

КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ГБЕНУ-АТИГЛО РАФАЭЛ

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
ТОРСИДАЛЬНЫХ ОБЛОЧЕК

Специальность 05.23.17 - Строительная механика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993



00820007 (H)

Работа выполнена на
ского ордена Трудового Красного
института.

- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
В.И. ГУЛЯЕВ.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
А.О. РАССКАЗОВ;
- кандидат технических наук
Ю.Л. ДИЖЕВИЧ
- Ведущее предприятие - Институт механики АН Украины

Защита состоится 12 февраля 1993 г. в 13 часов на засе-
дании специализированного совета К 068.05.04 Киевского ордена
Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института
(252037, г.Киев-37, Воздухофлотский проспект, 31) в зале
заседаний Совета института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского
ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного
института.

Автореферат разослан "11" января 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доцент

Г.И. МЕЛЬНИЧЕНКО

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тороидальные оболочки находят широкое применение в различных отраслях современной техники: в газовой, нефтяной и химической промышленности в качестве элементов трубопроводов и емкостей; в энергомашиностроении и атомной энергетике при создании газовых турбин. В строительстве, где применение оболочечных конструкций приобретает особо важное значение, тороидальные оболочки являются элементами многих строительных конструкций. Они применяются также в авиа-, ракето- и судостроении. В процессе эксплуатации такие конструкции подвергаются действию интенсивных динамических нагрузок, в том числе вибрационных возмущений.

Процесс колебаний тороидальных оболочек при действии подобных возмущений сопровождается рядом механических эффектов и физических явлений, свойственных нелинейным системам с большим числом степеней свободы. К ним можно отнести: перестройку формы колебаний, возникновение сложных резонансных режимов колебаний, существование нескольких режимов колебательного движения при одних и тех же значениях динамических параметров нагружения.

Перечисленные эффекты могут выводить конструкцию из устойчивых режимов работы в неустойчивые, а также приводить к недопустимо большим деформациям и напряжениям.

В связи с большими математическими и вычислительными трудностями, возникающими при решении такого класса задач, к настоящему времени в этом направлении проведено весьма ограниченное количество исследований. Поэтому вопросы исследования устойчивости нелинейных вынужденных колебаний тороидальных оболочек являются актуальными и представляют интерес в практическом и теоретическом отношениях.

Целью диссертационной работы является разработка и реализация на ЭВМ численной методики исследования нелинейных вынужденных колебаний тороидальных оболочек и решение с ее помощью ряда прикладных задач.

Научная новизна. Построена система нелинейных дифференциальных уравнений движения замкнутых тороидальных оболочек кругового и эллиптического сечений, а также составных тороидальных оболочек

при действии нормальной к их поверхности, периодически изменяющейся во времени нагрузки. На основе синтеза методов продолжения решения по параметру Ньютона-Канторовича, процедуры проектирования с помощью тригонометрических базисных функций и метода криволинейных сеток построена и реализована на ЭВМ новая методика численного решения нелинейных задач устойчивости колебаний тороидальных оболочек кругового и эллиптического сечения. Получены также решения об устойчивости установившихся нелинейных колебаний тороидальных оболочек, сечения которых состоят из цилиндров и кольцевых пластин, цилиндров и тороидальных фрагментов, тороидальных элементов и конических вставок (Рис. 1). Построены кривые стационарных решений, определены значения критических динамических нагрузок, построены формы потери устойчивости колебаний при различных частотах. Исследованы процессы трансформирования и перестройки форм установившегося движения при потере устойчивости колебаний оболочек. При построении решений рассмотрена возможность потери устойчивости колебаний как по косоосимметричным, так и симметричным формам.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается корректностью постановки задачи, строгостью математических выкладок, использованием обоснованных методов решения, проведением расчетов с достаточной степенью точности, которая контролируется с помощью различных индуктивных приемов, удовлетворением условиям сходимости при использовании численных методов, сопоставлением с решениями задач, полученными другими авторами, а также сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

Практическая ценность. Диссертационная работа выполнена в соответствии с общим планом исследований, проводимых на кафедре теоретической механики и в Проблемной научно-исследовательской лаборатории тонкостенных пространственных конструкций Киевского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института.

Разработанные методики и пакет прикладных программ могут быть использованы для исследования устойчивости колебательных режимов, определении критических нагрузок и соответствующих им форм потери устойчивости тороидальных оболочек.

Результаты выполненных исследований могут найти применение при проектировании тонкостенных оболочечных конструкций в строительстве, машиностроении и других отраслях современной техники.

Апробация работ. Основные положения и результаты выполненных в диссертации исследований докладывались и обсуждались на 50-й научно-технической конференции Киевского инженерно-строительного института (г.Киев, 1990 г.) и на Всесоюзной научно-технической конференции в Калининграде (1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано три печатных работы.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 161 наименование. Она содержит 122 страницы машинописного текста, 36 рисунков, 5 таблиц, всего 159 страниц.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору В.И. Гуляеву за постановку задачи и руководство научными исследованиями, а также старшему научному сотруднику, кандидату технических наук А.А. Киричуку за помощь при разработке вычислительных алгоритмов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен обзор литературы, посвященной исследованию статической и динамической устойчивости оболочек, в частности тороидальных. Дано обоснование актуальности темы, сформулирована цель диссертационной работы.

Тороидальные оболочки применяются в различных отраслях техники. Обеспечение их минимального веса при достаточной прочности и устойчивости к воздействию периодических по времени нагрузок — одна из важнейших задач, поставленных перед наукой. В настоящее время проявляется большой интерес к решению задач о нелинейном деформировании и устойчивости колебаний тороидальных оболочек.

Большой вклад в развитие нелинейной динамики оболочек внесли работы Н.А. Алумяэ, В.В. Болотина, В.З. Власова, А.С.Вольмира, К.З. Галимова, Э.И. Григолюка, А.Н. Гузя, В.И. Гуляева,

Е.А. Гоцуляка, Х.М. Муштари, А.О. Рассказова, В.И. Федосьева, Н.С. Хуана и многих других исследователей.

Вопросы устойчивости и колебаний оболочек различных типов рассматриваются в работах В.А. Баженова, Я.М. Григоренко, Б.Я. Кантора, А.А. Киричука, А.В. Кормишина, P.F. Jordan, W.I. Nordell и других.

Вопросы исследования устойчивости тороидальных оболочек при действии равномерно распределенного внешнего и внутреннего давлений нашли глубокое освещение в работах А.С. Авдонина, В.В. Гайдайчука, Т.И. Кошелевой, В.Т. Лизина, В.И. Мяченкова, И.Ф. Образцова, W. Flugge, L.H. Sobel и других.

В работах А.С. Вольмира и К.З. Хайрнасова выполнено исследование устойчивости тороидальных оболочек кругового сечения в нелинейной постановке. Проведено исследование влияния динамического внешнего давления на процесс выпучивания и последующее поведение тороидальной оболочки в зависимости от скорости нагружения и геометрических характеристик.

Устойчивость нелинейных вынужденных колебаний тороидальных оболочек практически еще не рассмотрена. В данной работе проведено исследование 10 типов тороидальных оболочек с широким диапазоном изменения их геометрических характеристик (Рис. I).

В первой главе изложены соотношения геометрически нелинейной теории тонких оболочек, рассмотрены ее основные положения, базирующиеся на гипотезах Кирхгофа-Лява, введены разрешающие уравнения движения оболочки вращения.

Дифференциальные уравнения движения элемента оболочки в локальной системе ортогональных криволинейных координат (χ^1, χ^2) получены из условия равенства нулю главного вектора и главного момента всех сил, приложенных к элементу срединной поверхности оболочки и представлены в виде:

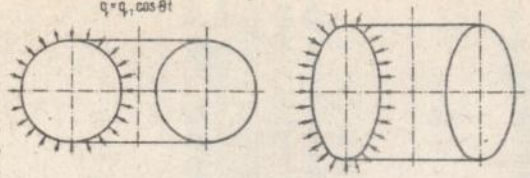
$$\frac{\partial \sqrt{a} \bar{T}^\alpha}{\partial \chi^\alpha} + \sqrt{a} \bar{q}(t) - \sqrt{a} \delta h \frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0 \quad (I)$$

где \bar{T}^1, \bar{T}^2 - контрвариантные векторы внутренних усилий

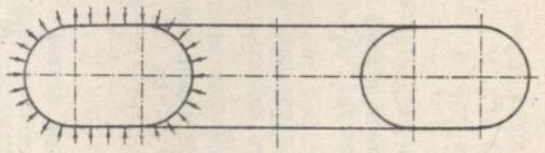
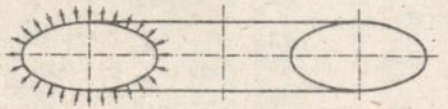
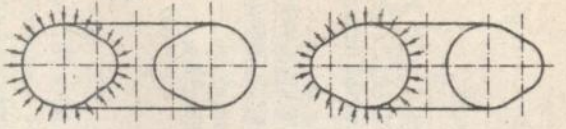
$$(\bar{T}^1 = T^{11} \bar{e}_1 + T^{12} \bar{e}_2 + T^{13} \bar{e}_3; \quad \bar{T}^2 = T^{21} \bar{e}_1 + T^{22} \bar{e}_2 + T^{23} \bar{e}_3);$$

$\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ - векторы основного локального базиса системы координат χ^1, χ^2 ($\bar{e}_3 = [\bar{e}_1, \bar{e}_2] / \sqrt{a}$).

2-2-8035
 $q = q_0 \cos \theta t$



$q = q_0 \cos \theta t$



5

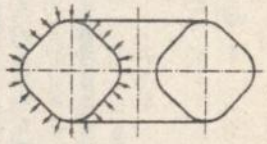
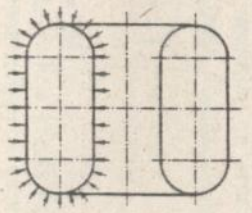
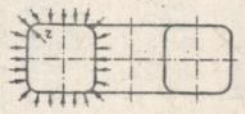
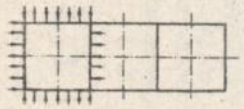


Рис. 1. Виды исследованных оболочек

$$\frac{\partial \sqrt{a} \bar{M}^\alpha}{\partial x^\alpha} + [\bar{e}_\alpha, \bar{T}^\alpha] \sqrt{a} = 0 \quad (2)$$

Здесь a - фундаментальный определитель метрического тензора поверхности оболочки, характеризующий ее геометрию; δ - плотность материала; h - толщина; \bar{q} - вектор внешней нагрузки; \bar{u} - вектор перемещения.

Контрвариантные векторы внутренних усилий и моментов можно разложить по векторам основного локального базиса недеформированной срединной поверхности S

$$\bar{T}^\alpha = T^{\alpha\beta} \bar{e}_\beta + T^{\alpha 3} \bar{e}_3; \quad (3)$$

$$\bar{M}^\alpha = C_{\beta\gamma} M^{\alpha\beta} \bar{e}^\gamma \quad (4)$$

где M^{11} , M^{22} - изгибающие моменты; $M^{12} = M^{21}$ - крутящие моменты; $C_{\beta\gamma}$ - дискриминантный тензор поверхности; $C_{11} = C_{22} = 0$, $C_{12} = \sqrt{a}$, $C_{21} = -\sqrt{a}$.

Контрвариантные составляющие тензоров мембранных $T^{\alpha\beta}$ и изгибных $M^{\alpha\beta}$ усилий выражаются через ковариантные компоненты тензоров мембранных $E_{\alpha\beta}$ и изгибных $M_{\alpha\beta}$ деформаций:

$$T^{\alpha\beta} = \frac{Eh}{1-\nu^2} E_{\gamma\omega} [\nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\omega} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\omega}]; \quad (5)$$

$$M^{\alpha\beta} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} M_{\gamma\omega} [\nu a^{\alpha\beta} a^{\gamma\omega} + (1-\nu) a^{\alpha\gamma} a^{\beta\omega}], \quad (6)$$

$$(\alpha, \beta, \gamma, \omega = 1, 2)$$

Компоненты деформаций $E_{\alpha\beta}$ и $M_{\alpha\beta}$ определяются через вектор перемещений $u = \{u, v, w\}$.

$$E_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x^\alpha} \bar{e}_\beta + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x^\beta} \bar{e}_\alpha + \nu_\alpha \nu_\beta \right),$$

$$M_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C^{\alpha\gamma}} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial x^\beta} \bar{e}^\gamma + \frac{1}{C^{\beta\omega}} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial x^\alpha} \bar{e}^\omega \right) \quad (7)$$

где $\bar{\Omega} = C^{\alpha\beta} U_\alpha \bar{e}_\beta$ - вектор углов поворота нормали срединной поверхности; $U_\alpha = (\partial \bar{u} / \partial x^\alpha) \bar{e}_3$

Во второй главе рассмотрена методика численного исследования динамики и устойчивости нелинейных вынужденных колебаний тороидальных оболочек.

Вынужденные колебания оболочки в общем виде описываются системой дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \bar{F}(\bar{u}) + \lambda \bar{q} = 0 \quad (8)$$

где $\bar{u} = \{u, v, w\}$ - вектор перемещений; $\bar{F} = \{F_1, F_2, F_3\}$ - нелинейная вектор-функция, компоненты которой являются полиномами относительно u, v, w и их производных по x^1 и x^2 ; $\bar{q} = \{q^1, q^2, q^3\}$ - вектор Т-периодической по времени t и -периодической по координате x^1 функции внешней нагрузки; λ - параметр, характеризующий интенсивность нагрузки.

Вектор нагрузки представляется в виде отрезка двойного ряда Фурье

$$\bar{q}(x^1, x^2, t) = \sum_{n=-Nq}^{Nq} \sum_{m=1}^1 \bar{q}_{nm}(x^2) e^{i(n x^1 + m \theta t)} \quad (9)$$

В силу нелинейности системы (8), в установившихся колебаниях оболочки имеют место кроме постоянной по времени составляющей и основной гармоники, совпадающей по частоте с частотой нагрузки, и высшие гармоники, соответствующие супергармоническим формам колебаний оболочки. С учетом метода гармонического баланса ограничимся приближенным решением типа

$$\bar{u}(x^1, x^2, t) = \sum_{n=-Nq}^{Nq} \sum_{m=2}^2 \bar{u}_{nm}(x^2) e^{i(n x^1 + m \theta t)} \quad (10)$$

2*

Пользуясь наличием циклической симметрии форм потери устойчивости оболочки и предполагая, что оболочка находится в режиме установившегося движения, редукцию векторных дифференциальных уравнений колебаний в частных производных в направлении окружной координаты χ^1 , а также по временной координате t выполним на основе проекционного метода с применением базисных функций $e^{-i(n\chi^1 + m\theta t)}$. Такой подход позволяет исключить независимые переменные t и χ^1 из уравнений колебаний и получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Дискретизация этой системы по направлению χ^2 осуществляется методом криволинейных сеток. Стационарные решения полученной системы нелинейных алгебраических уравнений строятся методом продолжения решения по параметру в сочетании с методом Ньютона-Канторовича.

В процессе исследований определяется критическое давление, характеризующее потерю устойчивости колебаний оболочки. Критерием потери устойчивости движения является предельное значение параметра интенсивности нагрузки, при котором якобиан матрицы линеаризованных уравнений J_n обращается в нуль.

При решении поставленной задачи на основе описанного подхода предполагается, что ветвь стационарных решений, которая исходит из нулевого начального решения, является устойчивой до некоторого критического значения параметра нагрузки. Вследствие принятого вида нагрузки этому участку ветви решений соответствуют осесимметричные колебания оболочки с частотой θ . Такой режим колебаний выбирается в качестве основного, в котором с увеличением интенсивности нагрузки амплитуда колебаний оболочки нелинейно возрастает и стремится к своему предельному значению. Для определения бифуркационных точек на кривой стационарных решений полная матрица системы линейных уравнений приобретает блочно-диагональную структуру, в которой каждый блок определяет n -ые коэффициенты Фурье-разложения (10) функций перемещений в тригонометрические ряды по окружной координате χ^1 .

Поставленная задача решена при симметричных и кососимметричных граничных условиях относительно горизонтальной плоскости. В процессе реализации задач на каждом шаге вычислительного алгоритма анализируется значение определителя J_n блока матрицы, соответствующего n -ой гармонике. Обращение J_n в нуль характеризует потерю устойчивости колебаний по n -ой циклически

симметричной форме. Считается, что потеря устойчивости колебаний происходит по той форме и при тех граничных условиях, которые соответствуют минимальному значению критической нагрузки.

Численный алгоритм решения нелинейных задач устойчивости вынужденных колебаний тороидальных оболочек реализован в виде комплекса программ для ЕС ЭВМ и персональных компьютеров.

В третьей главе изложены результаты решений тестовых задач для проверки и определения достоверности предложенного подхода. Для тестовой задачи рассмотрен случай: $R/z = 1,33(3)$, $h/z = 0,01$, $h/z = 0,005$.

Сравнение полученного значения критического давления со значениями других авторов показывает, что различие между результатами составляет от 0,1 до 9 %.

Представлен метод определения низших собственных частот. Рассмотрены случаи, когда частота вынужденных колебаний лежит ниже спектра собственных частот оболочки.

Изучено влияние геометрических параметров оболочек на их динамическую устойчивость, изложены результаты численного решения серии задач нелинейной устойчивости вынужденных колебаний тороидальных оболочек кругового и эллиптического сечений с различными значениями коэффициентов эллиптичности ($K = 1$, $K = 0,5$, $K = 1,75$, $K = 2$).

Оболочки находятся под действием равномерно распределенной нормальной к ее срединной поверхности, гармонической по времени нагрузки, интенсивность которой изменяется по закону

$$q = q_1 \cos \theta t \quad (II)$$

Уравнения срединной поверхности S выбраны в параметрическом виде

$$x = (R - z \cos x^2) \cos x^1, \quad (12)$$

$$y = (R - z \cos x^2) \sin x^1,$$

$$z = z \sin x^2$$

где коэффициент K характеризует эллиптичность сечения оболочки.

На основе соотношений (12) определяем значения первой (a_{ij}) и второй (b_{ij}) квадратичных форм срединной поверхности оболочки. Для подсчета этих коэффициентов и символов Кристоффеля вычисляются соответствующие производные от x , y , z по переменным χ^1 , χ^2 .

Рис. 2 отражает зависимость минимальных критических давлений от значения частот вынужденных колебаний тороидальной оболочки кругового сечения со следующими геометрическими параметрами: $K = 1$; $R/z = 1,33(3)$, $h/z = 0,01$ (рис. 2,а); $R/z = 2,0$, $h/z = 0,01$ (рис. 2,б); $R/z = 10$, $h/z = 0,01$ (рис. 2,в) и формы потери устойчивости движения. В скобках указан порядок формы потери устойчивости по окружной координате χ^1 .

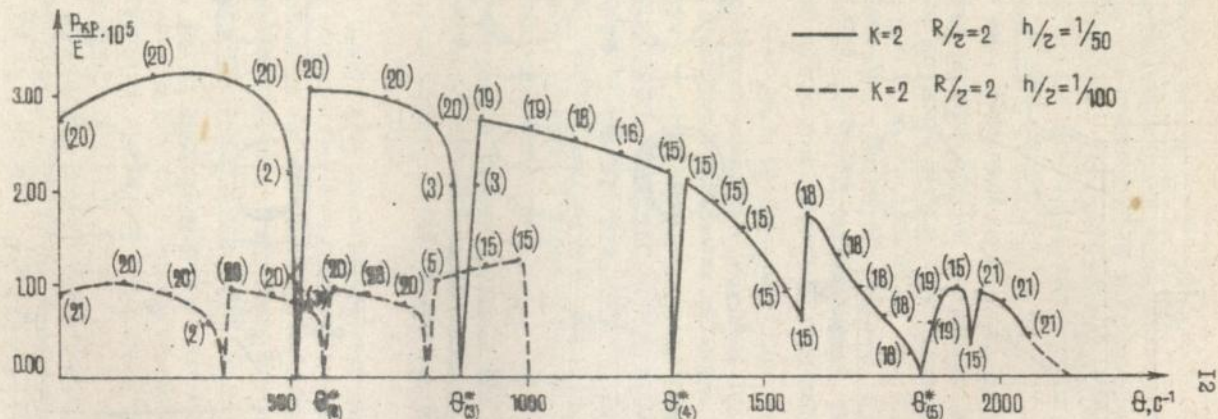
Результаты исследования свидетельствуют о том, что потеря устойчивости оболочек с характеристиками $R/z = 1,33$ и 2 происходит в некоторых диапазонах частот по осесимметричным формам, а в других — по несесимметричным формам. В пределах каждого диапазона частот увеличение частоты вынужденных колебаний приводит к понижению критического давления. Несесимметричные формы потери устойчивости наблюдаются при $R/z = 10$. Уменьшение толщины оболочек приводит к снижению низших собственных частот и динамических критических нагрузок.

На рис. 3 приведены зависимости критических давлений от частот колебаний и неустойчивые формы движения для тороидальной оболочки эллиптического сечения с параметрами: $K = 2$; $R/z = 2$; $h/z = 0,01$, $0,02$.

Анализ полученных результатов показывает, что для тороидальных оболочек с коэффициентом эллиптичности $1 < K < 1,8$ минимальная критическая нагрузка соответствует косоасимметричным граничным условиям. В остальных случаях ($K < 1$ и $K > 1,8$) реализуются симметричные граничные условия.

В четвертой главе исследована устойчивость нелинейных вынужденных колебаний составных тороидальных оболочек, подверженных действию нормальной к срединной поверхности гармонической нагрузки.

При расчете на устойчивость колебаний составных оболочечных конструкций большой интерес представляет задача изучения влияния параметров входящих в нее элементов на динамическую несущую



12

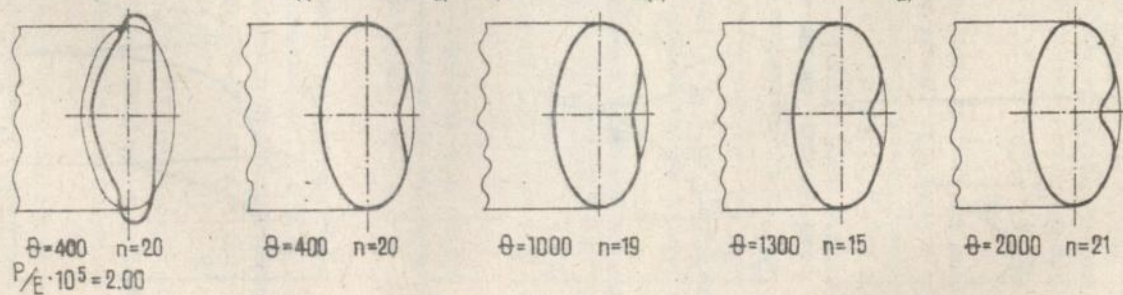


Рис. 3

способность конструкций в целом. При потере устойчивости движения оболочки на ее поверхности можно выделить участки быстрого изменения рельефа и участки, практически не претерпевающие трансформирования.

Специфика метода криволинейных сеток (МКС), с помощью которого осуществляется переход от исходных векторных дифференциальных соотношений к нелинейной системе алгебраических уравнений, состоит в том, что конечные разности применяются к векторным уравнениям движения оболочки. При этом система составных осесимметричных оболочек может рассматриваться в целом, без расчленения ее на отдельные фрагменты, в связи с чем исключается необходимость введения дополнительных уравнений, описывающих условия контакта. Разностные соотношения остаются справедливыми в местах ступки и излома срединной поверхности..

Еще одно преимущество используемого метода заключается в увеличении скорости сходимости решений за счет исключения ошибки аппроксимации ковариантной производной вектор-функции жестких смещений, присущей большинству численных методов.

Исследовано влияние гладкости сопряжения фрагментов и состава оболочки на ее динамическую несущую способность. Решены задачи устойчивости нелинейных вынужденных колебаний тороцилиндрического бака и тороидальных оболочек с квадратными сечениями.

При анализе результатов исследований тороцилиндрического бака можно сделать следующие выводы. При потере устойчивости движения тороидальные поверхности практически не претерпевают трансформирования.

Подобные исследования проведены также для трех видов тороидальных оболочек с коническими вставками. Оболочка состоит из двух поясов тороидальных фрагментов с разными радиусами поперечного сечения, соединенных двумя касающимися их коническими оболочками. При исследовании указанных оболочек учтена возможность потери устойчивости их движения как по осесимметричным ($n=0$), так и циклически симметричным ($n>1$) формам.

Необходимо отметить, что для оболочки первого типа (Рис.4,а) минимальные критические нагрузки соответствуют несосесимметричной форме потери устойчивости движения.

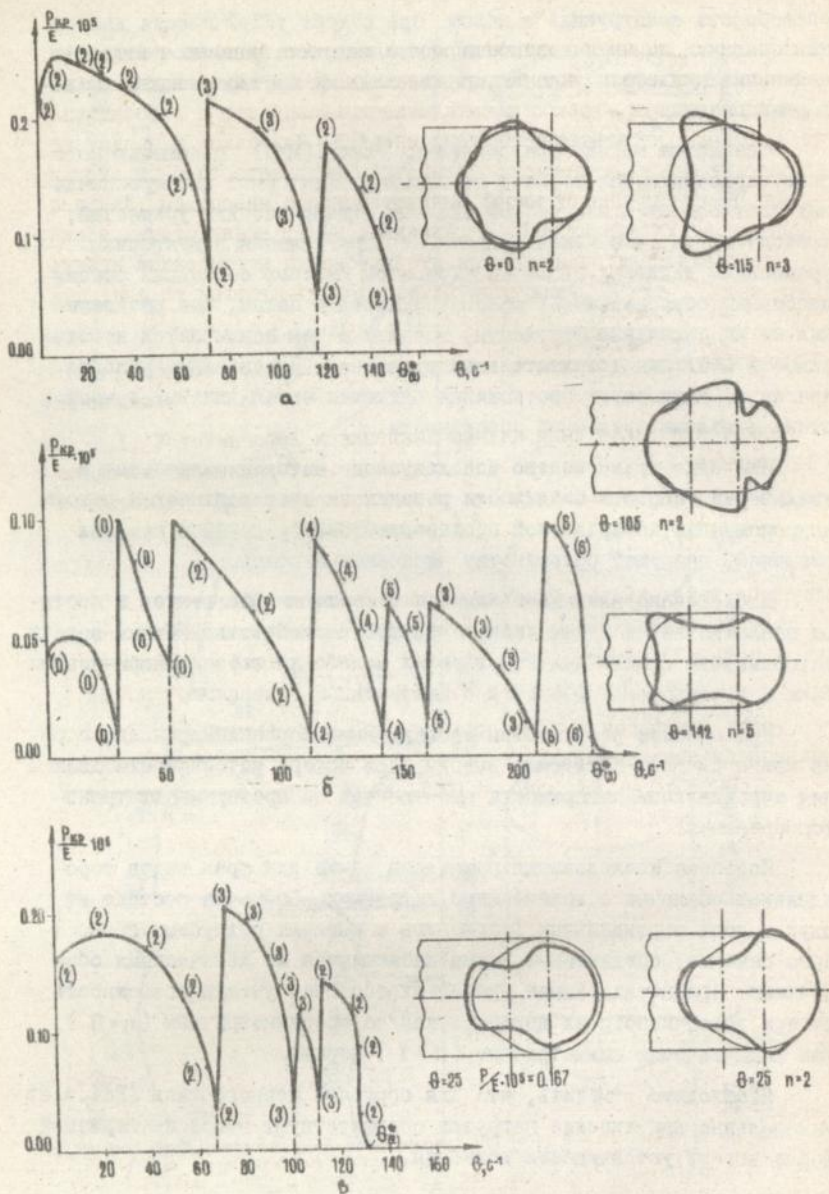


Рис. 4

Для оболочек второго типа имеет место сложное очертание графика зависимости критических давлений от частот установившихся колебаний. При частоте колебаний меньше 55 с^{-1} рассматриваемая оболочка теряет устойчивость по осесимметричной форме, асимметрично относительно экваториальной плоскости, при частотах от 55 с^{-1} до первой нижней собственной частоты ($\theta^* = 235 \text{ с}^{-1}$) оболочка теряет устойчивость по неосесимметричной форме, симметрично диаметральной плоскости. Данная оболочка отличается сравнительно невысокой несущей способностью. Анализ результатов показывает, что при частотах $\theta = 30, 110, 140, 160, 205 \text{ с}^{-1}$ оболочка находится в состояниях, близких к резонансному.

Оболочка третьего типа теряет устойчивость по неосесимметричной форме с образованием в основном двух вмятин в окружном направлении и обладает самой высокой несущей динамической способностью.

График зависимости критической нагрузки от частот колебаний показан на рис. 4, в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика численного решения широкого класса задач устойчивости нелинейных вынужденных колебаний гладких и составных тороидальных оболочек, основанная на синтезе методов тензорного анализа, процедуры проектирования с помощью тригонометрических базисных функций, специальной модификации метода конечных разностей и метода Ньютона-Канторовича.

2. На базе разработанной методики создан автоматизированный вычислительный комплекс программ, реализующий на ЭВМ алгоритм решения нелинейных задач устойчивости установившихся вынужденных колебаний тороидальных оболочек с произвольной формой осевого сечения.

3. Получены решения задач устойчивости вынужденных колебаний гладких тороидальных оболочек как кругового, так и эллиптического сечения при действии равномерно распределенного, изменяющегося во времени давления; исследована устойчивость устано-

вившихся колебаний составных тороидальных оболочек, состоящих из цилиндрических и тороидальных фрагментов, цилиндров, кольцевых пластин и тороидальных элементов в области низших частот вынужденных колебаний. Найдены значения критических динамических нагрузок, в пространстве состраний построены кривые стационарных решений, построены осесимметричные формы установившегося движения и неустойчивые формы движения, в области низших частот получены зависимости интенсивности критического динамического давления от частоты гармонической нагрузки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Устойчивость нелинейных вынужденных колебаний тонких оболочек вращения: Тез. докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование и эксплуатация корпусов // Судостроение. - 1989. - С. 85. (Соавторы В.И. Гуляев, А.А. Киричук).

2. Устойчивость нелинейных колебаний тороидальной оболочки эллиптического сечения // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1990. - Вып. 57. - С. 28-32. (Соавтор - А.А. Киричук).

3. Устойчивость нелинейных вынужденных колебаний тороидальной оболочки кругового сечения // Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев, 1991. - Вып. 58. - С. 82-85.

Подл. к печ. 28. II. 92. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. № 3.
 Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,16.
 Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 1-8635. Бесплатно.

Формы выпол.

252151, г. Киев, ул. Волинская, 60.

19
1906 г. 6. 6. 1906 г.
АН УРСР

Бесплатно

№ 26.620
АВ 26.620