

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕНЗОРА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

В. Ф. ФОРМАЛЕВ, Ек. Л. КУЗНЕЦОВА

Московский авиационный институт, (НИУ), Российская Федерация

В условиях высокоинтенсивного аэрогазодинамического нагрева элементов конструкций гиперзвуковых летательных аппаратов в качестве теплозащитных материалов используются анизотропные материалы (графиты, графитосодержащие, композиционные материалы и др.). Теплозащитные материалы с высокой степенью продольной анизотропии (отношение продольного компонента тензора теплопроводности к поперечному) можно использовать для регулирования тепловых потоков от газодинамического пограничного слоя. Действительно, если спроектировать анизотропную теплозащиту таким образом, чтобы продольная степень анизотропии составляла десятки, а то и сотни единиц, то появляется возможность канализировать тепловые потоки в теле от непосредственно затупления в хвостовую часть затупленного тела, что приводит к повышению температуры хвостовой части, уменьшению градиента температуры на границе «газ – тело» со стороны газа и, как следствие, к уменьшению тепловых потоков от газа к боковой поверхности затупленного тела.

Аналогичные исследование с помощью аналитических решений задач теплопроводности рассматривались в работах Аттеткова А. В., Волкова И. К. [1], Формалева В. Ф. и Колесника С. А. [3–10]. Однако аналитическое решение двумерной задачи анизотропной теплопроводности в условиях конвективно-кондуктивного теплообмена получено и исследовано впервые.

В работе, на основе впервые полученного аналитического решения задачи теплопереноса в анизотропном композиционном материале в условиях конвективно-кондуктивного теплообмена при обтекании высокотемпературным газодинамическим пограничным слоем, исследовано влияние компонентов тензора теплопроводности композиционного теплозащитного материала на тепловые потоки от газа к телу. Такой анализ позволил установить заметное снижение тепловых потоков к боковой поверхности затупленного анизотропного тела в случае, если использовать композиционный теплозащитный материал с высокой степенью продольной анизотропии (например, использовать пиролитические графиты, у которых отношение продольного коэффициента теплопроводности к поперечному может достигать ста и более). Основной вклад в уменьшение тепловых потоков вносит уменьшение градиента температур на границе газа и тела со стороны газа за счет повышения температуры тела вниз по потоку. Кроме этого, при повышении температуры газа на стенке увеличивается динамическая вязкость и уменьшается плотность, что уменьшает местные числа Рейнольдса и также содействует уменьшению тепловых потоков.

Полученные результаты показывают, что увеличение чисел Фурье, вычисленных по продольной теплопроводности ортотропного тела, существенно снижают тепловые потоки не только за счет уменьшения коэффициента теплоотдачи, но и за счет значительного продольного перетока теплоты из-за высокой степени продольной анизотропии.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: №18-01-00444А, №17-01-00587А.

Список литературы

- 1 Аттетков, А. В. Температурное поле анизотропного полупространства, подвижная граница которого содержит пленочное покрытие / А. В. Аттетков, И. К. Волков // Известия РАН. Сер. Энергетика. – 2015. – № 3. – С. 39.
- 2 Формалев, В. Ф. О сопряженном теплообмене при аэродинамическом нагреве анизотропных тел с высокой степенью анизотропии / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник, И. А. Селин // Тепловые процессы в технике. – 2016. – Т. 8. – № 9. – С. 388–394.
- 3 Колесник, С. А. Метод идентификации нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных материалов / С. А. Колесник // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. – № 2. – С. 119–132.
- 4 Колесник, С. А. Идентификация компонентов тензора теплопроводности анизотропных композиционных материалов / С. А. Колесник // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 111–120.
- 5 Формалев, В. Ф. Математическое моделирование аэрогазодинамического нагрева затупленных анизотропных тел / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник. – М. : Изд-во МАИ, 2016. – 160 с.

- 6 **Формалев, В. Ф.** Методика, алгоритм и программный комплекс по определению теплового состояния охлаждаемых микроракетных двигателей / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник // Труды МАИ. – 2014. – № 78.
- 7 **Formalev, V. F.** Temperature-dependent anisotropic bodies thermal conductivity tensor components identification method / V. F. Formalev, S. A. Kolesnik // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 123. – P. 994–998.
- 8 **Формалев, В. Ф.** О волновом теплопереносе в окрестности начального момента времени при интенсивном конвективно-кондуктивном нагреве / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник, Е. Л. Кузнецова // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 3. – С. 412–416.
- 9 **Формалев, В. Ф.** Локально-неравновесный теплоперенос в анизотропном полупространстве под действием нестационарного точечного источника тепловой энергии / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник, И. А. Селин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2018. – № 5. – С. 99–111.
- 10 **Формалев, В. Ф.** Теплоперенос в полупространстве с трансверсальной анизотропией под действием сосредоточенного источника теплоты / В. Ф. Формалев, С. А. Колесник // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 1. – С. 55–63.

УДК 652.225.078

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ СВЯЗЕЙ В СИСТЕМЕ «ГРУЗ – УПАКОВКА – ВАГОН» НА УСКОРЕНИЕ ГРУЗА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ В КРЫТОМ ВАГОНЕ

О. С. ЧАГАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Надежность крепления грузов на железнодорожном транспорте представляет собой один из важнейших факторов обеспечения безопасности движения поездов. В последнее время наблюдается тенденция переключения перевозок ценных грузов с железнодорожного на автомобильный транспорт, которая связана с несохранностью грузов, обусловленной ненадежным креплением. Напряжения и деформации в элементах упаковки и вагона, которые могут привести к несохранной перевозке груза, могут возникать вследствие движения вагонов и производства маневровых операций. Наличие недостатков в конструкции и содержании сортировочных горок также зачастую приводит к повреждению как вагонов, так и находящихся внутри тарно-упаковочных грузов, большинство которых относится к ценным и хрупким. Указанные обстоятельства наряду с постоянным увеличением номенклатуры тарно-упаковочных грузов вызывают необходимость совершенствования методик расчета креплений.

Обеспечение прочности креплений при осуществлении перевозки, проведении погрузочно-разгрузочных работ требует информации о значениях сил, действующих на груз при перевозке, в том числе низкочастотных, ударных и вибрационных нагрузок. На незакрепленный груз, находящийся в крытом вагоне, помимо сил тяжести и трения, действуют силы инерции в продольном, поперечном и вертикальном направлениях. Продольные инерционные силы возникают при переходных режимах движения поезда, во время маневров и роспуска с горок. Воздействие на груз поперечных и вертикальных сил инерции обусловлено колебаниями движущегося вагона, основными видами которых являются: подпрыгивание, галомирование или продольная качка, боковая качка, боковые колебания в поперечном направлении или поперечный относительный сдвиг и вилание.

Для анализа влияния параметров крепления и свойств упаковочной тары на динамику системы «груз – упаковка – вагон» разработана обобщенная расчетная схема, включающая перевозимый груз, упаковку и кузов вагона. Между грузом и упаковкой, а также упаковкой и вагоном имеются упруго-вязкие связи, моделирующие деформативность упаковки. Кроме того, между полом вагона и упаковкой имеются силы сухого трения. Также было учтено, что материалы, из которых изготовлена упаковка и средства крепления, могут иметь различные свойства. Помимо сил упругости, в общем случае нелинейно зависящих от относительного смещения тел (используется степенная зависимость с показателем n), также принимаются во внимание силы неупругого сопротивления движению груза относительно упаковки и упаковки относительно вагона. Силы неупругого сопротивления пропорциональны скорости изменения относительного смещения тел. С учетом подстановки выражений ускорений груза и ряда преобразований получена система дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая движение груза и упаковки: