

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

МЕРЗЛЯКОВ ВЛАДИМИР АБРАМОВИЧ

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОЛОЧЕК
ВРАЩЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ
НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИИ

Мерзляков

01.02.04 - Механика деформируемого
твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1993

Работа выполнена в Институте механики АН Украины
Научный консультант - член-корреспондент АН Украины
Д.Н.ШЕВЧЕНКО

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук, профессор А.Т.ВАСИЛЕНКО

доктор технических наук,
старший научный сотрудник А.И.ГУЛЯР
доктор технических наук,
профессор В.Г.ПИСКУНОВ

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00810636 (O)

Ведущее предприятие: Институт проблем машиностроения
АН Украины

Защита состоится "26" августа 1993 года в 10 часов
на заседании специализированного совета Д 016.49.01 при Институте
механики АН Украины (252057, г.Киев, ул.П.Нестерова, 3)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
механики АН Украины.

Автореферат разослан "6" сентября 1993 года

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук *И.С.Чернышенко* И.С.ЧЕРНЫШЕНКО

АВ - 20.227

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена изучению термовязкоупругопластического напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочек вращения переменной толщины при неосесимметричных неизотермических процессах деформирования с учетом истории их протекания по траекториям малых кривизн. Задача решается в квазистатической постановке с использованием геометрически нелинейной теории тонких оболочек.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В связи с развитием современного машиностроения перед конструкторами стоят задачи создания новых конструкций, повышения их надежности и эффективности, уменьшения материалоемкости, снижения стоимости и сокращения сроков создания. Широкое применение в качестве элементов машинно-строительных конструкций находят тонкостенные элементы, выполненные в виде оболочек вращения. Такие тонкостенные элементы используются в качестве сосудов высокого давления, корпусов различного назначения, резервуаров криогенной техники, гладких и гофрированных труб, применяются в различных аппаратах химического и энергетического машиностроения. При эксплуатации эти элементы подвержены воздействию переменных силовых и тепловых нагрузок. В процессе нагружения в них могут появляться и развиваться области пластических деформаций, а также деформации ползучести. При дальнейшем нагреве и выравнивании температурных полей в этих областях может возникнуть разгрузка. Механические характеристики материала, такие как модуль упругости, предел текучести, упрочнение существенно зависят от температуры. Также следует учитывать, что совместное действие силовых и тепловых нагрузок, неравномерно изменяющихся во времени, может привести к невыполнению условий простого нагружения. Переменность толщины, изменяющейся как в меридиональном, так и в окружном направлениях, а также высокая степень изменчивости силовых и тепловых нагрузок еще более осложняют проблему расчета термовязкоупругопластического НДС оболочек. Расчеты термовязкоупругопластического НДС оболочек с учетом истории неизотермического нагружения необходимо выполнять при известных температурных полях. Такие расчеты позволяют сокращать сроки создания новых конструкций, повышать их прочность и надежность, уменьшать материалоемкость и снижать стоимость. В связи с изложенным, задача определения не-

установившихся температурных полей и термовязкоупругопластического НДС оболочек вращения переменной толщины с учетом указанных факторов является актуальной задачей механики деформируемого твердого тела.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в разработке эффективных методов расчета термовязкоупругопластического НДС оболочек вращения переменной толщины при неосесимметричных неизотермических процессах деформирования с учетом истории их протекания по траекториям малых кривизн.

Оболочками вращения будем называть оболочки с координатной поверхностью в виде поверхности вращения. Неосесимметричность НДС в таких оболочках может возникать за счет неосесимметричных силовых и тепловых нагрузок, за счет переменной толщины в окружном направлении, за счет первоначальной неоднородности свойств материала по окружности и за счет переменного по окружности способа закрепления торцов оболочки. Из нашего рассмотрения исключаются оболочки, осевая симметрия которых нарушена отверстиями, стрингерами, первоначальной неоднородностью материала и различным способом закрепления торцов.

Диссертационная работа включает в себя

- постановку задач термовязкопластичности тонких оболочек вращения переменной толщины при их неосесимметричном конвективном теплообмене с окружающей средой и разработку методов их решения.
- решение новых классов задач исследования термовязкоупругопластического НДС оболочечных элементов машиностроительных конструкций и выявление новых механических эффектов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы заключается в разработке методов определения термовязкоупругопластического НДС оболочек вращения переменной в двух направлениях толщины при неосесимметричных неизотермических процессах деформирования по прямолинейным траекториям и траекториям малых кривизн с учетом истории их протекания и геометрической нелинейности. На основе разработанных методов получены решения новых классов задач для оболочек вращения переменной толщины при локализованных воздействиях с учетом истории и скорости протекания процессов деформирования. Установлены новые механические эффекты, обусловленные учетом переменной толщины в двух направлениях, учетом

локализованности силовых и тепловых нагрузок, а также учетом функциональной зависимости между напряжением, деформацией, температурой и временем.

ДОСТОВЕРНОСТЬ основных научных положений и выводов, полученных в пределах применимости теории тонких оболочек, определяется использованием экспериментально обоснованных соотношений термовязкопластичности. Адекватность физических соотношений исследуемым процессам деформирования проверяется анализом траекторий деформирования в пространстве Илькишина. Разработанные методы апробированы на ряде задач, решенных также другими методами. В этих задачах дана оценка точности и эффективности предложенных подходов на основе сопоставления с решениями, полученными методом конечных элементов в пространственной постановке. Достоверность решения новых задач и оценка сходимости проверялась увеличением параметров дискретизации.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ работы состоит в возможности использования методов и автоматизированного комплекса программ на ЭВМ для исследования НДС оболочечных элементов машиностроительных конструкций. Разработанные методы и пакеты прикладных программ сданы в Государственный фонд алгоритмов и программ, а также внедрены на ряде предприятий страны и используются при проектировании и расчетах на прочность оболочечных конструкций, которые подвержены неосесимметричному деформированию. Некоторые исследования, результаты которых приведены в диссертации, выполнены по заданиям ведущих предприятий страны.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Изложенные в диссертационной работе результаты доложены и обсуждались на IX, X, XI, XII конференциях молодых ученых Института механики АН Украины (Киев, 1962, 1964, 1966, 1967); 6 Советско-Польском симпозиуме по неклассическим проблемам механики тонкостенных конструкций (Киев, 1982); Всесоюзных конференциях по механике неоднородных структур (Львов, 1983, 1987); Всесоюзных конференциях по нелинейной теории упругости (Фрунзе, 1985; Сыктывкар, 1989); Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1985); Всесоюзном совещании-семинаре "Актуальные проблемы механики оболочек" (Казань, 1985); Всесоюзной конференции "Нелинейные задачи расчета конструкций в условиях высоких температур" (Саратов, 1988); Сибирской школе по современным проблемам механики деформируемого твердого тела (Новосибирск,

1988); Международной научно-технической конференции "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ (Киев, 1989); Всесоюзном симпозиуме "Прочность материалов и элементов конструкций" (Житомир, 1989); XV Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин (Казань, 1990); IX Симпозиуме "Деформация и разрушение" (Магдебург, 1991); Научном совещании "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций" (Канев, 1992); 24 Всесоюзном совещании по проблемам прочности и колебаний двигателей (Москва, 1992).

В полном объеме диссертационная работа заслушана и обсуждена на семинаре "Механика связанных полей в материалах и элементах конструкций" Института механики АН Украины (Киев, 1992), семинаре Института механики АН Украины (Киев, 1992), семинаре Института технической механики АН Украины (Днепропетровск, 1992), семинаре научно-технического проблемного совета по статической прочности Института проблем машиностроения АН Украины (Харьков, 1992), семинаре "Механика деформируемого твердого тела" кафедры динамики, прочности машин и сопротивления материалов Киевского политехнического института (Киев, 1992), семинаре Киевского инженерно-строительного института при специализированном совете Д068.05.02 (Киев, 1993).

ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 16 научных статьях.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 132 наименования. Общий объем работы - 286 страниц машинописного текста, включая 57 рисунков и 46 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, дан обзор литературных источников, сформулирована цель работы, ее научная новизна, достоверность и практическая ценность. Кратко излагается содержание по главам.

Соотношения термовязкопластичности, описывающие неизо-термические процессы нагружения, приводятся в работах И.В.Бесселинга, И.А.Биргера, Д.А.Гохфельда, Н.С.Можаровского, П.М.Нажди, О.С.Садакова, Р.Г.Терехова, Ю.Н.Шевченко и др.

Эти соотношения экспериментально обоснованы в работах В.П.Дегтярева, Н.С.Можаровского, Р.Г.Терехова, Ю.Н.Шевченко и др. Они позволяют рассматривать неизотермические процессы нагружения как по прямолинейным траекториям, так и по траекториям малой кривизны.

Задачу определения нестационарных температурных полей при неравномерном теплообмене оболочек рассматривали В.В.Болотин, И.А.Мотовиловец, Я.С.Подстригач, Р.Н.Швец и др. В этих работах показывается, что предположения о линейном и квадратичном законах изменения температуры по толщине оболочки не всегда оправдываются и необходимы более общие предположения об этих законах.

Разработкой методов определения упругопластического напряженно-деформированного состояния оболочек вращения при действии неосесимметричных силовых и тепловых нагрузок занимались Н.Л.Белевцова, В.И.Берлянд, И.А.Биргер, П.П.Гонтаровский, В.С.Гудрамович, А.Н.Гузь, А.И.Гуляр, А.П.Гусенков, Л.В.Енджиевский, Б.Я.Кантор, С.А.Капустин, В.А.Крысько, Г.И.Львов, В.И.Махненко, И.Г.Муравский, В.И.Мяченков, В.Г.Пискунов, А.Н.Подгорный, А.С.Сахаров, И.С.Чернышенко, И.А.Цурпал, Ю.Н.Шевченко, *H. Cramer, A. Hirakawa, S. Hirofumi, K. Hotada, K. Migita, H. Obrecht, F. Ogasawara, T. Taguchi, S. Takezono, K. Tao, H. Uchibori, W. Wanderlich, Y. Watanabe* и др.

Анализ опубликованных исследований по данному вопросу показал, что в литературе отсутствуют работы, посвященные определению термовязкоупругопластического НДС оболочек вращения переменной толщины и подверженных неосесимметричному неизотермическому деформированию по траекториям малых кривизн. Приведенный анализ литературных данных позволил сформулировать и обосновать задачи исследования.

В первой главе дана постановка задач теории термовязкопластичности и нестационарной теплопроводности для оболочек переменной в двух направлениях толщины с координатной поверхностью в виде поверхности вращения, ограниченной линиями главных кривизн. Оболочка изготовлена из изотропного материала и может покоиться на упругом основании. Предполагается, что первоначально оболочка находится в естественном ненапряженном и недеформированном состоянии, а затем подвергается действию

объемных и поверхностных сил и конвективного теплообмена с окружающей средой, не вызывающих ее потери устойчивости. Задача рассматривается в несвязанной квазистатической постановке, то есть предполагается, что нагружение оболочки происходит с такой скоростью, при которой в каждый отдельный момент времени она находится в равновесном состоянии и деформирование не изменяет температурное поле. Механические и теплофизические характеристики материала оболочки считаются зависящими от температуры. Предполагается, что деформации ползучести, развивающиеся за время действия нагрузок, сравнимы с мгновенными упругопластическими деформациями и ими нельзя пренебречь. Для того, чтобы деформациями ползучести можно было пренебречь, область изменения нагрузки, температуры и времени должна лежать ниже поверхности условного предела ползучести.

Приводятся основные уравнения, позволяющие рассматривать поставленную задачу при неосесимметричных неизоэнергических процессах деформирования с учетом истории их протекания. Задача рассматривается в естественной системе координат Δ , θ , ζ , связанной с координатной поверхностью оболочки (координату Δ будем отсчитывать вдоль меридиана координатной поверхности, θ - в окружном направлении, ζ - вдоль нормали к координатной поверхности). Для определения нестационарных температурных полей необходимо решать задачу нестационарной теплопроводности для оболочек вращения переменной толщины при их неосесимметричном конвективном теплообмене с окружающей средой. Предполагается, что источники тепла отсутствуют, а теплофизические характеристики материала оболочки зависят от температуры. Определение неустановившегося температурного поля оболочки вращения переменной толщины сводится к интегрированию уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \Delta} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial \Delta} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) + 2k \lambda \frac{\partial T}{\partial \zeta} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (I)$$

где r - радиус координатной поверхности; T - температура; $\lambda = \lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; $c = c(T)$ и $\rho = \rho(T)$ - соответственно теплоемкость и удельный вес материала оболочки; $2k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_0}$ - сумма главных кривизн.

Дифференциальное уравнение (I) получено из записанного

в произвольной криволинейной системе координат уравнения теплопроводности, в выражениях для коэффициентов Ляме которого отброшены величины $\frac{\zeta}{R_2}$, $\frac{\zeta}{R_0}$, как малые по сравнению с единицей. Уравнение (I) решается при следующих граничных и начальных условиях

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n_i} = -\alpha_i (T - \Theta_i), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad (2)$$

$$T = T_0 \quad \text{при} \quad t = t_0 \quad (3)$$

Здесь Θ_i - температуры окружающих оболочку сред; α_i - коэффициенты теплообмена; n_i - внешняя нормаль к ограничивающим оболочку поверхностям; $i = 1, 2$ соответствует внешней $\zeta = h_1(\delta, \theta)$ и внутренней $\zeta = -h_2(\delta, \theta)$ поверхностям; $i = 3, 4$ - левому ($\delta = \delta_0$) и правому ($\delta = \delta_n$) торцам оболочки; $i = 5, 6$ - меридиональным сечениям $\theta = -\theta_1$ и $\theta = \theta_1$.

Задача термовязкопластичности решается с применением геометрически нелинейной теории оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява. Согласно этой теории предполагается, что деформации малы по сравнению с единицей и нельзя пренебрегать квадратами углов поворота нормали к координатной поверхности в геометрических уравнениях и уравнениях равновесия. В качестве физических уравнений использованы соотношения теории процессов деформирования по траекториям малых кривизн и прямолинейным траекториям. Связь между напряжениями и деформациями линеаризована методом дополнительных деформаций, т.е. записана в форме закона Гука, но с дополнительными членами, учитывающими зависимость механических свойств материала от температуры, а также тепловые и необратимые деформации. При конкретизации функционалов, входящих в дополнительные члены, использовали мгновенную термомеханическую поверхность и сопряженные с ней диаграммы ползучести. Мгновенная термомеханическая поверхность строится по диаграммам одноосного растяжения образцов, полученных при фиксированных значениях температуры со скоростью нагружения, при которой не проявляются реологические свойства материала. Диаграммы ползучести получены при нагружении образцов до фиксированных значений напряжений с той же скоростью, что и при получении мгновенных диаграмм растяжения.

Связь между усилиями N_0, N_θ, \bar{S} , моментами M_0, M_θ, H и деформациями координатной поверхности записана в виде

$$N_0 = C_1 \varepsilon_0 + C_2 \varepsilon_\theta + K_1 \varkappa_0 + K_2 \varkappa_\theta + P_0,$$

$$N_\theta = C_2 \varepsilon_0 + C_1 \varepsilon_\theta + K_2 \varkappa_0 + K_1 \varkappa_\theta + P_\theta,$$

$$M_0 = K_1 \varepsilon_0 + K_2 \varepsilon_\theta + D_1 \varkappa_0 + D_2 \varkappa_\theta + I_0, \quad (4)$$

$$M_\theta = K_2 \varepsilon_0 + K_1 \varepsilon_\theta + D_2 \varkappa_0 + D_1 \varkappa_\theta + I_\theta.$$

$$\bar{S} = C_3 \varepsilon_{30} + 2K_3 \varkappa_{30} + P,$$

$$H = K_3 \varepsilon_{30} + 2D_3 \varkappa_{30} + I.$$

Здесь

$$C_1 = \frac{1}{\nu_0} C_2 = \frac{2}{1-\nu_0} C_3 = \frac{2G_0}{1-\nu_0} (h_1 + h_2), \quad K_1 = \frac{1}{\nu_0} K_2 = \frac{2}{1-\nu_0} K_3 =$$

$$= \frac{G_0}{1-\nu_0} (h_1^2 - h_2^2), \quad D_1 = \frac{1}{\nu_0} D_2 = \frac{2}{1-\nu_0} D_3 = \frac{2}{3} \frac{G_0}{1-\nu_0} (h_1^3 + h_2^3), \quad (5)$$

$$P_0 = \frac{2G_0}{1-\nu_0} \int_{-h_2}^{h_1} \beta_{30} d\tau \quad (s=0), \quad P = G_0 \int_{-h_2}^{h_1} \beta_{30} d\tau,$$

$$I_0 = \frac{2G_0}{1-\nu_0} \int_{-h_2}^{h_1} \beta_{30} \tau d\tau \quad (s=0), \quad I = G_0 \int_{-h_2}^{h_1} \beta_{30} \tau d\tau,$$

ψ_0, G_0 - коэффициент Пуассона и модуль сдвига при температуре естественного ненапряженного состояния T_0 ; $\tau = h_2(z, \theta)$ и $\tau = h_1(z, \theta)$ - уравнения внутренней и внешней поверхности оболочки; $\beta_{33}, \beta_{3\theta}, \beta_{3z}$ - дополнительные члены, учитывающие тепловые и необратимые деформации, а также зависимость механических свойств материала от температуры.

При анализе, насколько адекватно применяемые физические уравнения описывают процессы деформирования в рассматриваемых оболочках вращения, после решения краевой задачи необходимо строить траектории деформирования в пространстве Вейлямина. Если радиус кривизны траекторий значительно больше следа запаздывания векторных свойств материала (10-12 пределов текучести по деформациям), то, как показывают эксперименты, полученные результаты достоверны. В случае траекторий средней кривизны (радиус кривизны соизмерим со следом запаздывания) полученные решения являются приближенными и их можно уточнить с привлечением теории процессов средней кривизны. Если траектории деформирования мало отклоняются (в пределах следа запаздывания) от прямолинейных, можно применять более простую теорию прямолинейных процессов нагружения.

Приведенные в первой главе уравнение нестационарной теплопроводности, геометрические и статические уравнения, совместно с физическими уравнениями и граничными условиями, сформулированными на параллельных и меридиональных краях оболочки, представляют замкнутую систему для решения поставленной задачи.

Во второй главе рассмотрена задача определения нестационарных температурных полей в оболочках переменной толщины с координатной поверхностью в виде поверхности вращения в условиях конвективного неосесимметричного теплообмена с окружающей средой. Для упрощения задачи введена функция $\Phi = \int_0^z \lambda \sigma \Gamma$ и сделана замена переменных в уравнениях (1) - (3). Решение уравнения (1) после этого ищем в виде степенного полинома по толщине

$$\Phi(z, \theta, \tau, t) = \sum_{p=0}^n \Phi_p(z, \theta, t) \tau^p \quad (6)$$

Для определения функций Φ_p , входящих в зависимость (6), уравнение (1) умножается на τ^p и интегрируется по τ в пре-

делах от $-h_2$ до h_1 . Преобразовывая полученные интегралы и вводя функцию,

$$v_p = \int_{-h_2}^{h_1} \Phi \tau^p d\tau, \quad (7)$$

приходим к системе двумерных дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = \alpha F_p(\vartheta, \theta, t), \quad p = 0, 1, \dots, n, \quad (8)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности. При получении уравнений (8) предполагалось, что α незначительно изменяется по толщине оболочки и этим изменением можно пренебречь.

Система уравнений (8) решается с использованием по времени явной разностной схемы и двух способов конкретизации функции $F_p(\vartheta, \theta, t)$.

В соответствии с первым способом производные по координатам ϑ и θ , входящие в функцию $F_p(\vartheta, \theta, t)$, аппроксимируются конечно-разностными соотношениями.

В соответствии со вторым способом температуры окружающих оболочку сред представляются в виде тригонометрических рядов Фурье по окружной координате θ . В виде аналогичного ряда представляется также функция (7)

$$v_p(\vartheta, \theta, t) = \sum_{k=0}^N [v_{pk}(\vartheta, t) \cos k\theta + v'_{pk}(\vartheta, t) \sin k\theta]. \quad (9)$$

Далее используется метод интегральных соотношений, в соответствии с которым разложение (9) подставляется в систему уравнений (8), полученные равенства умножаются на функции $\cos m\theta$ и $\sin m\theta$ и интегрируются по θ в пределах от $-\pi$ до π . После преобразований с использованием ортогональности тригонометрических функций получена система уравнений вида

$$\frac{\partial v_{pm}}{\partial t} = \sum_{k=0}^N [\Psi_{km}^1(v_{pk}) + \Psi_{km}^2(v'_{pk})],$$

$$\frac{\partial v'_{pm}}{\partial t} = \sum_{k=0}^N [\Psi_{km}^3(v_{pk}) + \Psi_{km}^4(v'_{pk})], \quad (10)$$

$$p = 0, 1, \dots, n; \quad m = 0, 1, \dots, N,$$

где $\Psi_{км}^1, \dots, \Psi_{км}^4$ - дифференциальные операторы уравнения теплопроводности. Производные по меридиональной координате ζ , входящие в операторы $\Psi_{км}^1, \dots, \Psi_{км}^4$, заменяются конечно-разностными аппроксимациями.

Для апробации и оценки точности предложенных подходов к решению задач нестационарной теплопроводности рассмотрены задачи, решения которых получены также аналитически или с помощью метода конечных элементов. Решения, полученные методом конечных элементов, основаны на пространственной теории теплопроводности без упрощающих предположений. В этих примерах показано хорошее согласование результатов, полученных для тонких и нетонких оболочек постоянной и переменной толщины. Кроме того, на основе разработанной методики исследованы нестационарные температурные поля в незамкнутой цилиндрической панели; замкнутой конической оболочке при несимметричном теплообмене с окружающей средой. Показано существенно нелинейное изменение температуры по толщине оболочки, особенно в начальные моменты времени. В процессе нагрева температурные градиенты уменьшаются.

Таким образом, разработанная методика дает возможность проследить неустановившиеся температурные поля в оболочках вращения, находящихся в условиях несимметричного конвективного теплообмена с окружающей средой.

Третья глава посвящена выводу разрешающих уравнений и разработке алгоритма определения термовязкоупругопластического НДС оболочек вращения переменной в двух направлениях толщины и в частном случае оболочек вращения постоянной по окружности толщины. Рассмотрены два способа получения разрешающих уравнений для оболочек вращения переменной в двух направлениях толщины. Первый способ основан на использовании метода интегральных соотношений, а второй - на разложении жесткой оболочки по параметру.

В качестве основных неизвестных системы разрешающих уравнений выбраны следующие функции

$$y_1 = rN_s, y_2 = r\hat{Q}_s = rQ_s + \frac{\partial H}{\partial \theta} + (rN_s - \sin\psi M_\theta) \mathcal{V}_s + r\bar{S} \mathcal{V}_\theta, \quad (II)$$

$$y_3 = r\hat{S} = r\bar{S} - 2\sin\psi H, y_4 = rM_s, y_5 = u, y_6 = w, y_7 = v, y_8 = \mathcal{V}_s,$$

где \hat{Q}_z, \hat{S} - приведенные поперечное и сдвигающее усилие;
 u, v, w - перемещения точек координатной поверхности в меридиональном, окружном и поперечном направлениях; ν_s^0, ν_θ^0 - углы поворота нормали к координатной поверхности оболочки в плоскостях $\theta = \text{const}$ и $s = \text{const}$; $\hat{\kappa} - \varphi$ - угол, образованный нормалью к координатной поверхности и осью вращения. Функции (II) и их линейные комбинации дают возможность сформулировать широкий круг граничных условий на торцах оболочки в усилиях, моментах, перемещениях и в смешанном виде непосредственно для этих функций.

Использование уравнений равновесия, геометрических уравнений и соотношений термовязкопластичности позволило получить систему разрешающих уравнений в частных производных

$$\frac{\partial Y}{\partial s} = P(s, \theta) \left(Y, \frac{\partial Y}{\partial \theta}, \dots, \frac{\partial^4 Y}{\partial \theta^4} \right) + F(s, \theta), \quad (12)$$

где $Y(s, \theta) = \{y_1, y_2, \dots, y_8\}$ - вектор разрешающих функций (II), $P(s, \theta) = \{p_{ij}(s, \theta)\}$ - дифференциальный оператор; $F(s, \theta) = \{f_i(s, \theta)\}$ - вектор правых частей; $i, j = 1, 2, \dots, 8$. Дифференциальный оператор $P(s, \theta)$ не зависит от НДС, а члены, учитывающие необратимые и тепловые деформации и члены, обусловленные учетом геометрической нелинейности и зависимости механических характеристик материала от температуры входят лишь в $F(s, \theta)$. Для решения системы уравнений (12) весь процесс нагружения разбивается на ряд этапов и на каждом этапе система решается методом последовательных приближений. При этом вектор правых частей $F(s, \theta)$ является известным из предыдущего приближения, а систем уравнений (12) в каждом приближении каждого этапа является линейной.

Компоненты внешней нагрузки, вектора правых частей представлены в виде тригонометрических рядов Фурье по окружной координате. Решение системы уравнений (12) также разыскивается в виде тригонометрических рядов

$$y_i(s, \theta) = \begin{cases} \sum_{k=0}^N [y_{ik}(s) \cos k\theta + y'_{ik}(s) \sin k\theta], & i = 1, 2, 4, 5, 6, 8 \\ \sum_{k=0}^N [y_{ik}(s) \sin k\theta + y'_{ik}(s) \cos k\theta], & i = 3, 7 \end{cases} \quad (13)$$

В соответствии с методом интегральных соотношений разложение (I3) подставляется в систему уравнений (I2), полученные равенства умножаются соответственно на функции $\cos m\theta$ и $\sin m\theta$ и интегрируются по окружной координате θ в пределах от $-\pi$ до π . После преобразований с использованием условия ортогональности тригонометрических функций приходим к системе дифференциальных уравнений вида

$$\frac{d y_{im}}{ds} = \sum_{k=0}^N \sum_{j=1}^8 \left[X_{km}^{1ij} (y_{jk}) + X_{km}^{2ij} (y'_{jk}) \right] + \bar{F}_{im}; \quad (I4)$$

$$\frac{d y'_{im}}{ds} = \sum_{k=0}^N \sum_{j=1}^8 \left[X_{km}^{3ij} (y_{jk}) + X_{km}^{4ij} (y'_{jk}) \right] + \bar{F}'_{im};$$

$$i = 1, 2, \dots, 8; \quad n = 0, 1, \dots, N,$$

где $X_{km}^{1ij}, \dots, X_{km}^{4ij}$ - операторы обыкновенных дифференциальных уравнений; $\bar{F}_{im}, \bar{F}'_{im}$ - амплитудные значения вектора правых частей $F(s, \theta)$ в системе (I4). В случае, когда толщина оболочки и нагрузка имеют меридиональную плоскость симметрии, в тригонометрических рядах (I3) достаточно удерживать коэффициенты при членах без штрихов, а в системе (I4) удерживается только оператор X_{km}^{1ij} . В частном случае, когда оболочка симметрична относительно координатной поверхности, разрешающая система уравнений (I4) значительно упрощается. В случае, когда граничные условия задаются в цилиндрической системе координат, в качестве разрешающих вместо (II) удобно выбирать следующие функции.

$$N_r, N_z, \hat{S}, M_s, u_r, u_z, v, \vartheta_s, \quad (I5)$$

где

$$\begin{aligned} N_r &= N_s \cos \varphi + \hat{Q}_s \sin \varphi, & N_z &= N_s \sin \varphi - \hat{Q}_s \cos \varphi, \\ u_r &= u \cos \varphi + w \sin \varphi, & u_z &= u \sin \varphi - w \cos \varphi. \end{aligned} \quad (I6)$$

При использовании подхода, основанного на разложении жесткостей оболочки по параметру, введен параметр ω_s , учитывающий изменчивость толщины оболочки по окружной координате

$$\omega_3 = 1 - \frac{h(\alpha, \theta)}{h_0(\alpha)}, \quad (17)$$

где h_0 - толщина оболочки в фиксированном меридиональном сечении. Тогда жесткости оболочки записываются в виде

$$D_N = D_{N0}(1 - \omega_3), \quad D_M = D_{M0}(1 - \omega_3)^3, \quad (18)$$

где $D_{N0} = 2G_0 h_0 / (1 - \nu_0)$, $D_{M0} = G_0 h^3 / [6(1 - \nu_0)]$.

Соотношения термопластичности (4) принимают вид

$$N_\alpha = D_{N0}(\epsilon_\alpha + \nu_0 \epsilon_\theta + P_{\alpha 0}) \quad (\alpha = \theta), \quad \bar{S} = \frac{1}{2}(1 - \nu_0)D_{N0}(\epsilon_{\alpha\theta} + P_{\theta 0}), \quad (19)$$

$$M_\alpha = D_{M0}(\partial \epsilon_\alpha + \nu_0 \partial \epsilon_\theta + I_{\alpha 0}) \quad (\alpha = \theta), \quad H = (1 - \nu_0)D_{M0}(\partial \epsilon_{\alpha\theta} + I_{\theta 0}),$$

где $P_{\alpha 0}, P_{\theta 0}, P_0, I_{\alpha 0}, I_{\theta 0}, I_0$ - учитывают тепловые и несобратимые деформации, зависимость механических свойств материала от температуры, а также изменчивость толщины оболочки по окружности. Решение задачи термопластичности сводится при этом к интегрированию систем дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial Y}{\partial \alpha} = P(\alpha) \left(Y, \frac{\partial Y}{\partial \theta}, \dots, \frac{\partial^4 Y}{\partial \theta^4} \right) + F(\alpha, \theta). \quad (20)$$

В этой системе, в отличие от системы (12), оператор P не зависит от окружной координаты θ . Интегральные характеристики: $P_{\alpha 0}, P_{\theta 0}, P_0, I_{\alpha 0}, I_{\theta 0}, I_0$, входящие в $F(\alpha, \theta)$, известны из предыдущего приближения в методе последовательных приближений. Поэтому использование тригонометрических рядов по окружности дает возможность для каждой гармоники получить две независимые системы обыкновенных дифференциальных уравнений восьмого порядка.

Полученные системы обыкновенных дифференциальных уравнений записываются в виде

$$\frac{dz}{d\alpha} = A(\alpha)z + \Phi(\alpha), \quad (21)$$

где

$$Z = \{y_{im}, y'_{im}\} = \{y_{10}, \dots, y_{80}, y_{11}, \dots, y_{81}, \dots, y_{1n}, \dots, y_{8n}, y'_{10}, \dots, y'_{80}, y'_{11}, \dots, y'_{81}, \dots, y'_{1n}, \dots, y'_{8n}\}, \quad (22)$$

либо

$$Z = \{N_{im}, N'_{im}\} = \{N_{r0}, N_{z0}, \dots, \mathcal{U}_{z0}, N_{r1}, \dots, \mathcal{U}_{z1}, \dots, N_{rN}, \dots, \mathcal{U}_{zN}, N'_{r0}, \dots, \mathcal{U}'_{z0}, \dots, N'_{rN}, \dots, \mathcal{U}'_{zN}\} \quad (23)$$

в зависимости от того, какие функции ((II) или (I5)) выбраны в качестве разрешающих. На торцах оболочки для амплитудных значений разрешающих функций или их линейных комбинаций должны выполняться граничные условия

$$D_1 Z = \beta_1 \text{ на торце } s = s_0, \quad (24)$$

$$D_2 Z = \beta_2 \text{ на торце } s = s_N, \quad (25)$$

где D_1, D_2 - матрицы граничных условий на торцах оболочки; β_1, β_2 - векторы свободных членов граничных условий.

Решение краевой задачи (2I), (24), (25) разыскивается в виде

$$Z = \sum_{q=1}^{8(N+1)} C_q Z_q + Z^*, \quad (26)$$

где Z_q - решения задач Коши для однородной системы уравнений (2I) ($\Phi(s) = 0$) с начальными условиями для заданных разрешающих функций на левом краю равными нулю, а для остальных поочередно равных столбцам единичной матрицы; Z^* - решение задачи Коши для неоднородной системы (2I) с начальными условиями, совпадающими с заданными граничными условиями на левом торце (24), а для остальных равными нулю; C_q - постоянные интегрирования, определяемые при удовлетворении граничным условиям на правом торце (25). При этом используется независимость оператора $A(s)$ от НДС, что позволяет вычислять его и $Z^0 = \sum_{q=1}^{8(N+1)} C_q Z_q$ лишь в первом приближении первого этапа. Таким образом, в первом приближении первого этапа необходимо решать $8(N+1) + 1$ задач Коши, а во всех последующих - лишь одну для нахождения Z^* .

Разрешающие уравнения для замкнутых оболочек вращения постоянной в окружном направлении толщины получаются из системы (20) при $\omega_3 = 0$. Задача при этом сводится к интегрированию $2(N+1)$ независимых друг от друга систем обыкновенных дифференциальных уравнений восьмого порядка относительно амплитудных значений разрешающих функций.

$$\frac{dZ_m}{d\delta} = A_m(\delta) Z_m + \Phi_m(\delta). \quad (27)$$

В сечениях разрыва срединной поверхности и в сечениях приложения сосредоточенных усилий используются равенства; отражающие кинематические и статические условия сопряжения.

Систему дифференциальных уравнений в частных производных (20) можно свести к решению ряда систем обыкновенных дифференциальных уравнений не только в случае замкнутых оболочек вращения, но и в одном частном случае незамкнутых оболочек вращения, когда их меридиональные края оперты таким образом, что

$$N_\theta = M_\theta = u = w = 0 \quad \text{при} \quad \theta = \pm\theta_1. \quad (28)$$

В этом случае переменные в системе (20) также разделяются и решение задачи для каждой гармоники сводится к интегрированию системы уравнений, аналогичной системе (27).

Приведен алгоритм определения неосесимметричного термо-вязкоупругопластического НДС оболочек вращения.

В четвертой главе для апробации, оценки точности и эффективности предложенных подходов к решению задач определения термо-вязкоупругопластического НДС оболочек вращения рассмотрены тестовые задачи, решения которых получены также аналитически или другими авторами на основе разработанных ими методик или с помощью метода конечных элементов в пространственной постановке. Эти примеры условно разбиты на 4 группы, в которых с целью апробации разработанных на основе принятых предположений методик рассмотрен ряд оболочек, для которых решения, полученные по этим методикам сопоставляются с решениями, полученными другими методами. В этих примерах проверялась правильность учета в разработанной методике переменности по окружности нагрузки и толщины, геометрической нелинейности, деформаций пластичности и ползучести и др. Были рассмотрены упругое напряженное состояние конической оболочки под действием неосесимметричного температурного поля, упругое напряженное состояние цилиндрической оболочки переменной по окружности толщины, осесимметричная геометрически нелинейная деформация кольцевой пластины, геометрически нелинейная неосесимметричная деформация конической оболочки, упругопластическое осесимметричное напряженное состояние составной оболочки, неосесимметрич-

ное термоупругопластическое напряженное состояние цилиндрической оболочки и осесимметричное вязкопластическое НДС цилиндрической оболочки при ее нестационарном нагреве.

Во всех перечисленных примерах показано хорошее согласование результатов, полученных по разработанным методам с решениями, полученными другими авторами.

- Исследована применимость гипотез Кирхгофа-Лява к расчету термоупругопластического НДС оболочек вращения на основе сопоставления решений, полученных с использованием теории тонких оболочек с соответствующими решениями в пространственной постановке. Рассмотрены упругое напряженное состояние бесконечно длинной цилиндрической оболочки при существенно нелинейном изменении температуры по толщине; термоупругопластическое напряженное состояние бесконечно длинной цилиндрической оболочки при наличии зон упругости, пластичности и разгрузки по толщине; упругопластическое напряженное состояние цилиндрической оболочки со ступенчато изменяющейся толщиной и термоупругопластическое НДС неосесимметрично нагретой цилиндрической оболочки.

На основании решенных задач делается заключение, что методики решения задач термопластичности, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява, при достаточно плавно изменяющихся вдоль координатных линий нагрузках дают достоверные результаты даже при существенно неоднородном напряженном состоянии по толщине. Исключения могут составлять небольшие окрестности особых точек, где появляется концентрация напряжений.

- Исследована применимость предложенных подходов к расчету НДС оболочек вращения при локализованных воздействиях. Рассмотрены в области упругих деформаций напряженное состояние бочкообразной оболочки под действием локального ступенчатого усилия; деформирование оболочки, находящейся под действием сосредоточенной нагрузки; напряженное состояние длинной цилиндрической оболочки, регулярно подкрепленной кольцевыми ребрами.

На основании решенных задач делается вывод о применимости разработанных методов к расчету НДС оболочек вращения при локализованных воздействиях.

- Дана оценка сходимости и затрат машинного времени при расчете оболочек по различным методикам. Показано, что неизменность

общего решения разрешающей системы даже при весьма малом количестве членов тригонометрических рядов дает существенную экономию машинного времени. В задачах, где в решении удерживается большее число членов ряда, разница в затратах машинного времени еще значительнее.

На основании приведенных в четвертой главе результатов сделан вывод, что разработанная методика определения термоупругопластического НДС оболочек вращения позволяет эффективно решать задачи рассматриваемого класса.

В пятой главе исследовано напряженно-деформированное состояние оболочек вращения постоянной по окружности толщины. Во всех задачах этой главы используются соотношения процессов деформирования по траекториям малых кривизн: Рассмотрено упругопластическое НДС конической оболочки, находящейся под действием неосесимметричного температурного поля с учетом геометрической нелинейности; упругопластическое состояние составной оболочки в процессе нагрева и последующего охлаждения с учетом вторичных пластических деформаций и упругопластическое напряженное состояние оболочки вращения с учетом деформаций ползучести. Анализ траекторий деформирования, построенных в пространстве Ильющина, показывает, что они либо мало отличаются от прямолинейных, либо являются траекториями малой кривизны. Это оправдывает применение в рассмотренных задачах соотношений теории процессов малой кривизны. Для оценки точности полученных результатов проводились расчеты НДС рассматриваемых оболочек при различных значениях параметров, характеризующих дискретизацию. Варьирование этих параметров проводилось до тех пор, пока результаты расчетов переставали от них зависеть.

В результате проведенных расчетов установлено:

- Различие напряжений, полученных с учетом и без учета геометрической нелинейности, в области их максимальных значений в первой задаче достигает 18%. В области меньшей напряженности это различие увеличивается и может достигать 100%.
- Изменяемость напряженного состояния по окружности в рассмотренных задачах носит другой качественный и количественный характер, чем изменяемость температурного поля.
- учет вторичных пластических деформаций приводит к различию 100% по сравнению с результатами, полученными в предположении упругой разгрузки.

- учет деформаций ползучести уточняет в рассмотренной задаче значения напряжений на 10-15% в области их максимальных значений.

Таким образом, в проведенных расчетах показано, что учет неосесимметричности и истории нагружения может привести к качественно другому НДС, а учет геометрической нелинейности и деформаций ползучести приводит только к количественным изменениям в значениях напряжений и деформаций.

В шестой главе приведены результаты исследования упруго-пластического НДС оболочек вращения постоянной толщины при локализованных воздействиях. Рассмотрено упругопластическое НДС цилиндрической оболочки, находящейся под действием локальной силовой нагрузки. Исследовано термоупругопластическое НДС локально нагреваемой цилиндрической оболочки. Также приведены результаты расчета цилиндрической панели, подкрепленной кольцевым ребром. В первой и третьей задачах используются соотношения теории процессов деформирования по прямолинейным траекториям, а во второй задаче - соотношения теории процессов деформирования по траекториям малых кривизн. При определении упругопластического НДС панели использованы два приближенных подхода. Первый подход основан на соотношениях для оболочек с разрывом срединной поверхности, когда ребристая оболочка рассматривается в виде оболочки со ступенчато изменяющейся толщиной, меридиан срединной поверхности которой терпит разрыв; ребро моделируется участком оболочки с большей толщиной. Вторым подходом основан на замене кольцевого подкрепления действием линейнодеформируемого основания Винклера; при этом предполагается, что коэффициент постели упругого основания равен нулю в промежутках между ребрами.

В результате проведенных расчетов установлено:

- интенсивность касательных напряжений в задаче при локальной силовой нагрузке снизилась за счет учета пластических деформаций на 50% в области максимальных значений,
- интенсивность касательных напряжений в области их максимальных значений снизилась на 20% за счет появления зон упругой разгрузки в задаче о локально нагреваемой оболочке,
- результаты, полученные при расчете подкрепленной панели по обоим подходам, хорошо согласуются между собой по всей длине

оболочки, за исключением окрестности, точки которой отстоят от ребра на расстоянии, не превышающем его толщины.

На основании проведенных расчетов делается вывод, что разработанные методики позволяют эффективно решать задачи определения упругопластического НДС оболочек вращения при локализованных силовых и тепловых воздействиях, а также подкрепленных кольцевыми ребрами.

В седьмой главе приведены результаты исследования оболочечных элементов конструкций. Рассмотрено упругопластическое напряженное состояние рабочего колеса центробежного компрессора. Приведены результаты исследования НДС конструктивного элемента сложной формы. Также исследовано упругопластическое состояние элемента паронагнетательной трубы. Все задачи решены в геометрически линейной постановке с использованием теории процессов деформирования по прямолинейным траекториям.

Упругопластическое напряженное состояние элемента рабочего колеса центробежного компрессора, моделируемого конической оболочкой линейно-переменной по меридиану толщины, обусловлено действием 14 лопаток на покрывающий диск рабочего колеса (рис. 1). Локальный характер приложения внешней нагрузки обусловил существенное изменение на ободе колеса напряжений по окружности. По мере удаления от обода перепад напряжений по окружности сглаживается и, начиная приблизительно с середины колеса, напряженное состояние становится близким к осесимметричному.

При определении упругопластического НДС конструктивного элемента сложной формы, его моделировали оболочкой вращения, переменной в двух направлениях толщины (одно из меридиональных сечений показано на рис. 2). Значения толщины для различных значений меридиональной и окружной координаты и значения трехмерного поля температур заданы в табличной форме. Предполагается, что между заданными значениями толщина оболочки и температурное поле изменяются линейно. Решение этой задачи получено как по методике, основанной на методе интегральных соотношений, так и по методике, основанной на разложении жесткостей оболочки по параметру. Отмечается хорошее согласование результатов, полученных по обоим методикам. Затраты машинного времени, необходимые для получения результатов методом интегральных соотно-

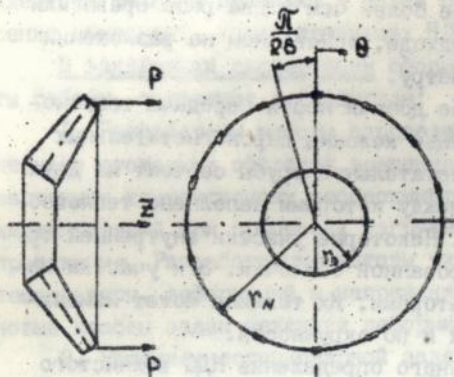


Рис. 1

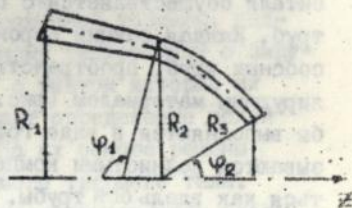
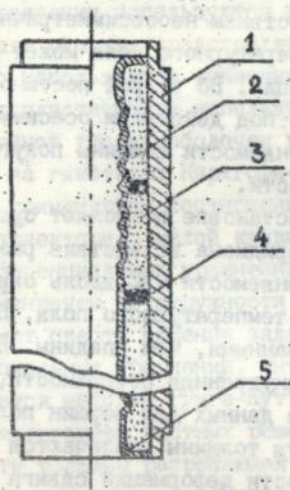


Рис. 2



- 1. наружная труба
- 2. внутренняя труба
- 3. теплоизоляция
- 4. кольцевой центратор
- 5. кольцевая диафрагма

Рис. 3

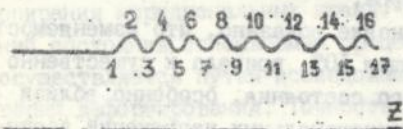


Рис. 4

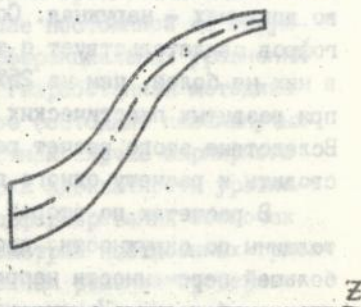


Рис. 5

шений в рассмотренной задаче более чем в два раза превысили соответствующие затраты в подходе, основанном на разложении жесткостей оболочки по параметру.

При паротепловом способе добычи нефти передача теплоносителя осуществляется с помощью колонны паронагнетательных труб. Каждая секция паронагнетательной трубы состоит из двух сосисных труб, пространство между которыми заполнено теплоизолирующим материалом (рис.3). Некоторые участки внутренней трубы выполняются в виде гофрированной оболочки. Эти участки называются волнистыми компенсаторами. Их толщина может изменяться как вдоль оси трубы, так и по окружности.

На основании вышесказанного определение НДС волнистого компенсатора внутренней трубы рассмотрено в двух постановках. В первой постановке исследована внутренняя труба (рис.4) постоянной по окружности толщины под действием неосесимметричного температурного поля. Несимметрия температурного поля может появиться за счет повреждения теплоизоляции. Во второй постановке рассмотрен отдельный полугофр (рис.5) под действием осесимметричной температуры, но с учетом изменчивости толщины полугофра как вдоль меридиана, так и по окружности.

Результаты расчетов по первой постановке позволяют судить об изменчивости НДС оболочки вдоль меридиана вследствие разброса в толщинах полугофров и об изменчивости НДС вдоль окружности вследствие неосесимметричности температурного поля. Вершины гофров являются более деформированными, чем впадины. В вершинах гофров более деформирована внутренняя поверхность, а во впадинах - наружная. Сопоставление данных для вершин полугофров свидетельствует о том, что хотя толщины различаются в них не более, чем на 25% интенсивности деформаций сдвига при развитых пластических деформациях различаются в 3-4 раза. Вследствие этого расчет рассматриваемых компенсаторов нельзя сводить к расчету одного полугофра.

В расчетах по второй постановке показано, что изменчивость толщины по окружности, достигающая 10%, привела к существенно большей переменной напряженного состояния, особенно вблизи торцов оболочки. Изменяемость меридиональных напряжений достигает 25% вблизи вершины гофра, а изменчивость окружных напряжений достигает 50% в окрестности впадины. На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что даже небольшая изме-

няемость толщины приводит к более существенному перераспределению компонент, характеризующих НДС оболочки.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Разработаны методы определения термовязкоупругопластического состояния оболочек вращения переменной толщины, подверженных конвективному неосесимметричному теплообмену с окружающей средой при процессах нагружения с учетом истории их протекания. Разработанные методы включают определение полей температуры, деформаций и напряжений. На их основе решены новые классы задач механики деформируемого твердого тела.

2. Решение нестационарной задачи теплопроводности проводится по явной разностной схеме. По толщине оболочки решение представляется в виде степенных полиномов, в меридиональном направлении используются конечные разности. По окружной координате решение представляется в виде тригонометрических рядов либо используются конечные разности. При решении задачи термовязкопластичности используются соотношения геометрически нелинейной теории оболочек в квадратичном приближении, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява. В качестве физических уравнений применяются соотношения теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны. Получаемая система двумерных дифференциальных уравнений в частных производных решается с применением по окружности тригонометрических рядов, что позволяет свести решение задачи к ряду систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Интегрирование получаемых систем проводится методом Рунге-Кутты с дискретной ортогонализацией и нормализацией частных решений. В случае постоянной по окружности толщины разрешающая система дифференциальных уравнений распадается на ряд систем 8 порядка. Разработанная методика позволяет также определять напряженное состояние незамкнутых в окружном направлении оболочек в частном случае шарнирного опирания меридиональных краев. Проверка адекватности уравнений состояния описываемым процессам деформирования оболочек осуществляется путем исследования геометрии построенных траекторий деформирования. Точность полученных решений проверяется путем сгущения пространственной сетки, увеличения порядка полинома в степенных рядах и количества членов, удерживаемых в тригонометрических рядах.

3. Разработаны алгоритмы и созданы пакеты прикладных программ, реализующие на ЭВМ методы определения термовязкоупруго-пластического напряженно-деформированного состояния оболочек вращения переменной толщины при неосесимметричных неизоотермических процессах нагружения с учетом истории их протекания. Разработанная методика и пакеты прикладных программ апробированы на ряде задач, решенных другими методами. В этих задачах исследована достоверность, дана оценка точности и эффективности предложенных подходов.

4. С помощью разработанных методов решены новые классы задач по исследованию нестационарных температурных полей и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, выполненных в виде оболочек вращения. Получены решения и проведен анализ упругопластического напряженно-деформированного состояния оболочек вращения с учетом геометрической нелинейности, вторичных пластических деформаций и деформаций ползучести. В проведенных расчетах показано, что учет неосесимметричности и истории нагружения может привести к качественно другому напряженно-деформированному состоянию, а учет геометрической нелинейности и деформаций ползучести приводит только к количественным изменениям в значениях напряжений и деформаций. Исследовано упругопластическое НДС оболочек вращения при локализованных силовых и тепловых нагрузках, а также панели, подкрепленной кольцевым ребром. Проведен расчет и анализ упругопластического НДС элемента рабочего колеса центробежного компрессора, конструктивного элемента сложной формы и элемента паронагнетательной трубы.

5. Использование разработанных методов решения задач нестационарной теплопроводности и термовязкопластичности при исследовании поведения элементов конструкции позволяет сокращать сроки создания новых конструкций, повышать их эффективность и надежность, уменьшать материалоемкость и снижать стоимость. Отдельные результаты работы в виде пакетов прикладных программ внедрены на ряде предприятий.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Мерзляков В.А. Исследование упругопластического напряженного состояния конической оболочки вращения при неосесимметричном

- нагреве // Прикл. механика. - 1981. - 17, № 8. - С.42-47.
2. Мерзляков В.А. Термоупругопластическое напряженное состояние незамкнутой оболочки вращения при неосесимметричных силовых и тепловых нагрузках // Пробл. прочности. - 1981. - № 10. - С.86-91.
 3. Мерзляков В.А. Расчет нестационарных температурных полей в тонких оболочках вращения при неосесимметричном нагреве // Пробл. прочности. - 1982. - № 2. - С.81-84.
 4. Мерзляков В.А. Расчет нестационарных температурных полей в тонких незамкнутых в окружном направлении оболочках вращения // Пробл. прочности. - 1985. - № 2. - С.75-79.
 5. Мерзляков В.А. Термоупругопластическое напряженно-деформированное осесимметричное состояние оболочек вращения с учетом трения // Пробл. прочности. - 1985. - № 5. - С.88-92.
 6. Мерзляков В.А. Термоупругопластический расчет напряженного состояния оболочек вращения при неосесимметричном нагреве с учетом вторичных пластических деформаций // Математические методы и физико-механические поля. - 1988. - Вып. 27. - С.77-80.
 7. Шевченко Ю.Н., Мерзляков В.А. Расчет термоупругопластического неосесимметричного деформирования оболочек вращения // Прикл. механика. - 1988. - 24, № 5. - С.43-53.
 8. Галишин А.З., Мерзляков В.А., Скосаренко Ю.В. О применимости различных подходов к определению осесимметричного напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, подкрепленных кольцевыми ребрами // Прикл. механика. - 1990. - 26, № 10. - С.50-55.
 9. Мерзляков В.А. Уругопластическое напряженное состояние оболочек вращения при действии локальных нагрузок // Известия АН СССР. Механика твердого тела. - 1990. - № 5. - С. 120-125.
 10. Мерзляков В.А. Термоупругопластическое деформирование гибких оболочек вращения при неосесимметричном нагружении // Прикл. механика. - 1990. - 26, № 11. - С.70-76.
 11. Шевченко Ю.Н., Мерзляков В.А., Галишин А.З. Приближенный расчет термоупругопластического напряженного состояния оболочек вращения, подкрепленных кольцевыми ребрами // Прикл. механика. - 1991. - 27, № 1. - С.50-55.

12. Галишин А.З., Иценко Д.А., Мерзляков В.А., Савченко В.Г. О применимости гипотез Кирхгофа-Лява к расчету термоупруго-пластического состояния цилиндрических оболочек // Прикл. механика. - 1991. - 27, № 2. - С.66-71.
13. Шевченко Ю.Н., Новиков С.В., Мерзляков В.А., Гололобов В.И., Галишин А.З. К определению термоупругопластического напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб с гофрированными вставками // Прикл. механика. - 1991. - 27, № 8. - С.59-68.
14. Мерзляков В.А. Упругопластическое деформирование локально нагреваемых оболочек вращения // Прикл. механика. - 1992. - 28, № 5. - С.53-59.
15. Мерзляков В.А., Быховец О.Н. К определению напряженного состояния оболочек вращения переменной в двух направлениях толщины // Пробл. прочности. - 1992. - № 9. - С.44-47.
16. Мерзляков В.А. Упругопластическое напряженно-деформированное состояние оболочек вращения переменной в двух направлениях толщины // Прикл. механика. - 1992. - 28, № 11. - С.44-51.

Подписано к печати 22.06.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ. лист. 2,0 Уч.-изд. лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 716. Бесплатно

Полиграф. уч.-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

11/2/05

AB 28.221

AB 28.221