ХАРЬКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. Н. Е. ЖУКОВСКОГО

На правах рукописи

КЕСТУРИ МОХАМЕД АБДЕЛЬБАСЕД

УДК 539.3

Решение связанной динамической задачи термоупругости для осесимметричных оболочек вращения в условиях обобщенной термомеханики

специальность 01.02.04. - механика деформированного твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
В. Н. Каменецкий

Харьков 1993

Диссертация является рукописью

Работа выполнена на кафедре строительной механики Харьковского инженерно-строительного инсттитута.

Научный руководитель - кандидат технических наук
Каменецкий В. Н.

Официальные опоненты - доктор технических наук, профессор
Воробьев Ю. С.
кандидат технических наук
Шеломов Н. А.

Ведущая организация - Промстрой НИИ проект
г. Харьков

Защита состоится "24" XII 1993г. в часов на заседании специализированного совета К. 053. 14. 01. в ХАИ по адресу: 310070, г. Харьков ул. Чкалова, 17, ХАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "9" XII 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат техн. наук, доцент Корнилов Г. Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эксплуатация некоторых элементов строительных конструкций, в частности, воронок емкостей для горячих, сыпучих, дымовых труб, агрегатов химического и металлургического производства элементов реактивных двигателей связана с воздействием интенсивных тепловых потоков, нарастающих за короткий промежуток времени, т.е. нагрузок теплового удара.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) таких элементов носит явно динамический характер. При его определении для обеспечения требуемой надежности конструкций должны учитываться условия связанности полей деформаций и температур и время релаксации температуры.

Методика определения НДС в подобных условиях относится к теории обобщенной динамической задачи термоупругости. Однако до настоящего времени в проектной практике используются решения несвязанных квазистатических задач, когда не учитывается динамика процесса деформирования. Кроме того, недостаточно точно учитывается влияние характера теплообмена с окружающей средой и время релаксации температуры. Решение отдельных, простых задач в обобщенной постановке носит обычно аналитический характер. В связи с этим численное решение обобщенной динамической задачи термоупругости, в частности, для оболочек вращения с произвольной формой меридианы, подверженных тепловому удару, которое учитывало бы время релаксации температуры, условия связанности полей деформаций и температур в зависимости от тепловых граничных условий является, на наш взгляд, актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка численной методики расчета произвольных осесимметричных оболочек в рамках связанной динамической задачи термоупругости, а также анализ влияния таких факторов,как деформация сдвига и конечная скорость распространения тепла, на НДС оболочек при тепловых воздействиях

Научная новизна работы:

I. Вывод разрешающей системы дифференциальных уравнений связанной динамической задачи термоупругости для оболочек вращения с учетом деформации сдвига и конечной скорости распространения тепла.

2. Результаты вращения связанной динамической задач. термоупругости для отдельных типов оболочечных конструкций и сравнение этих результатов с аналогичным решением несвязанной задачи упругости.

3. Анализ влияния деформации сдвига, конечной скорости распространения тепла как в отдельности так и при их совместном учете на НДС оболочек с различным отношением радиуса срединной поверхности R к их толщине h.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в возможности применения разработанной методики для выполнения уточненных расчетов оболочечных конструкций, работающих в условиях резко нестационарных тепловых воздействий.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы доложены на двух вузовских конференциях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается путем решения ряда тестовых задач и сравнения полученных результатов с существующими численными и аналитическими решениями, приведенными в работах других авторов.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы и результаты исследований автора опубликованы в двух работах.

Обьем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 108 наименований. Работа содержит 72 страницы машинописного текста и 48 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность связанной динамической задачи термоупругости для оболочек вращения с произвольной формой меридиана при действии осесимметричной системы температурных нагрузок. Сформулированы основные направления выполненных исследований, отмечена новизна полученных результатов и их практическая ценность.

В первой главе сделан краткий обзор работ в области связанной и несвязанной задач для различных видов оболочек. Значительный вклад в постановку задач, методы их решения внесли многие отечественные и зарубежные ученые такие как А.Д.Коваленко, Я.С.Подстригач, Б.Боли, Дж.Уэйнер, П.М.Огибалов, В.Новацкий, А.П.Синицин, В.Ф.Грибанов, И.Ф.Образцов, Б.В.Нерубайло, А.И.Иванов, В.Г.Фомин, М.Био, В.И.Даниловский и Ю.М.Коляно.

Анализируя обзор литературы можно отметить, что практически отсутствуют исследования влияния деформации сдвига на НДС подобного типа оболочек, а влияние учета конечной скорости распространения тепла исследовано недостаточно. Решение поставленной задачи может быть получено только на базе численных методов. При этом, несмотря на то, что МКЭ позволяет учитывать сложную геометрию тела, однородность и анизотропность материала, в случае оболочечных конструкций более эффективным является использование метода дискретной ортогонализации С.К.Годунова для численного решения систем обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, которые обеспечивают высокую точность и устойчивость вычислительного процесса. Поэтому для успешного применения метода дискретной ортогонолизации должна быть записана разрешающая система дифференциальных уравнений связанной динамической задачи термоупругости, вывод которой рассматривается в следующей главе.

Вторая глава посвящена методике решения связанной динамической задачи термоупругости.

Рассматривается тонкостенная оболочка вращения в рамках гипотезы Кирхгофа-Лява с использованием варианта теории оболочек, основанного на допущениях С.П.Тимошенко.
Выберем в качестве координатной срединную поверхность оболочки. образованную вращением плоской кривой. Отнесем эту поверхность к криволинейной ортогональной системе координат α_1, α_2, направления которых совпадают с линиями главных кривизн. Для данной задачи разрешающая система дифференциальных уравнений несвязанной динамической задачи термоупругости, полученная на основе уравнений движения, физических и геометрических соотношений, приведена в [1]. Очевидно, что для связанной задачи эта система должна быть дополнена уравнением теплопроводности, которое в выбранной системе координат с учетом осевой симметрии имеет вид [2]:

$$\frac{1}{A_1 A_2}\left[\frac{\partial}{\partial \alpha_1}\left(\frac{A_2}{A_1}\frac{\partial T}{\partial \alpha_1}\right)\right] + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + (K_1 + K_2)\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_r}{a}\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\gamma_t}{a}\frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

Приведенное уравнение (I) можно привести к системе обыкновенных линейных дифференциальных уравнений I-го порядка вида

$$\frac{1}{A_1}\frac{d\bar{Y}}{d\alpha_1} = \bar{F}(\alpha_1\bar{Y}) + \bar{B}(\alpha_1) \qquad (2)$$

Введем обозначения $(\ldots)' = \frac{1}{A_1}\frac{\partial(\ldots)}{\partial\alpha_1}$; $\psi = \frac{1}{A_2}A_2'$

Тогда уравнение теплопроводности может быть переписано в виде:

$$\psi T' + T'' + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + (K_1+K_2)\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_r}{a}\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\gamma_t}{a}\frac{\partial e}{\partial t} \qquad (3)$$

Выберем в качестве основных неизвестных

$$y_1 = T;\quad y_2 = T' = q$$

Тогда

$$q' = -\psi q - (K_1+K_2)\frac{\partial T}{\partial Z} - \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_r}{a}\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\gamma_t}{a}\frac{\partial e}{\partial t} \qquad (4)$$

$$T' = q$$

Для сведения двумерной краевой задачи к одномерной воспользуемся методом прямых, в котором операция дифференцирования по переменной z заменяется ее конечноразностным аналогом

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta h};\qquad \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta h^2},$$

где i - номер произвольной линии по толщине оболочки;(Рис. 1)

Δh - шаг линии.

Производные по времени также заменяются конечно-разностными соотношениями

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{T_j - T_{j-1}}{\Delta t};\qquad \frac{\partial^2 T_j}{\partial t^2} = \frac{T_j - 2T_{j-1} + T_{j-2}}{\Delta t^2},$$

где j - номер шага по времени;

Δt - шаг по времени.

Таким образом, дифференциальное уравнение теплопроводности (3) приводится к системе 2(n-I) дифференциальных уравнений вида (2) относительно неизвестных

$$\bar{Y}^T = \left\{T_1 q_1 T_2 q_2 \ldots T_{n-2} q_{n-2} T_{n-1} q_{n-1}\right\}^T$$

В этих уравнениях вектор $\bar{F}(\alpha_1\bar{Y})$ связан с однородным решением системы, а $\bar{B}(\alpha_1)$ с неоднородным решением.

Для произвольного шага по времени j и произвольной линии $i (i=1,\ldots,n-1)$ вектор $\bar{F}(\alpha_1,\bar{Y})$ записывается в виде

$$f_{2i-1} = q_i$$

$$f_{2i} = -\gamma q_i - (k_1+k_2)\frac{T_{i+1}-T_{i-1}}{2\Delta h} - \frac{T_{i+1}-2T_i+T_{i-1}}{\Delta h^2} + \frac{1}{a}\frac{T_i^j}{\Delta t} + \frac{\tau_r}{a}\frac{T_i^j}{\Delta t^2} + \frac{\gamma_t}{a}\frac{e_i^j}{\Delta t} \qquad (5)$$

Вектор правых частей $\bar{B}(\alpha_1)$ записывается следующим образом

$$b_k = 0, \quad K = 1,3,5,\ldots,2n-1$$

$$b_{2i} = -\frac{1}{a}\frac{T_i^{j-1}}{\Delta t} + \frac{\tau_r}{a}\frac{T_i^{j-2}-2T_i^{j-1}}{\Delta t^2} - \frac{\gamma_t}{a}\frac{e_i^{j-1}}{\Delta t} \qquad (6)$$

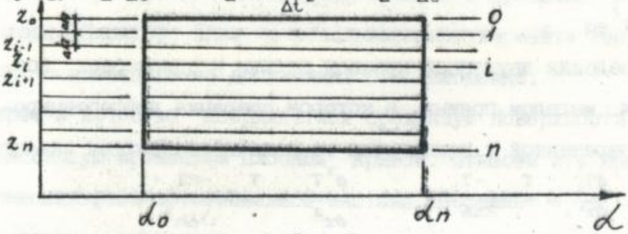

Рис.I.

Для первой и последней линии данные уравнения имеют наибольшие отличия в связи с необходимостью учета граничных условий на наружной и внутренней поверхностях оболочки.

В предыдущих уравнениях, описывающих задачу теплопроводности, входит первый инвариант тензора деформации e_i $(i=1,2,\ldots,n-1)$, который должен быть получен из задачи прочности.

Таким образом, для получения разрешающей системы дифференциальных уравнений связанной динамической задачи термоупругости выберем вектор основных неизвестных в виде:

$$\bar{Y}^T = \left\{T_1 q_1 T_2 q_2 \ldots T_{n-2} q_{n-2} T_{n-1} q_{n-1} N_{11} Q_{11} M_{11} UW\varphi_1\right\}^T$$

Первые 2(n-I) уравнений вычисляются по зависимостям (5), (6). Последние 6 неизвестных соответствуют задачам прочности и вычисляются по следующим формулам [1]:

для составляющих вектора $\bar{F}(\alpha_1 \bar{Y})$

$$f_1 = \psi(N_{22} - y_1) - k_1 y_2 + \psi(\nu_2 \bar{N}_{1t} - \bar{N}_{2t}) - \rho h \frac{2}{\Delta t^2} y_4;$$

$$f_2 = k_1 y_1 - \psi y_2 + k_2 N_{22} + k(\nu_2 \bar{N}_{1t} - \bar{N}_{2t}) - \rho h \frac{2}{\Delta t^2} y_5;$$

$$f_3 = \psi(M_{22} - y_3) + y_2 + \psi(\nu \bar{M}_{1t} - \bar{M}_{2t});$$

$$f_4 = E_{11} - k_1 y_5 + \frac{\bar{\bar{N}}_{1t}}{B_{11}};$$

$$f_5 = k_1 y_4 - y_6 + \frac{y_2}{D_{12}};$$

$$f_6 = k_{11} + \frac{M_{1t}}{D_{11}}.$$

для составляющих вектора $\bar{B}(\alpha_1)$

$$B_1 = -q_1 + \psi(\nu_2 \bar{\bar{N}}_{1t} - \bar{\bar{N}}_{2t}) + \frac{\rho h}{\Delta t^2}\left[5y_4^{j-1} - 4y_4^{j-2} + y_4^{j-3}\right];$$

$$B_2 = -q_z + k_2(\nu_2 \bar{\bar{N}}_{1t} - \bar{N}_{2t}) + \frac{\rho h}{\Delta t^2}\left[5y_5^{j-1} - 4y_5^{j-2} + y_5^{j-3}\right];$$

$$B_3 = -m_1 + \psi(\nu_2 \bar{\bar{M}}_{1t} - \bar{\bar{M}}_{2t})$$

$$B_4 = \bar{\bar{N}}_{1t}/B_{11}; \; B_5 = 0; \; B_6 = \bar{\bar{M}}_{1t}/D_{11}$$

Здесь $y_1 = N_{11}$, $y_1 = Q_{11}$, $y_3 = M_{11}$, $y_4 = U$, $y_5 = W$, $y_6 = \varphi_1$

B_{11}, D_{11}, D_{12} – жесткостные характеристики оболочки

$N_{1t}, \bar{N}_{1t}, M_{1t}, \bar{M}_{1t}$ – температурные усилия в оболочке

где $N_{1t} = \bar{N}_{1t} + \bar{\bar{N}}_{1t}$; $M_{1t} = \bar{M}_{1t} + \bar{\bar{M}}_{1t}$ (I≠2)

Уравнение (I),(3),(4) записаны с учетом конечной скорости распространения тепла, т.е. в рамках обобщенной теории теплопроводности. В случае задания $\tau_r = 0$, т.е. задания бесконечной скорости распространения тепловой энергии, эти уравнения переходят в обычные уравнения теплопроводности.

Третья глава посвящена тестированию дифференциальных уравнений и всего программного комплекса, который был осуществлен по трем этапам. На первом этапе решается нестационарная задача термоупругости для проверки правильности полученных систем дифференциальных уравнений. На втором этапе решается тестовая задача о вынужденных колебаниях оболочки под действием внезапно-приложенной нагрузки. Третий этап заключается в решении тестовой связанной задачи термоупругости.

В качестве примера применения изложенной методики рассмотрим осесимметричные колебания круглой свободноопертой пластины, обусловленные тепловым ударом. Решение данной задачи представлено в [2]. Нижняя поверхность пластины $z=-h/2$ и боковые поверхности идеально теплоизолированы. В центре имеется отверстие, радиус которого составляет I/70 радиуса пластины. В качестве граничных условий на краях этого отверстия принимались отсутствие продольного перемещения и угла поворота при возможном нормальном перемещении сечения оболочки. Оболочка разбивалась по толщине на 4 равные части. Решение получено в интервале времени от 0 до 0,I2с. На этом интервале было задано 200 точек интегрирования по времени. По длине пластины в расчете было принято 200 точек интегрирования, каждая из которых являлась и точкой ортогонализации. В качестве материала пластины была принята сталь. Задача решалась в 2-х вариантах как связанная и несвязанная. Полученные результаты представлены на рис.I. Здесь сплошной линией показан график нормальных перемещений в начальной точке пластины, соответствующей контуру внутреннего центрального отверстия с учетом связанности. Пунктирной линией показан график нормальных перемещений той же точки оболочки в случае решения несвязанной задачи термоупругости.

Сравнение полученных решений с результатами, представленными в [2] показывает их хорошее совпадение.

Четвертая глава посвящена исследованию и анализированию влияния параметров связанности, сдвига и конечной скорости распространения тепла на НДС трех типов оболочек вращения: сферической, цилиндрической и тороидальной, имеющих разные относительные толщины h/R.

В заключении приводятся основные результаты выполненной работы и их практическое значение сводится к следующему:

1. Получена разрешающая система линейных дифференциальных уравнений связанной динамической задачи термоупругости для оболочек вращения постоянной толщины с произвольной формой образующей в условиях осесимметричного нагружения произвольными силовыми и температурными нагрузками. Оболочка может быть изготовлена из упругих ортотропных и изотропных материалов, подчиняющихся обобщенному закону Гука, при условии совпадения главных направлений упругости с главными геометрическими направлениями оболочки. При выводе разрешающей системы дифференциальных уравнений задачи использованы гипотезы С.П.Тимошенко о постоянстве деформаций сдвига по толщине оболочки. Кроме того, рассматривается обобщенное (гиперболическое) уравнение теплопроводности, учитывающее конечную скорость распространения тепла.

2. Для решения полученной системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений использован метод дискретной ортогонализации С.К.Годунова, отличающийся высокой точностью и устойчивостью вычислительного процесса. Указанная методика реализована в виде пакета прикладных программ, написанных на языке QBASIC 4.5 для IBM PC и работающих под управлением MS DOS 5.0.

3.С помощью разработанного комплекса программ получено решение связанной динамической задачи термоупругости для отдельных типов оболочечных конструкций: цилиндрической, сферической и тороидальной оболочек при задании температуры, теплового потока и условий конвективного теплообмена на поверхностях указанных оболочек. Результаты расчета сравнивались с аналогичными решениями несвязанной задачи термоупругости.

4.Проанализировано влияние эффекта связанности, учета деформации сдвига и конечной скорости распространения тепла на НДС указанных типов оболочек. При этом рассмотрено как отдельное влияние каждого из факторов, так и их совместный учет при решении оболочек. Показано, что уточненное решение связанной динамической задачи термоупругости наиболее существенно для оболочек с достаточно большой относительной толщиной $h/R=1/60$, а также для тонкостенных оболочек, если процесс распространения тепла направлен вдоль образующей оболочки. В этом случае разница во внутренних усилиях и перемещениях составляет в среднем 5-6%, хотя в отдельных точках может доходить до 20%.

Полученные результаты и разработанный программный комплекс могут быть использованы для уточненных расчетов оболочечных конструкций, работающих в условиях резко нестационарно тепловых воздействий.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях

1. Каменецкий В.Н., Кестури М.А. "Решение связанной динамической задачи термоупругости для осесимметричных оболочек", в ЦНТЭИ. N107-93 1993г.

2. Каменецкий В.Н., Кестури М.А. "Решение связанной динамической задачи термоупругости для осесимметричных оболочек с учетом конечной скорости распространения тепла", в ЦНТЭИ. N108-93 1993г.

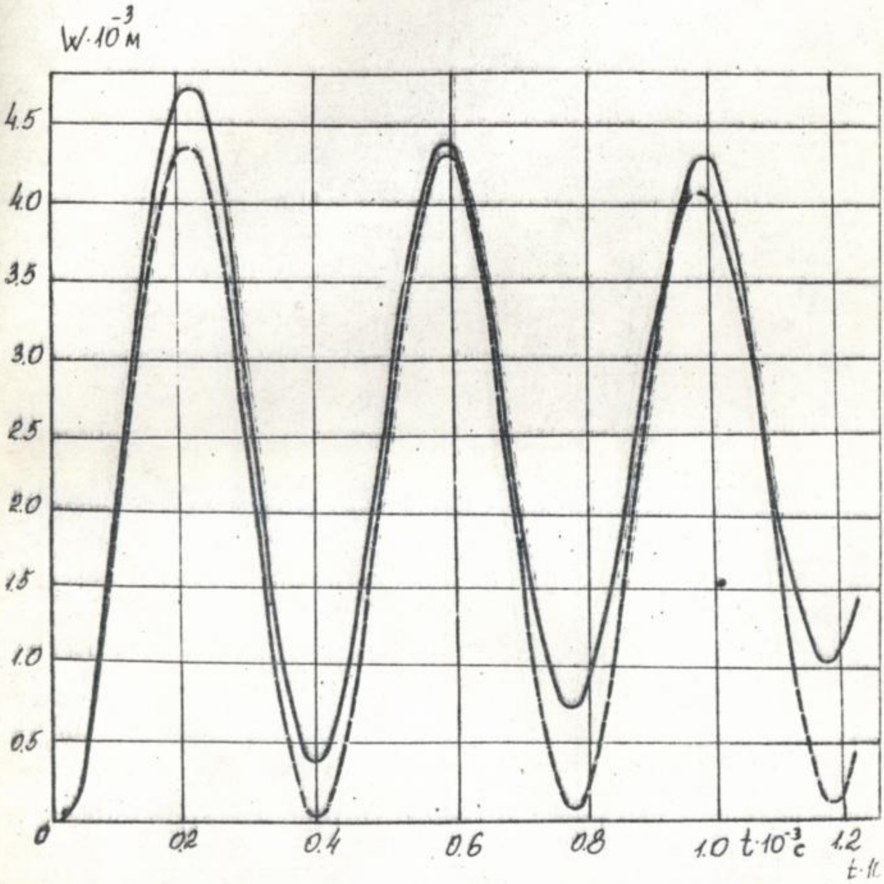

Рис. 2

Ответственный за выпуск к. т. наук, доцент Воблых В. А.
Подп. к печати Бумага тип N
Заказ N 1683 Формат 60х90 1/16 Тираж 110 экз.
Усл. печ. лист. 1.0. Уч.-изд. лист 0,96

Издано на ротапринте ИПМаш АН Украины
310046, Харьков-46, ул. Д. Пожарского, 2/10