11. – P. 120–135. – DOI : 10.1007/s40145-021-0521-y.
- 15 Microstructure, mechanical and anti-ablation properties of SiC_{nw}/PyC core-shell networks reinforced C/C-ZrC-SiC composites fabricated by a multistep method of chemical liquid-vapor deposition / Q. He [et al.] // Ceram. Int. – 2019. – Vol. 45. – P. 20414–20426. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2019.07.018.
- 16 Structural characteristics and ablative behavior of C/C-ZrC-SiC composites reinforced with "Z-pins like" Zr-Si-B-C multiphase ceramic rods / X. Qing [et al.] // Ceram. Int. – 2020. – Vol. 46. – P. 18895–18902. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2020.04.211.
- 17 Improved microstructure and high temperature mechanical properties of C/C-SiC composites by introduction of ZrC nanoparticles / J. J. Sha [et al.] // Ceram. Int. – 2020. – Vol. 46. – Is. 6. – P. 8082–8091. – DOI : 10.1016/j.ceramint.2019.12.034.

УДК 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВНУТРИ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ВНУТРИ СЛОЕВ

М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

С развитием ракетно-космической индустрии возрастают требования к защите космических аппаратов от избыточного тепла и различного рода излучений. Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) является одним из материалов, которые обеспечивают эффективное терморегулирование в космических аппаратах. Уникальные теплоизоляционные характеристики ЭВТИ позволяют снизить интенсивность теплообмена элементов конструкции и оборудования космического аппарата с окружающей средой. Однако для эффективной работы ЭВТИ необходим учет скорости распространения тепла внутри слоев материала.

Математическое моделирование теплопереноса внутри ЭВТИ с учетом скорости распространения тепла внутри слоев материала является актуальной задачей для обеспечения эффектив-

ного терморегулирования космических аппаратов. Разработка интегрированной математической модели позволит более точно определить тепловые характеристики ЭВТИ и контролировать тепловой режим космического аппарата. Это способствует повышению надежности и эффективности работы космических аппаратов, что является важным условием для успешной реализации космических миссий.

Математическая модель основана на уравнениях теплопроводности и массопереноса. Уравнение теплопроводности описывает распределение температур внутри материала, а уравнение массопереноса учитывает перенос массы вещества (например, газа) внутри слоев ЭВТИ.

Модель учитывает следующие факторы.

1 Теплопроводность материала. Коэффициент теплопроводности будет учтен в уравнении теплопроводности для определения потока тепла внутри слоев ЭВТИ. Это позволит оценить эффективность материала в передаче или задержке тепла.

2 Тепловое сопротивление слоев материала. Учет теплового сопротивления слоев ЭВТИ позволяет определить, насколько легко или трудно происходит передача тепла через материал.

3 Скорость распространения тепла внутри слоев. Модель будет принимать во внимание скорость распространения тепла внутри слоев материала, что позволит оценить, как быстро происходит равномерное распределение тепла внутри ЭВТИ.

4 Граничные условия. В модели учтены различные граничные условия, такие как тепловой поток на границах слоев ЭВТИ и температура окружающей среды. Это позволит более реалистично воспроизвести тепловые процессы внутри материала.

Разработанную модель можно интегрировать в общую модель системы обеспечения теплового режима космического аппарата. Это позволяет оптимизировать работу системы управления тепловым режимом и предотвратить перегрев или охлаждение электроники и других элементов аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РФФ № 23-19-00684), выданного Московскому авиационному институту

УДК 539.3

О РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ УРАВНЕНИЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ НЕТОНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ К ЗАДАЧАМ СТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ

С. И. ЖАВОРОНОК, А. С. КУРБАТОВ

*ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва,
Российская Федерация*

Решение задач о дисперсии нормальных волн в тонких телах различной формы и структуры, являющееся ключевым элементом качественного исследования волноводов, может быть построено различными методами, в том числе путем разложения компонентов вектора перемещения в ряды Фурье по некоторой ортогональной системе функций нормальной координаты ζ , либо на основе конечно-элементной дискретизации волновода по толщине [1]. Данные подходы обладают рядом преимуществ перед матричными методами или степенными рядами, в частности, не требуют численного решения трансцендентного уравнения, зачастую приводящего к потере части корней [1]. При этом метод ортогональных рядов по полиномам Лежандра фактически представляет собой приложение общей теории нетонких неоднородных оболочек [2–4] к классу задач стационарной волновой динамики [5–8], обеспечивающее вполне удовлетворительную сходимость решений как по частотам запирающих распространяющихся нормальных мод [5], так и по фазовым частотам при ненулевых значениях волнового числа [6], а также по формам распространяющихся нормальных мод [7, 8]. Описание дисперсии затухающих нормальных мод требует формулировки спектральной задачи относительно волнового числа [1]. Такая постановка задачи на базе модели оболочки N -го порядка, интерпретируемой как двумерная Лагранжева система [3, 4], заданная на двумерном многообразии S множеством переменных поля первого рода $u_\alpha^{(k)}$, $u_3^{(k)}$, являющихся коэффициентами разложения вектора перемещения по биортогональной базисной системе функций нормальной ко-