

На правах рукописи

ДОДЗИНА Римма Николаевна

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ И ЗАКРИТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ
ГИБКИХ УПРУГИХ И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность - 01.02.04 - Механика
деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Куйбышев - 1984

Работа выполнена в Куйбышевском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте им. В. В. Куйбышева

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор технических наук, профессор
Ю. П. Самарин

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ – доктор физико-математических наук
профессор Н. С. ГАНИКОВ
– кандидат физико-математических наук, доцент Е. А. ГОРЛАЧ

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Саратовский ордена Трудового
Красного Знамени политехнический
институт

Защита состоится " 15 февраля 1985 г. в 14 час.

00 мин на заседании специализированного совета К 063.94.01
в Куйбышевском государственном университете по адресу:
443086, Куйбышев, ул. академика Павлова, 1, Куйбышевский
Государственный университет, ауд. 203

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан " 3 января 1985 г.

Ученый секретарь специализирован-
ного совета К. Ф. — М. Н., доцент

В. И. Астафьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Оболочки и пластины получают широкое распространение в различных отраслях современной техники. В связи с этим весьма важной задачей является создание новых расчетных методов, позволяющих более полно учесть как характерные условия работы современных конструкций, так и специфику свойств применяемых материалов. Вопросы экономии материала требуют разработки методов расчета конструкций на прочность и устойчивость с учетом физической и геометрической нелинейности. Развитие таких методов позволяет провести исследование работы конструкций в упруго-пластической стадии и при больших прогибах.

Учет упруго-пластической стадии деформирования материала значительно повышает правильность и надежность расчета элемента конструкции на прочность и устойчивость, позволяет более обоснованно и рационально решать вопрос о выборе коэффициента запаса. Актуальной является проблема создания алгоритмов, позволяющих определить критическую нагрузку и исследовать закритическое поведение при учете упруго-пластических деформаций и больших прогибов. Оболочки и пластины часто находятся под совместным действием ряда нагрузок, и устойчивость, закритическое поведение их существенно зависят от вида комбинированного нагружения.

Однако, устойчивость и закритическое поведение гибких прямоугольных в плане оболочек при комбинированном нагружении в упругой и упруго-пластической областях деформирования являются малоизученными. В такой постановке рассматриваемая задача является актуальной.

Тема работы соответствует проблемам, сформулированным в Плане научных исследований по естественным и общественным наукам АН СССР на 1981-1985 годы от 25.12.80; тема I.10.23 "Теория пластичности", тема I.10.2.11 "Тонкостенные конструкции". Работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института на 1981-1985 годы и научно-технической программы Минвуза РСФСР "Надежность конструкций".

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является исследование устойчивости и закритического поведения гибких упругих и упруго-пластических прямоугольных в плане пологих оболочек и пластин при комбинированном нагружении; решение новых задач по определению критических нагрузок пологих оболочек и пластин постоянной и переменной

толщины; разработка методики и алгоритмов численного решения поставленных задач.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Разработаны методики и алгоритмы для исследования устойчивости и закритического поведения гибких упругих и упруго-пластических прямоугольных в плане пологих оболочек и пластин при комбинированном нагружении; при этом использованы деформационная теория и теория пластического течения с трансляционно-кинематическим упрочнением. Дано решение большого числа новых задач об определении критических нагрузок и исследовании поведения оболочек в закритической области. Проведено исследование влияния параметров геометрии, распределения толщины, граничных условий, вида комбинированного нагружения, свойств материала оболочки на закритическое поведение. Исследованы траектории напряжений и деформаций в характерных точках оболочки. Выявлено влияние на значения критических нагрузок несимметричной формы потери устойчивости вида комбинированного нагружения. Исследованы границы областей устойчивости.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ диссертации состоит в решении конкретных задач, представляющих интерес для практики. Результаты исследования устойчивости и закритического поведения гибких упруго-пластических оболочек при комбинированном нагружении могут быть использованы при проектировании элементов конструкций современной техники.

Разработанные алгоритмы и программы могут быть использованы в инженерных расчетах, конкретные численные результаты, представленные в виде графиков и таблиц, пригодны для непосредственного использования в практике проектирования тонкостенных конструкций.

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. Разработанная методика и комплекс программ, составленных на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ ЕС-1022, внедрены в расчетную практику.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ:

- алгоритмы численного исследования устойчивости и закритического поведения гибких упругих и упруго-пластических прямоугольных в плане оболочек и пластин переменной толщины при комбинированном нагружении;
- численная реализация метода Бубнова-Галеркина в нелинейных задачах комбинированного нагружения оболочек с использованием матричного представления нелинейных членов

- методика исследования границ областей устойчивости для оболочек и анализа несимметричных форм потери устойчивости при комбинированном нагружении;

- исследование особенностей упруго-пластического деформирования оболочек на докритических, критических и закритических режимах деформирования и анализ влияния истории нагружения и полей остаточных прогибов и напряжений на величину критических нагрузок;

- результаты численного решения нового класса задач устойчивости и закритического поведения габрих упругих и упруго-пластических оболочек при комбинированном нагружении.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ подтверждается строгостью математической постановки задачи, применением обоснованных математических методов решения, решением задач различными методами с использованием разных алгоритмов, исследованием численной сходности методов решения и согласованием некоторых полученных результатов с имеющимися в литературе данными других авторов.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты доложены на Республиканской научно-технической конференции "Механика сплошных сред" (Набережные Челны, 1982 г.); УП областной научно-технической конференции "Повышение уровня технологичности машин, конструкций и систем" (1983г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность и долговечность машин и приборов" (Куйбышев, 1984 г.).

В целом работа докладывалась на научно-исследовательском семинаре "Прикладная математика и механика" Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института под руководством д.т.н., профессора Ю.П.Самарина; на научном семинаре кафедры "Механика деформируемого твердого тела" Куйбышевского государственного университета под руководством д.ф.-м.н., профессора Г.И.Быковцева; на научном семинаре по теории оболочек Саратовского политехнического института.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертация опубликовано 9 научных работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы. Работа изложена на 195 страницах, в том числе содержит 33 страницы рисунков и 20 страниц литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор литературы по устойчивости и закритическому поведению гибких упругих и упруго-пластических оболочек.

В развитии теории оболочек и разработке методов решения задач устойчивости оболочек значительный вклад внесли советские ученые Алумян Н.А., Болотин В.В., Власов В.З., Вольмир А.С., Воронич И.И., Галимов К.З., Гольденвейзер А.Л., Григолюк Э.И., Ильшин А.А., Кабанов В.В., Кармишан А.В., Муштари Х.М., Новожилов В.В., Работнов Ю.Н., Саченков А.В., Феодосьев В.И. и др.

Существенные результаты в области упругой и упруго-пластической устойчивости оболочек и пластин, в методах решения геометрически и физически нелинейных задач получены Алфутовым Н.А., Бондарем В.С., Баргером И.А., Бураго Н.Г., Валишвили Н.В., Ганеевой М.С., Ганиевым Н.С., Горлачом Б.А., Гудрамовичем В.С., Зубчаниновым В.Г., Кантором Б.Я., Климановым В.И., Корнишиным М.С., Коротких Ю.Г., Клопшиниковым В.Д., Кукуджановым В.Н., Крысько В.А., Лепяком Ю.Р., Лукашем П.А., Муштари Х.М., Мяченковым В.И., Немировским Ю.В., Петровым В.В., Постновым В.А., Роголевичем В.В., Рябовым А.А., Столяровым Н.Н., Синевой Н.Ф., Терегуловым И.Г., Фроловым А.Н., Швайко Н.Ю., Угодчиковым А.Г.

Развитие вычислительной техники сделало возможным решение сложных и важных задач теории оболочек численными методами. Среди таких задач наиболее трудными являются двумерные задачи исследования устойчивости гибких упругих и упруго-пластических оболочек. Разработки методов расчета, создание новых алгоритмов и программ, позволяющих исследовать устойчивость и закритическое поведение гибких прямоугольных в плане упругих и упруго-пластических оболочек является важной и актуальной задачей.

Во введении на основе выполненного анализа сделано заключение об актуальности темы, поставлены задачи исследования и приведена краткая аннотация содержания разделов диссертации.

В первом разделе диссертации приводятся основные соотношения и допущения нелинейной теории оболочек и дается постановка задачи упругой и упруго-пластической устойчивости гибких оболочек применительно к комбинированному нагружению.

Исследуется устойчивость и закритическое поведение гибких упруго-пластических прямоугольных в плане пластин и пологих оболочек двойкой кривизны со сторонами $2a$, $2b$ и толщиной h ,

находящихся под раздельным и совместным действием поперечной $p(x, y)$ и продольных p_1, p_2 нагрузок.

Трудности решения задач устойчивости и критического поведения гибких упругих и упруго-пластических оболочек заключаются в нелинейности докритического состояния, вследствие учета больших прогибов и пластических деформаций. Кроме того в оболочке заранее неизвестны области упругости, активного нагружения, разгрузки, вторичных пластических деформаций. В связи с этим в работе для решения задач устойчивости и исследования критического поведения используется подход, позволяющий преодолеть указанные трудности и состоящий в пошаговом прослеживании равновесных состояний. Это дает возможность построить диаграмму равновесных состояний — зависимости параметра нагрузки от величины, характеризующей деформированное состояние оболочки. При этом критические нагрузки определяются по экстремальным точкам этой диаграммы. Важным моментом при реализации этого подхода является численный метод решения нелинейной задачи и выбор параметра нагружения, монотонно изменяющегося на всем протяжении критического деформирования.

Соотношения трансляционно-изотропной теории пластического течения, деформационной теории пластичности с использованием пятимерного девятиорного пространства А.А.Ильшина записываются в единообразной форме. Соответствующим выбором материальных функций в соотношениях связи между напряжениями и деформациями, записанных в приращениях, обеспечивается исследование упруго-пластического деформирования оболочек по этим теориям пластичности.

Используя основные допущения нелинейной теории оболочек, гипотезы Кархгофа-Лява, из принципа возможных перемещений получена система дифференциальных уравнений теории гибких упруго-пластических оболочек в смешанной форме, где неизвестными являются функция усилий φ и прогиба w . С использованием безразмерных параметров эта система запишется в виде

$$\begin{aligned} & \lambda^2 M_{n,xx} + 2\lambda M_{n,xy} + M_{n,yy} + 0,25\lambda^2(k_1 \varphi_{yy} + k_2 \varphi_{xx}) + \\ & + \lambda^2(\varphi_{yy} w_{xx} + \varphi_{xx} w_{yy} - 2\varphi_{xy} w_{xy}) = -0,0625\rho(x, y) \\ & \lambda^2 \varepsilon_{2,xx} - 2\lambda \varepsilon_{2,xy} + \varepsilon_{2,yy} + 0,25\lambda^2(k_1 w_{yy} + k_2 w_{xx}) + \lambda^2(w_{xx} w_{yy} - w_{xy}^2) = 0 \quad (I) \end{aligned}$$

В работе разрешающие системы дифференциальных уравнений записываются в приращениях и в функциях,

Система в приращениях получается линеаризацией уравнений (I). При этом линеаризованная система дополняется связью между приращениями усилий dT_{11} , dT_{22} , dT_{12} , моментов dM_{11} , dM_{22} , dM_{12} и приращениями деформаций $d\varepsilon_1$, $d\varepsilon_2$, $d\varepsilon_{12}^f$ и изменениями кривизн срединной поверхности.

Разрешающая система дифференциальных уравнений дополняется граничными условиями шарнирного опирания и скользящей заделки. При их записи учитывались продольные силы, действующие по кромкам оболочки. При решении задач с использованием системы в приращениях задавались начальные условия.

Во втором разделе предлагаются шаговые алгоритмы решения задач устойчивости и исследования закритического поведения гибких упругих и упруго-пластических оболочек при комбинированном нагружении. Алгоритмы основаны на методах приращений, самкорректирующемся, Ньютона-Канторовича.

Нелинейная система уравнений, описывающая упруго-пластическое поведение оболочек, имеет операторный вид

$$A(y_{s+1}) = f \cdot \rho_{s+1}, \quad (2)$$

где S - номер этапа нагружения, y_s - решение (2) при $\rho = \rho_s$, где ρ - параметр продольных и поперечной нагрузок, f - функция, задающая распределение поперечной нагрузки и вид комбинированного нагружения. Проводя линеаризацию, представим (2) в виде

$$\Phi'(y_s) \Delta y_s + L'(y_s) \Delta y_s = f \cdot \Delta \rho_s - [A(y_s) - f \cdot \rho_s], \quad (3)$$

$$y_{s+1} = y_s + \Delta y_s,$$

где $\Phi'(y_s)$ - оператор, определяемый нелинейностью, связанной с упруго-пластическими свойствами материала, $L'(y_s)$ - оператор, определяемый геометрической нелинейностью. Обозначим через

$$z_s = A(y_s) - f \cdot \rho_s$$

невязку при $\rho = \rho_s$. Положив в (3) $z_s = 0$, приходим к методу приращений; при $z_s = A(y_s) - f \cdot \rho_s$ из (3) следует самкорректирующийся метод. В методе Ньютона-Канторовича Δy_s находится из (3) путем итераций на шаге $s+1$. Предложена неявная итерационная схема решения линеаризованной системы (3).

Предложены и реализованы некоторые способы прохождения предельных точек кривой равновесных состояний. Дается анализ эффективности разработанных алгоритмов. В проведенных численных

экспериментах с целью анализа алгоритмов варьировались шаг по параметру нагружения, число разбиений сетки, вид разностной аппроксимации граничных условий.

С целью анализа достоверности получаемых результатов наряду с методом конечных разностей разработан алгоритм исследования устойчивости и критического поведения оболочек при комбинированном нагружении на основе метода Бубнова-Галеркина. Это дало возможность одни и те же задачи решать методом конечных разностей и методом Бубнова-Галеркина, проводя сравнение получаемых результатов. Такое сравнение дает возможность подтвердить надежность разработанных алгоритмов и полученных результатов.

При реализации метода Бубнова-Галеркина предложена форма представления нелинейных членов в матричном виде по типу квадратичной формы, что позволяет существенно уменьшить машинное время решения задач и облегчить использование разного числа членов в аппроксимирующих функциях. Алгебраическая система нелинейных уравнений, полученная в результате применения метода Бубнова-Галеркина, решалась методом общей итерации М.С.Корнишана. Показана идентичность метода общей итерации и неявной итерационной схемы.

В третьем разделе приводятся результаты исследования устойчивости и критического поведения гибких прямоугольных в плане упругих оболочек при комбинированном нагружении. При этом в качестве параметра прослеживания равновесных состояний использовался прогиб в центре или прогиб в узле, где на данном этапе нагружения имеет место максимальное значение приращения прогиба. Используются алгоритмы, построенные на основе методов конечных разностей и Бубнова-Галеркина.

Исследовано влияние на величину критических нагрузок и критическое поведение геометрия, условий закрепления кромок оболочек, характера поперечного нагружения, вида комбинированного нагружения, уровня продольных нагрузок. Путем построения кривых зависимости интенсивности нагрузки от прогиба в центре для различных видов комбинированного нагружения получены значения параметра поперечной нагрузки P_k , входящей в критическую комбинацию нагрузок ($P_k, P_{1,k}, P_{2,k}$) и исследовано критическое поведение (рис. 1). При этом рассматривалось пропорциональное нагружение, которому на плоскости нагрузок ($P/P_k^*, A/P_{1,k}^*$) соответствует луч. Для рассмотренного на рис. 1 комбинированного нагружения этот луч с осью P/P_k^* составляет угол θ , равный $30^\circ, 60^\circ$;

ρ_{κ}^* , $\rho_{\kappa, \kappa}^*$ - критические нагрузки потери устойчивости при поперечном и продольном нагружении. Из рис. I видно, что для рассмотренного комбинированного нагружения с увеличением уровня нагрузки ρ_1 имеет место снижение значения ρ_{κ} .

Проведено сравнение характера деформирования панелей для разных видов комбинированного нагружения. Сравнение двух видов нагружения совместного нагружения поперечной нагрузкой ρ и сжимающей продольной ρ_1 , действующей по кромкам $x = \pm a - I$; совместного нагружения поперечной нагрузкой ρ и растягивающей продольной ρ_2 , действующей по кромкам $y = \pm b - 2$) показало, что при одинаковом уровне продольных нагрузок для нагружения 2 критическая нагрузка ρ_{κ} и жесткость снижается более существенно, чем для нагружения I.

Для нагружения I, 2, 3 (3- совместное нагружение поперечной нагрузкой ρ и продольными нагрузками - сжимающей ρ_1 , растягивающей ρ_2 ; $\rho_2 = -\rho_1$) проведено сравнение модуля вектора нагрузок $|\rho|$, соответствующего критической комбинации нагрузок (ρ_{κ} , $\rho_{1, \kappa}$, $\rho_{2, \kappa}$)

$$|\rho| = \sqrt{\left(\frac{\rho_{\kappa}}{\rho_{\kappa}^*}\right)^2 + \left(\frac{\rho_{1, \kappa}}{\rho_{1, \kappa}^*}\right)^2 + \left(\frac{\rho_{2, \kappa}}{\rho_{2, \kappa}^*}\right)^2}$$

Оказалось, что для заземленной квадратной панели $K_2 = 100$ наименьшее значение $|\rho|$ соответствует нагружению 3. Этому случаю в данном примере соответствует и наибольшее снижение значения ρ_{κ}

Комбинированному нагружению оболочки в пространстве нагрузок соответствует определенная траектория, а критической комбинации (ρ_{κ} , $\rho_{1, \kappa}$, $\rho_{2, \kappa}$) - некоторая точка на этой траектории. Совокупность таких точек, полученных для различных сочетаний нагрузок, принадлежит поверхности, которая отделяет область устойчивости и неустойчивости. Для построения границы области устойчивости панели при комбинированном продольно-поперечном нагружении задавалась связь между нагрузками

$$\frac{\rho_1}{\rho_{1, \kappa}^*} = \operatorname{tg} \theta \cdot \frac{\rho}{\rho_{\kappa}^*}$$

причем угол θ менялся от 0° до 90° , через 5° . При каждом значении θ определялись величины критических нагрузок (ρ_{κ} , $\rho_{1, \kappa}$). Построены границы областей устойчивости для заземленных, шарнирно-опертых панелей при различных видах комбинированного нагружения. Установлено, что эти границы являются вогнутыми (рис. 2, 3). Таким образом, для задач устойчивости пологих оболочек в нелинейной постановке известная теорема П. Ф. Папковича не имеет места.

Исследована устойчивость и закритическое поведение панелей при совместном действии комбинации продольных нагрузок. При этом использован прием, основанный на введении малого начального искривления K_1 и последующем прослеживании равновесных состояний. Проведен сравнительный анализ деформирования, значений критических нагрузок оболочек в зависимости от величины параметра кривизны, вида комбинированного нагружения, условий закрепления кромок.

В четвертом разделе для гибких прямоугольных в плане упругих панелей при продольно-поперечном нагружении исследуются несимметричные формы потери устойчивости, закритическое поведение; в зависимости от характера деформирования панели проводятся классифицирующие виды комбинированного нагружения. Анализируется влияние распределения толщин оболочки на значения P_K и закритическое поведение.

В зависимости от геометрических параметров и граничных условий оболочка может терять устойчивость либо по симметричной, либо по несимметричной форме. Если несимметричная форма потери устойчивости наступает раньше симметричной, то малая несимметрия в поперечной нагрузке

$$p = p_0 (1 + \delta \sin \lambda y) \quad (\delta \ll 1)$$

позволяет обнаружить эту форму потери устойчивости и приближенно найти соответствующую ей величину критической нагрузки. Если геометрические параметры панели и граничные условия таковы, что симметричная форма потери устойчивости предшествует несимметричной или последняя вообще отсутствует, то малая несимметрия соответственно мало отражается на нагрузке хлопка.

Проведенные расчеты с различными величинами δ показали, что при $\delta \leq 0,01$ величины критических нагрузок несимметричной формы слабо зависят от δ . Установлено, что для поперечного нагружения для квадратных панелей с $K_2 > 64$ характерной является несимметричная форма потери устойчивости. С увеличением параметра кривизны K_2 разница между P_K симметричной и несимметричной форм потери устойчивости возрастает. Для различных видов комбинированного нагружения анализируется различие в значениях P_K симметричной и несимметричной форм потери устойчивости.

В зависимости от вида комбинированного нагружения и уровня продольных нагрузок исследованы симметричные и несимметричные формы потери устойчивости и определены соответствующие нагрузки P_K . Установлено, что для шарнирно опертой квадратной панели с $K_2 = 80$ при продольно-поперечном нагружении малая растягиваю-

чая продольная нагрузка $\rho_1 = 0,00324 \rho$ повышает (по сравнению с поперечным нагружением) ρ_k несимметричной формы на 27%, а симметричной формы на 12%. при совместном нагружении этой панели поперечной нагрузкой и сжимающими $\rho_1 = \rho_2 = 0,001 \rho$ ρ_k симметричной формы увеличивается больше, чем несимметричной. Исследована возможность использования линейного докритического состояния при комбинированном нагружении оболочек.

Исследованы устойчивость, закритическое поведение оболочек переменной толщины при комбинированном нагружении. При различных видах комбинированного нагружения для шарнирно опертых и защемленных панелей анализируется влияние характера распределения толщины на значение критической нагрузки. Для данного комбинированного нагружения путем анализа конкретных примеров определяется распределение толщины панели, позволяющее увеличить значение верхней критической нагрузки по сравнению с панелью постоянной толщины. При этом объемы панелей постоянной и переменной толщины равны.

В пятом разделе проведено исследование устойчивости и закритического поведения гибких прямоугольных в плане упруго-пластических оболочек постоянной и переменной толщины при комбинированном нагружении. Построенный на основе методов конечных разностей и приращений алгоритм позволяет единообразно исследовать деформирование оболочек по теориям пластического течения, используя изотропное, канематическое и трансляционно-изотропное упрочнение, а также по деформационной теории. Запись основных соотношений в приращениях приводит к линеаризованной системе, и решение геометрически и физически нелинейной задачи сводится к решению линейной задачи на каждом шаге. Решение задач устойчивости и закритического поведения упруго-пластических оболочек связано со значительными дополнительными трудностями. Эти трудности, в значительной мере возникают вследствие того, что решение приходится получать на трехмерной сетке. Необходимо, введя пространственную сетку, в каждом её узле проследить развитие упруго-пластического процесса. На различных этапах деформирования в узле может реализоваться процесс активного нагружения, разгрузки, вторичных пластических деформаций, повторного нагружения. Для определения деформаций срединной поверхности и моментов оболочки необходимо на каждом шаге по параметру нагружения использовать численное интегрирование по толщине оболочки. Все это предъявляет повышенные требования к алгоритму решения упруго-пластических задач.

Дается описание особенностей построенного алгоритма, связанных со спецификой решения задач упруго-пластического деформирования. Предлагается ряд приемов численной реализации таких задач, приводится функциональная схема алгоритма.

Для гибких упруго-пластических оболочек исследуется влияние истории деформирования в докритическом состоянии на величину критической нагрузки и закритическое поведение. Анализированы поля остаточных прогибов, напряжений в зависимости от уровня нагрузки предварительного деформирования. Изучено влияние этих полей на значения критических нагрузок P_k .

Установлено, что распределение остаточных прогибов, зон активного нагружения, разгрузки, вторичных пластических деформаций имеет сложный характер.

Для шарнирно опертых и защемленных гибких упруго-пластических панелей с разными параметрами кривизны и отношениями толщины к половине стороны плана оболочки - h/β определены значения

P_k , исследовано закритическое поведение при поперечном и комбинированном нагружении. Проведен сравнительный анализ решений на основе теории пластического течения с кинематическим упрочнением, по деформационной теории пластичности, по теории упругости. Изучено влияние вида комбинированного нагружения на значение верхней критической нагрузки и упруго-пластическое поведение. На различных режимах деформирования проводится анализ зон активного и пассивного нагружений. Исследуется физическая достоверность получаемых результатов по применяемым теориям пластичности. С этой целью упруго-пластический расчет сопровождался вычислением компонент векторов напряжений и деформаций в характерных точках панели и последующем построении траектории напряжений и деформаций. Анализ этих траекторий показал, что на критических режимах деформирования имеет место сложное нагружение.

Исследование комбинированного продольно-поперечного нагружения гибких упруго-пластических панелей показало, что, несмотря на малую величину продольных нагрузок $P_1 = 0,005\rho$, $P_2 = 0,005\rho$, она существенно влияют на значение P_k и характер деформирования.

В упругой и упруго-пластической постановках проведен расчет гибкой шарнирно опертой панели $\lambda = 1$, $\kappa_1 = 0$, $\kappa_2 = 40$, $h/\beta = 1/15$ при трех видах нагружения: 1- поперечное нагружение, 2- нагружение поперечной нагрузкой и сжимающей продольной нагрузкой

$P_1 = 0,005\rho$; 3 - продольно-поперечное нагружение, когда продольная нагрузка $P_1 = 0,005\rho$ сжимает панель вдоль образующей, а

$P_2 = -0,005\rho$ растягивает по кромкам $y = \pm b$. Значения критической нагрузки P_k и прогиба в центре w_0 для упруго-пластической панели для нагрузок 1, 2, 3 соответственно равны: $P_k = 50,7$, $w_0 = 1,02$; $P_k = 44,7$, $w_0 = 0,91$; $P_k = 28,1$, $w_0 = 1,08$.

При комбинированном нагружении для шарнирно опертых и защемленных гибких упруго-пластических панелей проведен сравнительный анализ деформирования при постоянной и переменной толщине. Для оболочек равного объема с различными распределениями толщины определены значения P_k и исследовано закритическое поведение. Дается сравнение с решениями в упругой постановке. В зависимости от геометрии оболочки, вида комбинированного нагружения, характера распределения толщин проведен анализ зон упругости, активного нагружения, разгрузки на различных режимах деформирования. Исследовано влияние пластических зон, возникших в докритической стадии деформирования, на значение критической нагрузки P_k .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана и реализована эффективный алгоритм численного исследования устойчивости и закритического поведения гибких упругих упруго-пластических прямоугольных в плане оболочек и пластин переменной толщины при комбинированном нагружении. Алгоритм, основанный на методах конечных разностей, приращений, самокорректирующимся, Ньютона-Канторовича, позволяет единообразно исследовать деформирование по теории пластического течения и деформационной теории. Дан анализ особенностей численной реализации упруго-пластических задач нелинейной теории оболочек. Предложены и численно реализованы различные подходы прохождения предельных точек кривой равновесных состояний.

2. Построена численная реализация метода Бубнова-Галеркина в нелинейных задачах комбинированного нагружения оболочек. Предложена форма матричного представления нелинейных членов, существенно облегчающая реализацию метода и позволяющая проводить решение в высоких приближениях. Показана идентичность метода общей итерации М.С. Корнишина и метода типа двухступенчатого, что в ряде случаев позволяет упростить реализацию метода общей итерации.

3. Решены новые задачи устойчивости и закритического поведения гибких упругих и упруго-пластических пологих оболочек и пластин при комбинированном нагружении. Установлено существенное влияние на величину критических нагрузок и закритическое поведение

ные виды комбинированного нагружения, уровня продольных нагрузок, геометрии, условий закрепления кромок оболочки. Для разных кривизн найдены величины параметров критических нагрузок и параметров прогиба. Выяснена картина деформирования оболочек на разных стадиях нагружения.

4. Построены границы областей устойчивости для оболочек с разными условиями закрепления кромок, параметрами кривизны, при различных видах комбинированного нагружения. Установлено, что для задач устойчивости упругих пологих прямоугольных в плане оболочек в нелинейной постановке теорема П.Ф.Папковича не имеет места.

5. Для продольно-поперечного нагружения исследованы несимметричные формы потери устойчивости пологих оболочек. Проведен сравнительный анализ значений верхних критических нагрузок симметричной и несимметричной форм потери устойчивости. Установлено, что если вид комбинированного нагружения таков, что интенсивность поперечной нагрузки P в критической комбинации (P_K , $P_{1,K}$, $P_{2,K}$) не превышает P^* , то можно ожидать, что значение P_K симметричной и несимметричной форм потери устойчивости приблизительно совпадают (P^* — интенсивность нагрузки, начиная с которой имеет место различие в равновесных кривых, соответствующих симметричной и несимметричной форме потери устойчивости при поперечном нагружении). Проведена классификация видов комбинированного нагружения в зависимости от характера деформирования оболочек.

6. На конкретных примерах выявлены распределения толщин гибких упругих и упруго-пластических оболочек при комбинированном нагружении, позволяющие повысить критическую нагрузку при фиксированном объеме оболочки.

7. В зависимости от уровня нагрузки предварительного деформирования оценено влияние истории нагружения и полей остаточных прогибов и напряжений на величину критических нагрузок при поперечном нагружении.

8. Исследовано распределение зон активного нагружения, разгрузки, вторичных пластических деформаций в зависимости от вида комбинированного нагружения, геометрии и условий закрепления кромок оболочек на различных этапах деформирования. Путем анализа траекторий напряжений и деформаций изучен характер процессов нагружения при потере устойчивости оболочек.

9. Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов, полученных разными методами: Бубнова-Галеркина и конечных разностей, а также

с результатами, имеющимися в литературе для отдельных случаев.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Додзiana Р.Н. Большие прогибы и устойчивость пологих прямоугольных в плане оболочек. Труды семинара.- Казанск. физ.-техн. ин-т КФАН СССР. Казань, 1982, вып. 15, с. 203-209.
2. Столяров Н.Н., Додзiana Р.Н. Исследование упруго-пластического выпучивания гибких прямоугольных в плане оболочек.- В кн.: Механика сплошных сред. Тез. докл. Республиканской научно-техн. конф. Набережные Челны, 1982, с. 128-129.
3. Столяров Н.Н., Додзiana Р.Н. Об одном алгоритме исследования устойчивости гибких панелей.- В сб.: Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций.- Куйбышев, 1983, с. 57-63.
4. Столяров Н.Н., Додзiana Р.Н. Устойчивость и закритическое поведение гибких прямоугольных в плане оболочек при комбинированном продольно-поперечном нагружении.- В сб.: Прочность и долговечность элементов конструкций, Куйбышев, 1983, с. 113-119.
5. Додзiana Р.Н., Самарин Ю.П. Исследование несимметричных форм потери устойчивости пологих оболочек при комбинированном нагружении. Куйбышевск. политехнический ин-т. Куйбышев, 1984, 19с (Рукопись деп. в ВИНТИ 7 июня 1984 г. № 3752-84).
6. Додзiana Р.Н. Исследование устойчивости упруго-пластических оболочек переменной толщины при комбинированном нагружении. Куйбышевск. политехн. ин-т. Куйбышев, 1984, 20 с (Рукопись деп. в ВИНТИ 7 июня 1984 г. № 3751-84).
7. Додзiana Р.Н., Дипатняков С.Н., Самарин Ю.П. Исследование предельных состояний гибких оболочек при комбинированном нагружении.- В кн.: Надежность и долговечность машин и приборов. Тез. докл. II Всесоюзной научно-технической конф. Куйбышев, 1984, с. 66-67.
8. Додзiana Р.Н. Упруго-пластическое выпучивание гибких прямоугольных в плане оболочек. Труды семинара.- Казанск. физ.-техн. ин-т КФАН СССР. Казань, 1984, вып. 17, часть 2, с. 93-98.
9. Додзiana Р.Н. Устойчивость и закритическое поведение гибких оболочек переменной толщины при комбинированном нагружении.- В сб.: Прочность и долговечность элементов конструкций летательных аппаратов.- Куйбышев, 1984, с. 54-61.

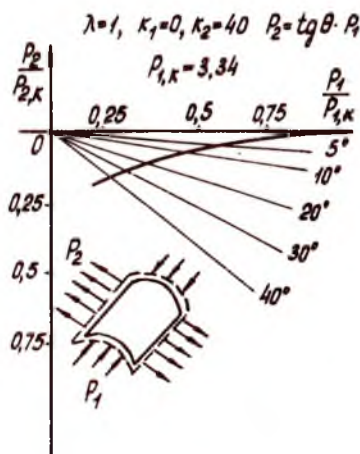
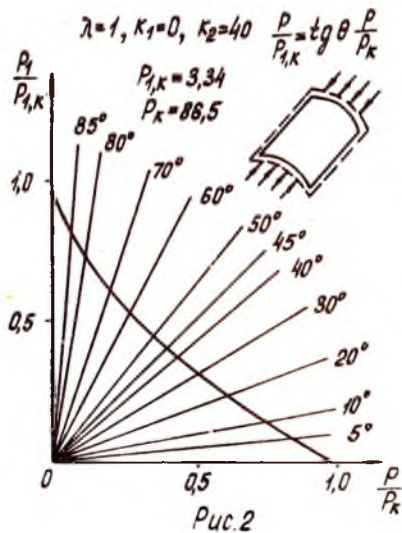
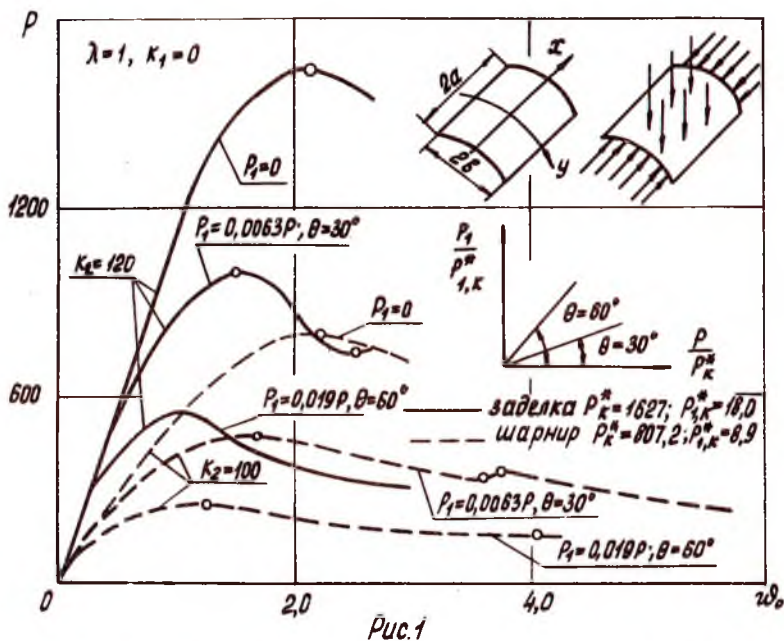


Рис. 3

Подписано в печать 25.12.84. ЕО 15598 ф. 60x84 1/16
Бумага оберточная белая. Оперативная печать.
Уч.-изд. л. 1 Тираж 150 экз. Заказ № 8465

Областная типография имени Мяги, г. Куйбышев