

формации. Кроме того, исследованы двумерные процессы распространения нестационарных волн в поперечном сечении бесконечного полого цилиндра, состоящего из коаксиальных упругих слоев, при его неосесимметричном радиальном нагружении.

Исследованы одномерные волновые процессы в цилиндрах со столь большим количеством вязкоупругих слоев, что это позволило перейти к изучению динамики цилиндров с непрерывной радиальной неоднородностью материала. Задача с непрерывной неоднородностью заменялась аналогичной для тела тех же размеров, состоящего из большого числа однородных слоев. В определенном диапазоне изменения исходных данных расчеты показали сходимость результатов с увеличением количества слоев. Рассмотрены различные виды неоднородностей, когда мгновенный модуль сдвига и ядро сдвиговой релаксации непрерывно зависели от радиальной координаты, а остальные физико-механические параметры от нее не зависели. Изучено влияние неоднородностей такого типа на характер волновых процессов.

Таким образом, было проиллюстрировано, как, выбирая специальным образом свойства материала слоев в линейно-вязкоупругом многослойном композите, можно управлять нестационарным волновым процессом, происходящим в этом композите в результате внешних воздействий.

УДК 629.067.5

МЕТОДОЛОГИЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕД

Л. Н. РАБИНСКИЙ, О. В. ТУШАВИНА, Г. М. ФАЙКИН

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Тепловая защита космических летательных аппаратов должна быть многофункциональной и противостоять множеству факторов. Надежность таких систем зависит от выполнения ряда факторов, сформулированных к их проектированию и разработке. Системы тепловой защиты должны:

- противостоять действию как тепловых, так и силовых, газодинамических и космических факторов, возникающих при полете космического аппарата в атмосфере планеты и в открытом космосе;
- обладать минимальной массой при сохранении высокой степени надежности в любых условиях эксплуатации;
- обладать теплоизоляционными свойствами на всей траектории полета космического летательного аппарата (КЛА) для обеспечения заданного температурного режима в бортовых отсеках;
- сохранять свои характеристики при длительном полете в космосе или при хранении аппарата на стартовой позиции в течение десяти и более лет;
- быть простыми в изготовлении, не содержать в конструкции дорогостоящих материалов.

Одной из основных задач методологии тепловой защиты современных КЛА является разработка математической модели термохимического разрушения углеродных теплозащитных материалов (ТЗМ) в потоке высокотемпературного воздуха.

Разработка математической модели механизма разрушения теплозащитных материалов разных классов применительно к проблеме тепловой защиты космических аппаратов относится к категории сложной, проблемной задачи. Эта задача решалась комплексно, с использованием как экспериментальных, так и теоретических исследований. Модель представляет собой систему различного типа уравнений (дифференциальных и алгебраических – линейных и нелинейных), математически описывающих физико-химические процессы, сопутствующие кинетическому, диффузионному и сублимационному режимам разрушения углеродных ТЗМ. Учитывается, что все указанные выше режимы взаимодействия реализуются не в статической, а в динамической (подвижной) окружающей среде, когда теплозащитное покрытие обтекается гиперзвуковым потоком химически активного газа, что связывает процессы в материале с системой дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепло- и массообмена в химически активном пограничном слое.

Приводятся результаты исследований по упрощению и линеаризации разработанной математической модели термохимического разрушения углеродных теплозащитных материалов и возможности получения аналитических решений для частных случаев [1–4].

Работа выполнена в Московском авиационном институте в рамках выполнения гранта РФФИ (проект № 20-08-00880).

Список литературы

- 1 Rabinskiy, L. N. Experimental investigation and mathematical modelling of heat protection subjected to high-temperature loading / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina // *Periodico Tche Quimica*. – No. 15 (Special Issue 1). – 2018. – P. 321–329.
- 2 Rabinsky, L. N. Mathematical modeling and experimental studies of thermal protection of composite materials under high-intensity effects taking into account thermal diffusion / L. N. Rabinsky, O. V. Tushavina // *STIN*. No. 4. – 2018. – P. 22–26.
- 3 Rabinskiy, L. N. Thermal protection of aircraft units using film cooling with regard to unsteady heat conductivity / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina // *INCAS BULLETIN*. – 2019. – Vol. 11 (Special Issue). – P. 203–211. – DOI: 10.13111/2066-8201.2019.11.S.20.
- 4 Rabinskiy, L. N. Plain non-stationary problem of the effect of a surface load on an elastic-porous half-space / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina, G. V. Fedotenko // *ASIA LIFE SCIENCES*. – No. 19(1). – 2019. – P. 149–162.

УДК 629.7.067.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ И АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Л. Н. РАБИНСКИЙ, О. В. ТУШАВИНА

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Современные высокоскоростные летательные аппараты подвергаются интенсивному аэродинамическому нагреву, особенно при гиперзвуковых скоростях (числа Маха набегающего потока $M_n \geq 5$). Основным источником такого нагрева являются адиабатическое сжатие газа в ударном слое между ударной волной и телом и трение в пристенных течениях (в пограничном слое). Для надежности функционирования высокоскоростных летательных аппаратов необходимы эффективные способы тепловой защиты элементов конструкций ЛА, позволяющие преодолеть так называемый «тепловой барьер», заключающийся в том, что при возрастании скорости ЛА температура газа возрастает примерно пропорционально квадрату скорости, причем теоретически установлено, что «тепловой барьер» можно преодолеть только при активных способах тепловой защиты, а именно путем создания системы автоматического регулирования подачи в высокотемпературные пограничные слои жидких и газообразных охладителей [1–5]. В настоящее время в качестве тепловой защиты высокоскоростных ЛА активно используются композиционные материалы, графиты и графитосодержащие материалы, которые являются анизотропными различной степени. В данной работе делается попытка на основе известных допущений о свойствах материала ленинизации существующих соотношений. При этом в первом приближении удастся определить тепловые потоки от газодинамического течения и распределения этих тепловых потоков в теле с дальнейшим определением в нем поля температур, от которых в существенной степени зависит живучесть всего ЛА и уровень тепловых потоков от газа к телу. Приводятся примеры расчетов.

Работа выполнена в Московском авиационном институте в рамках выполнения гранта РФФИ (проект № 20-08-00880).

Список литературы

- 1 Rabinskiy, L. N. Experimental investigation and mathematical modelling of heat protection subjected to high-temperature loading / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina // *Periodico Tche Quimica*. – No. 15 (Special Issue 1). – 2018. – P. 321–329.
- 2 Rabinsky, L. N. Mathematical modeling and experimental studies of thermal protection of composite materials under high-intensity effects taking into account thermal diffusion / L. N. Rabinsky, O. V. Tushavina // *STIN*. – No. 4. – 2018. – P. 22–26.
- 3 Rabinskiy, L. N. Thermal protection of aircraft units using film cooling with regard to unsteady heat conductivity / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina // *INCAS BULLETIN*. – 2019. – Vol. 11 (Special Issue). – 2019. – P. 203–211. – DOI: 10.13111/2066-8201.2019.11.S.20.
- 4 Rabinskiy, L. N. Plain non-stationary problem of the effect of a surface load on an elastic-porous half-space / L. N. Rabinskiy, O. V. Tushavina, G. V. Fedotenko // *ASIA LIFE SCIENCES*. – No. 19(1). – 2019. – P. 149–162.
- 5 Формалев, В. Ф. Математическое моделирование сопряженного теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник. – М. : Ленанд, 2019. – 316 с.