

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ  
ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ И УГЛАХ ПОВОРОТА НОРМАЛИ**

*В. Г. ДМИТРИЕВ, О. В. ЕГОРОВА, А. Р. ПОПОВА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Рассматривается осесимметричное нелинейное деформирование в общем случае многослойных оболочечных конструкций переменной толщины  $h$  под действием статической системы поверхностных нагрузок общего или локального характера. Напряженно-деформированное состояние произвольных оболочек вращения при больших перемещениях точек координатной поверхности и неограниченных углах поворота нормали к ней описывается через изменения декартовых координат  $x, y$  в процессе упругого деформирования. Разработанная математическая модель аналогична классической модели Кирхгофа – Лява с использованием гипотезы «жесткой» нормали. Рассматриваются оболочки вращения при осесимметричном нагружении как «следающими», так и консервативными нагрузками, а также оболочки, замкнутые в полюсе. Для многослойного пакета в целом принимаются условия жесткого контакта слоев без взаимного отрыва и проскальзывания. На краях оболочки рассматриваются варианты граничных условий в виде жесткого защемления и шарнирного закрепления.

При построении дискретного аналога исходной существенно нелинейной краевой задачи используется метод конечных разностей (МКР) с построением вычислительного алгоритма решения сеточных уравнений на основе квазидинамической формы метода установления путем замены сеточных аналогов уравнений равновесия на нестационарные уравнения, совпадающие по форме с уравнениями движения оболочки в вязкой среде, характеризуемой искусственным коэффициентом вязкости  $\varepsilon$ . Параметры итерационного процесса – удельные вязкости искусственной среды  $\varepsilon$  и шаг по времени  $\Delta t$  – определяются из условия ускорения сходимости и устойчивости разностной схемы путем оценки наименьших и наибольших собственных чисел для соответствующих разностных операторов в МКР. Построена корректная конечно-разностная схема для расчета оболочек, замкнутых в полюсе, а также разработаны вычислительные алгоритмы для исследования особенностей деформирования неоднородных оболочек вращения при действии как для консервативных, так и «следающих» нагрузок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 19-01-00675).*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО  
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

*М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Рассматриваются физико-математические основы функционирования теплозащитных композиционных материалов (КМ) в условиях аэрогазодинамического нагрева гиперзвуковых летательных аппаратов, а также в условиях точечного воздействия высокоэнергетических излучений. На основе новых законов разложения связывающих КМ и нелинейной фильтрации предложена комплексная физико-математическая модель тепломассопереноса в анизотропных КМ с учетом связанностей полей деформации и температуры, пригодная для исследований большинства КМ, используемых в качестве теплозащитных элементов современных летательных аппаратов (ЛА). Разработана методология численного решения всей комплексной проблемы на основе экономичных абсолютно устойчивых

численных методов. Получены многочисленные результаты численного моделирования теплового состояния КМ в условиях их термического разрушения при высоких температурах.

Далее приводятся результаты численного моделирования теплопереноса в анизотропных композиционных материалах на основе разработанного комплекса программ, реализующего разработанную комплексную математическую модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-08-00880).

УДК 519.71, 51-74, 681.5, 303.732.4, 62.752; 621.534; 629.4.015

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. В. ЕЛИСЕЕВ, И. С. СИТОВ, Р. С. БОЛЬШАКОВ, А. В. ЕЛИСЕЕВ

Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Вибрационные технологические машины широко используются в различных производствах [1–3]. Реализация вибрационных технологических процессов требует решения ряда специфических задач динамики, характерных для механических колебательных систем. Значимое место среди машин, обеспечивающих вибрационные технологические процессы, занимают вибрационные стенды с рабочими органами в виде протяженных твердых тел. Вопросы формирования вибрационных полей в форме распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа рассмотрены в работах по прикладной теории колебаний в приложениях к проблемам вибрационного перемещения, транспортирования, организации специальных режимов соударения и формирования эффектов модификации свойств поверхности деталей сложной формы [1, 4–5]. Необходимость решения вопросов повышения производительности и динамического качества вибрационных технологических машин стимулирует поиск и разработку способов решения специфических задач обеспечения надежности и безопасности эксплуатации технических объектов, аппаратуры и оборудования в условиях интенсивных динамических нагружений [6–8].

В докладе представлена оригинальная научно-методологическая позиция, реализуемая в рамках методов структурного математического моделирования, ориентированная на разработку технологии введения дополнительных связей в механическую колебательную систему в виде инерционно-упругой цепи с регулируемыми элементами.

1 Принципиальная схема технологического объекта может быть приведена к виду расчетной схемы механической колебательной системы с двумя степенями свободы (рисунок 1).

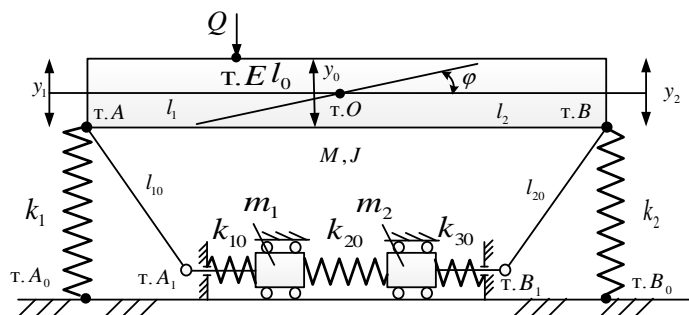


Рисунок 1 – Расчётная схема вибрационной технологической машины

2 Система состоит из твердого тела с массой  $M$  и моментом инерции относительно центра масс (т.  $O$ , рисунок 1)  $J$ . Центр масс находится на расстояниях  $l_1$  и  $l_2$  до концов твердого тела (т.  $A$ ,  $B$ ). Возбуждение колебаний относится к силовому типу и реализуется приложением гармонической силы  $Q$  в т.  $E$ , смещенной относительно центра масс на плечо  $l_0$ .

3 Для оценки динамических свойств системы рациональным представляется переход к структурным математическим моделям. В этом случае механической колебательной системе (рисунок 1) сопоставлена структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления, дифференциальные уравнения движения при нулевых начальных условиях переводятся преобразованиями Лапласа в систему в операторной форме: