

КОЛОСОВ Геннадий Иванович

**УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ
ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
К СИЛОВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ



диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва -2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ФГУП ЦНИИмаш)»

Официальные оппоненты: Васильев Валерий Витальевич,
профессор, академик РАН,
заместитель главного конструктора ОАО
«Центральный научно-исследовательский институт
специального машиностроения»

Лопаницын Евгений Анатольевич,
профессор, доктор физико-математических наук,
ведущий конструктор АО НПЦ газотурбостроения
«Салют» конструкторского бюро перспективных
разработок

Туркин Игорь Константинович,
профессор, доктор технических наук,
заведующий кафедрой «Авиационно-ракетные
системы» Московского авиационного института
(технического университета)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Государственный космический
научно-производственный центр имени
М.В. Хруничева» Конструкторское Бюро «Салют»

Защита состоится «01» ноября 2017 г. в « » часов на заседании
диссертационного совета Д212.141.03 при Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просьба направлять
по указанному адресу в двух экземплярах.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.141.03
д.т.н., доцент

А.Ю. Карпачев

1. Общая характеристика работы

Актуальность темы. Нормы прочности конструкций основываются на использовании метода расчетных предельных состояний, согласно которому потеря устойчивости рассматривается как исчерпание ими несущей способности и входит в понятие прочности конструкции. Вопросы устойчивости элементов конструкций имеют особую актуальность для изделий ракетно-космической техники (РКТ), для которых наука о прочности должна обеспечить практически 100%-ную вероятность их целостности во всех штатных случаях эксплуатации. Расчет на устойчивость равновесных состояний оболочечных элементов конструкций РКТ является обязательной частью любого расчета на прочность.

В основе теории устойчивости оболочек лежат такие фундаментальные задачи, как устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии, цилиндрических и сферических оболочек при внешнем давлении, для которых получены аналитические решения. Между экспериментальными и прогнозируемыми по этим аналитическим решениям результатами существуют существенные как количественные, так и качественные расхождения. Несмотря на большой накопленный опыт создания сложных крупногабаритных конструкций из тонкостенных оболочек, на практически необозримые многочисленные теоретические и экспериментальные работы в области исследований устойчивости оболочек, а также на созданные мощные программные комплексы, проблема прогнозирования устойчивости равновесных состояний упругих оболочек не утратила своей актуальности. Признание того, что именно начальные прогибы являются главной причиной плохой корреляции между расчетными данными теории малых прогибов и экспериментальными результатами, не сопровождалось широким внедрением теории начальных прогибов в инженерную практику.

Большинство правил проектирования тонких упругих оболочек базируется на результатах статистической обработки экспериментальных данных и постулате о существовании нижних пределов неразрушающих нагрузок, согласно которому максимально допустимое значение эксплуатационной нагрузки определяется с использованием коэффициента снижения классической величины критической нагрузки для идеальной оболочки – коэффициента устойчивости. Подбор коэффициента устойчивости для каждого расчетного случая проводится так, что когда на него умножается классическая верхняя критическая нагрузка, то получается нижняя граница для всех экспериментальных данных, соответствующая рассматриваемому расчетному случаю.

Наряду с экспериментально-статистическим подходом к выбору коэффициентов устойчивости существует экспериментально-расчетный подход к их назначению, в основе которого лежит использование статистически обоснованных форм и амплитуд начальных прогибов, характерных для конкретного технологического процесса изготовления оболочек.

Как экспериментально-статистический, так и экспериментально-расчетный подходы к определению коэффициентов устойчивости возможны, когда по устойчивости данного типа оболочек, изготовленных по определенной

технологии, существует необходимая экспериментальная база данных. Создание подобных баз данных требует существенных материальных и временных затрат.

Таким образом, проблема прогнозирования устойчивости равновесных состояний оболочек при отсутствии коэффициентов устойчивости, не получила расчетно-теоретического решения, удовлетворяющего потребностям практики.

Целью работы является разработка расчетно-теоретического подхода к прогнозированию границ, гарантирующих устойчивость равновесных состояний оболочечных элементов конструкций при осесимметричном деформировании.

Достижение поставленной цели осуществляется путем:

- постановки задачи устойчивости осесимметричных равновесных состояний упругих оболочек вращения к малым силовым возмущениям, действующим на конечном промежутке времени;
- исследования характера возмущенного движения поверхности оболочки в окрестности ее равновесного состояния;
- обоснования существования нижнего предела критических нагрузок упругих оболочек к силовым возмущениям;
- создания методического и программного обеспечения по прогнозированию допустимых значений эксплуатационных квазистатических нагрузок оболочечных элементов конструкций на основе математического моделирования по исходной конструкторской документации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые разработан подход к решению проблемы расчетного прогнозирования коэффициентов устойчивости для изотропных, ортотропных, вафельных и композитных цилиндрических, сферических и конических оболочек при осесимметричном нагружении;
- впервые определены условия, необходимые для возникновения колебательной неустойчивости осесимметрично деформированных упругих оболочек вращения, подверженных действию малых силовых возмущений, зависящих от времени;
- впервые установлено существование области относительной устойчивости осесимметрично нагруженных упругих оболочек вращения;
- впервые разработан метод прогнозирования границ, гарантирующих устойчивость равновесных состояний упругих оболочек вращения, нагруженных осесимметричными силами;
- разработан метод определения условий возникновения флаттера элементов выходных блоков высотных ракетных двигателей (РД), изготовленных из композитных материалов и усиленных бандажным подкреплением.

Методы исследований:

- применение динамического критерия устойчивости механических систем для анализа характера возмущенного движения поверхности упругих оболочек при наличии силовых возмущающих факторов, действующих на конечном промежутке времени;
- применение линеаризованных уравнений при анализе характера возмущенного движения поверхности упругих оболочек в окрестности исследуемого равновесного состояния;

- применение хорошо апробированных и надежных методов численного интегрирования при определении динамических характеристик оболочек вращения, нагруженных осесимметричной системой консервативных сил;
- применение метода Бубнова-Галеркина при сведении уравнений возмущенного движения поверхности оболочек в перемещениях к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Достоверность научных положений, результатов и выводов основывается на:

- использовании классических соотношений теории оболочек В.В. Новожилова и Л.А. Шаповалова;
- строгой математической постановке задач устойчивости упругих оболочек к малым силовым возмущениям, явно зависящим от времени;
- применении для анализа условий неустойчивости оболочек наиболее общего и строгого динамического критерия;
- применении апробированных программных продуктов;
- валидации результатов прогнозирования границ, гарантирующих устойчивость равновесных состояний оболочечных элементов конструкций, по экспериментальным значениям коэффициентов устойчивости.

Практическая ценность работы. Разработано методическое и программное обеспечение, готовое к практическому использованию для прогнозирования несущей способности осесимметрично нагруженных оболочечных элементов конструкций на основе исходной конструкторской документации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на IX и X Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006, 2011), на Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Ярополец, 2008, 2010, 2011, 2012, 2015), на XXXXI Всероссийском симпозиуме «Механика и процессы управления» (Миасс, 2011), на Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии-2010» (Реутов, 2010), на семинарах в ИПМ механики РАН (Москва, 2001, 2006), на заседании научного семинара им. Э.И. Григолюка в НИИ Механики МГУ (Москва, 2013), на «Ломоносовских чтениях» (Москва, 1998, 1999), на Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы механики», посвященной 90-летию В.И. Феодосьева (Москва, 2006), на научных чтениях, посвященных памяти Ю. А. Мозжорина (Королев, 2010), на VII Международном научно-техническом совещании «Динамика и прочность автомобиля» (Москва, 1997), на заседании научного семинара в НИИ Механики МГУ под руководством академика И.Г. Горячевой (Москва, 2014).

Личный вклад автора. Основные результаты работы, в том числе постановка задач, разработка и выбор математических моделей, результаты расчетов, положения и выводы, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 32 работы, из них 19 – статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем 4,29 п/л.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Объём работы составляет 210 страниц печатного текста, включая 62 рисунка и 24 таблицы. Список литературы содержит 153 наименования.

2. Содержание работы

Во введении описаны существующие подходы к определению коэффициентов устойчивости, используемых при проектировании оболочечных элементов конструкций и обоснована актуальность разработки расчетно-теоретического подхода к определению границ неразрушающих нагрузок по исходной конструкторской документации. Изложена структура диссертации и вопросы, рассматриваемые в ней.

В первой главе «Постановка задач прогнозирования устойчивости равновесных состояний оболочечных элементов конструкций к силовым возмущениям» представлен подход к решению задачи прогнозирования устойчивости равновесных состояний оболочечных элементов конструкций к силовым возмущениям, действующим на конечном промежутке времени.

В разделе 1.1 приведены основные определения и понятия, используемые при анализе устойчивости механических систем к силовым возмущениям, действующим на конечном промежутке времени. Дано обоснование применения динамического критерия устойчивости.

При анализе устойчивости в работе используется определение устойчивости Ляпунова, обобщенное Н.Г. Четаевым на случай действия на механическую систему малых и явно зависящих от времени силовых возмущений, когда наряду с нелинейными уравнениями движения невозмущенной системы

$$dy/dt=Y(t, y)$$

рассматриваются уравнения возмущенного движения

$$dy/dt=Y(t, y)+R(t, y),$$

где t – время, $y=(y_1, \dots, y_n)$ – обобщенные координаты, описывающие поведение механической системы, $R(t,y)$ – класс некоторых неизвестных функций, характеризующих возмущающие факторы. Относительно этих функций предполагается, что они достаточно малы и удовлетворяют некоторым общим условиям, обуславливающих существование решений уравнений возмущенного движения в окрестности рассматриваемого невозмущенного движения. Если отклик исследуемой системы мал, то она признаётся устойчивой.

Механическая система считается относительно неустойчивой, если среди всевозможных силовых возмущений существуют те, которые способны вызвать ее колебательную неустойчивость.

В разделе 1.2 рассмотрены необходимые условия неустойчивости неконсервативных механических систем при наличии циркуляционных сил. Для таких систем помимо дивергентной (бифуркационной) неустойчивости, возможна также и колебательная (флаттерная) неустойчивость.

Показано, что для неконсервативных циркуляционных систем с двумя степенями свободы условия равенства парциальных частот системы являются

необходимыми, но не всегда достаточными условиями ее колебательной неустойчивости. Достаточные условия неустойчивости равновесных состояний механической системы к силовым возмущениям могут быть определены только на основе анализа ее возмущенного движения в нелинейной постановке. Эти условия не являются предметом рассмотрения диссертационного исследования.

Оболочка, находящаяся под постоянным воздействием малых возмущающих сил, способна при определенных условиях потерять устойчивость. Процесс резкого перехода оболочек от исходного к конечному равновесному состоянию весьма кратковременен. При детальном теоретическом исследовании этого процесса требуется:

- достаточно точно описать напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочки перед потерей ею устойчивости;
- выявить необходимые условия перехода оболочки к ее новым равновесным состояниям;
- исследовать при выполнении необходимых и достаточных условий переход от исходного к конечному равновесному состоянию;
- исследовать закритическое равновесное состояние оболочки.

Знание картины закритического состояния оболочки, равно как и процесса перехода ее к этому состоянию, для расчета инженерных конструкций не является необходимым, ибо при этом оболочка уже не работает в расчетном режиме.

Упругая оболочка, находящаяся в поле действия консервативных сил и подверженная влиянию малых по сравнению с ними сил, явно зависящих от времени, может рассматриваться как неконсервативная система с бесконечным числом степеней свободы. При некоторых значениях этих консервативных сил у нагруженной оболочки возможно существование как равных, так и критически близких собственных частот. Характер возмущенного движения поверхности оболочки в окрестности этих особых равновесных состояний подлежит исследованию с целью определения возможности возникновения динамической неустойчивости и появлению угрозы последующего перехода к новому равновесному состоянию.

Сформулированный подход к определению условий, необходимых для развития колебательной неустойчивости напряженно-деформированных оболочечных элементов конструкций, основан на анализе характера возмущенного движения поверхности оболочки в окрестности ее исходного равновесного состояния, вызванного малыми силовыми возмущениями, явно зависящими от времени.

Во второй главе «Прогнозирование устойчивости равновесных состояний цилиндрических оболочек к силовым возмущениям» представлены результаты прогнозирования устойчивости осесимметричных равновесных состояний цилиндрических оболочек к силовым возмущениям, действующим на конечном промежутке времени.

Раздел 2.1 посвящен постановке задачи об устойчивости равновесных состояний цилиндрических оболочек к силовым возмущениям.

Для описания поведения оболочки используется вариант геометрически нелинейной теории тонких оболочек Л.А. Шаповалова. Предполагается, что на

находящуюся в равновесном осесимметричном состоянии оболочку действуют малые возмущающие неосесимметричные нагрузки в виде зависящего от времени нормального давления. Характер возмущенного движения оболочек в окрестности их равновесных состояний, вызванного силовыми возмущениями, является предметом анализа и проводится на основе линеаризованных исходных нелинейных уравнений движения с включением в них возмущающей нагрузки и сил инерции.

Решение уравнений возмущенного движения оболочки ищется с использованием разложений параметров дополнительного НДС в ряды Фурье по окружной координате. В результате для каждого номера гармоники n ряда Фурье получены краевые задачи в перемещениях для системы дифференциальных уравнений с частными производными по меридиональной координате и по времени. Граничные условия при этом однородные. Эти уравнения использованы в работе при определении зависимости динамических характеристик оболочек от параметра нагрузки.

Приближенные решения линейных краевых задач систем дифференциальных уравнений в частных производных искались путем представления компонентов вектора дополнительных перемещений в виде рядов по системе форм собственных свободных преимущественно изгибных колебаний ненагруженных оболочек. После применения метода Бубнова - Галеркина задача сводилась к исследованию для каждого из числа волн в окружном направлении системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с постоянными коэффициентами относительно коэффициентов рядов – функций времени.

Установлено, что у этих систем ОДУ матрицы коэффициентов являются матрицами общего вида, что указывает на несамосопряженный характер рассматриваемой неконсервативной задачи. Это означает, что у оболочки кроме дивергентной (бифуркационной) возможна и колебательная неустойчивость.

Следовательно, если на протяжении некоторого времени на оболочку действуют малые силовые возмущения определенного вида, то при выполнении необходимых условий они способны вызвать колебательную неустойчивость оболочки и привести к явлению «скачка», т.е. к внезапной смене равновесного состояния и исчерпания несущей способности оболочки.

По определению оболочка признаётся устойчивой, если при всех значениях n решения систем ОДУ не возрастают со временем.

В разделе 2.2 представлены анализ особенностей спектра собственных частот цилиндрической оболочки, возникающих при квазистатическом осевом сжатии, и результаты прогнозирования границы устойчивости цилиндрических оболочек к силовым возмущениям при таком виде нагружения.

На основе анализа зависимости частот собственных колебаний оболочек от параметра осевой нагрузки k при каждом фиксированном значении числа волн в окружном направлении n установлено существование перехлёстов частотных характеристик (Рис. 1, а), которые происходят множество раз по мере увеличения параметра нагрузки (Рис. 1, б).

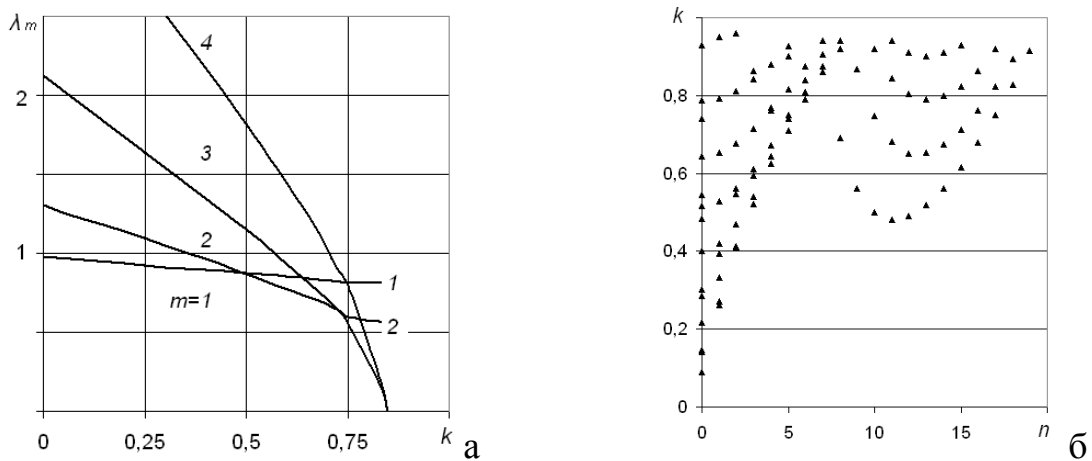


Рис.1. Частотные кривые $\lambda_m = \omega_m^2(k) / \omega_1^2(0)$ четырех мод ($m = 1, \dots, 4$) цилиндрической оболочки с $R/h=100$ и $l/R=1,3$ (R, l, h – радиус, длина и толщина оболочки) при $n=9$ (а). Значения параметров $k = k_{ij}^{(n)}$, при которых равны парциальные частоты i -ой и j -ой мод колебаний оболочки при различных значениях n (б).

Появление перегибов частотных кривых, предшествующих первому появлению в ее спектре нулевой частоты, является отличительной особенностью, которая наблюдается в задачах устойчивости, для которых характерно расхождение между классической теорией и экспериментом.

Движение поверхности оболочки при критически близких частотах $\omega_{ni} \approx \omega_{nj}$ определяется в основном двумя модами колебаний. Это движение допустимо описывать моделью с двумя степенями свободы, соответствующими паре близких частот. Анализ парного взаимодействия частот позволил установить, что при значениях параметра осевого сжатия $k > 0,65$ у характеристических уравнений систем ОДУ в окрестности равных парциальных частот могут появляться комплексные корни - $\Omega_1 = \psi + i\alpha$; $\Omega_2 = \psi - i\alpha$; $\Omega_3 = -\psi + i\alpha$; $\Omega_4 = -\psi - i\alpha$. В этом случае решения рассматриваемых систем уравнений при наличии возмущающих факторов имеют характер колебаний с экспоненциально возрастающей амплитудой. Установлено, что если исходное равновесное состояние оболочки считается безмоментным, то появление комплексных корней невозможно.

Этот вывод подтвержден путем численного интегрирования по времени системы ОДУ

$$\frac{d^2 q_i^{(3)}}{dt^2} = \sum_{m=1}^8 a_{im}^{(3)} q_m^{(3)}(t) + f_i(t) / \rho h \quad (f_2 = a\sqrt{t}, f_1 = f_3 = \dots = f_8 = 0), \quad (1)$$

описывающей возмущенное движение оболочки с безразмерными параметрами $R/h=250$, $l/R=1,3$, при получении которой учитывалось восемь первых гармоник с одинаковым числом окружных волн $n=3$.

Эволюция частотных параметров второй и восьмой мод колебаний $\Omega_{3,2}^*$, $\Omega_{3,8}^*$, обусловленная ростом параметра сжатия k , показана на Рис.2, а.

В диапазоне значений параметра k от 0,72 до 0,77 корни характеристического уравнения являются комплексными. Параметр Ω^* связан с величинами модулей корней Ω соотношением $|\Omega| = \sqrt{\psi^2 + \alpha^2} = \Omega^* \sqrt{\frac{E}{\rho R^2 (1 - \nu^2)}}$.

Результат интегрирования системы (1) для функции $q_2 = q_2(t)$ при значении параметра осевого сжатия $k = 0,75$ по времени на интервале $t \in (0, 0,035)$ с учетом предварительного напряженного и деформированного состояния оболочки подтверждает вывод о развитии колебательной неустойчивости при наличии силового возмущения, явно зависящего от времени (Рис. 2. б).

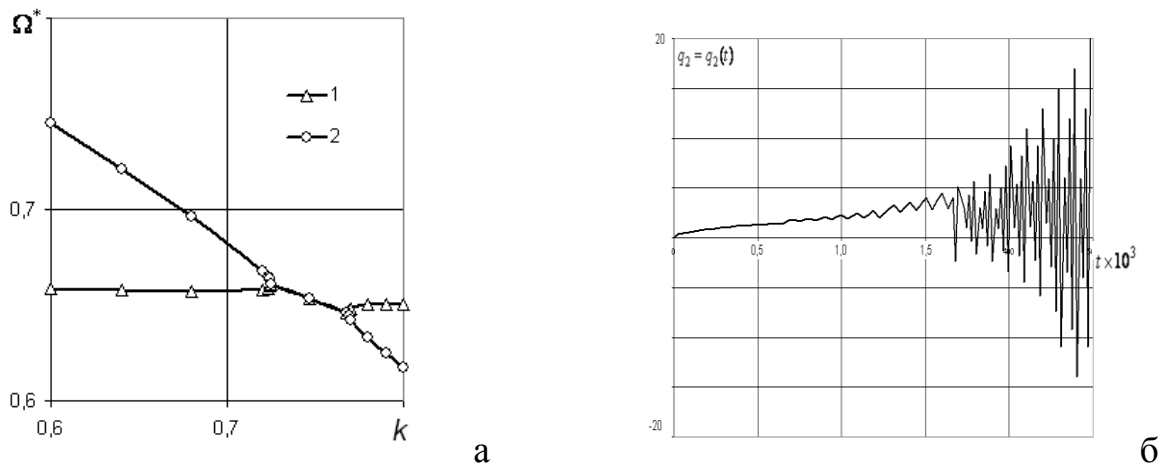


Рис. 2. Зависимость величин $\Omega_{3,2}^*$ (кривая 1), $\Omega_{3,8}^*$ (кривая 2) от параметра сжатия k (а). Результат интегрирования системы (1) для функции $q_2 = q_2(t)$ при $k = 0,75$ с учетом напряженного и деформированного состояния оболочки (б).

Установлено, что в общем случае при переклесте частотных кривых и равенстве парциальных частот решения рассматриваемых систем уравнений содержат слагаемые с временным множителем вне гармонических функций – вековые члены, что по определению означает неустойчивость систем к присутствию некоторых видов силовых возмущений и устойчивость ко всем остальным их видам.

Процесс взаимодействия двух изгибных форм колебаний с близкими частотами исследовался Р.Ф. Ганиевым и П.С. Ковальчуком с позиций теории нелинейных колебаний. Ими установлено, что в рассматриваемом случае возможно существование частотной области, где движение оболочки не представляет собой установившихся колебаний, т.е. ни одно из возможных стационарных решений не является устойчивым. Эти вибрации способны спровоцировать потерю несущей способности оболочки прежде, чем нагрузка достигнет значения, определяемого по формуле Лоренца-Тимошенко, а минимальная собственная частота оболочки станет равной нулю.

Таким образом, угроза потери устойчивости нагруженной оболочки возникает всякий раз, когда в ее спектре, эволюционирующем при изменении нагрузки, возникают равные или критически близкие частоты с равными числами волн в окружном направлении.

Установлено, что для шарнирно опертых изотропных цилиндрических оболочек при значениях параметра $k < 1$ пережесты частотных кривых существуют для всех $n \in [0, N]$, где величина N определяется соотношением

$$N = a \operatorname{int} \left(\sqrt{\frac{2R}{h} \sqrt{3(1-\nu^2)} - \frac{5}{2} \left(\frac{\pi R}{l} \right)^2} \right).$$

Здесь $a \operatorname{int}(x)$ – функция, обрезающая вещественную величину x в сторону нуля до целой части, ν – коэффициент Пуассона.

Зависимости параметров усилий сжатия $k_n = \lambda_n(n)$, определенные при значениях $R/h=125, 250, 500$, $\nu=0,3$ и $l/R=2$, у которых для данного числа волн n впервые фиксировался пережест частотных кривых, представлены на Рис. 3.

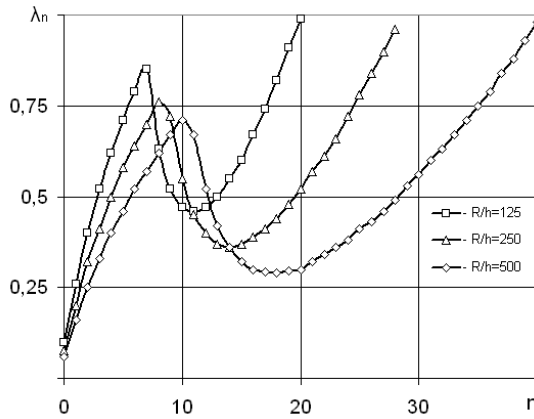


Рис. 3. Зависимости параметров $k_n = \lambda_n(n)$ от параметра волнообразования n

Зависимости $k_n = \lambda_n(n)$ имеют локальный и абсолютный минимумы. Абсолютный минимум величин k_n , равный k_0 , имеет место при числе волн в окружном направлении $n=0$.

В работе получено аналитическое выражение, определяющее значение параметра k_0 для шарнирно опертой цилиндрической оболочки

$$k_0 = \frac{F(m)}{4\sqrt{3(1-\nu^2)} R} \frac{h}{R}, \quad F(m) = \alpha_{m+1} + \alpha_m - \nu^2 + \frac{12\nu^2}{\alpha_{m+1}\alpha_m} \frac{R^2}{h^2}, \quad \alpha_m = \left(\frac{\pi m R}{l} \right)^2, \quad (2)$$

$$m_0 = \begin{cases} 1, & \nu \leq \nu_0 = \sqrt{3} \frac{h}{R} \left(\frac{\pi R}{l} \right)^3 \\ a \operatorname{int} \left(\frac{l \sqrt[6]{12}}{\pi R} \sqrt[3]{\nu \frac{R}{h}} \right), & \nu \geq \nu_0. \end{cases}$$

При значениях параметра осевого сжатия k , меньших k_0 , все частоты цилиндрических оболочек являются различными, так как пережесты частотных кривых отсутствуют. При этом при любых значениях параметра волнообразования n решения систем ОДУ выражаются через гармонические функции, и, следовательно, не возрастают во времени, что означает устойчивость оболочек по отношению к любым малым силовым возмущениям, т.е. безусловную устойчивость.

На Рис. 4 представлены данные, характеризующие границы экспериментально определенных коэффициентов снижения критической нагрузки

при 99%-ном уровне вероятности попадания экспериментальных точек в вышележащую от неё область для оболочек с относительными толщинами $R/h < 500$ и $R/h > 2000$ в зависимости от их относительной длины $z = l^4 \sqrt{1 - \nu^2} / \sqrt{Rh}$. Там же показаны как расчетные значения коэффициентов k_0 оболочек с относительной толщиной $R/h = 100$ для граничных условий Навье (кривая Г1) и для условий заделки (кривая Г2), так и зависимость параметров осевого сжатия круговой цилиндрической оболочки, полученная Флюгге в рамках концепции Эйлера.

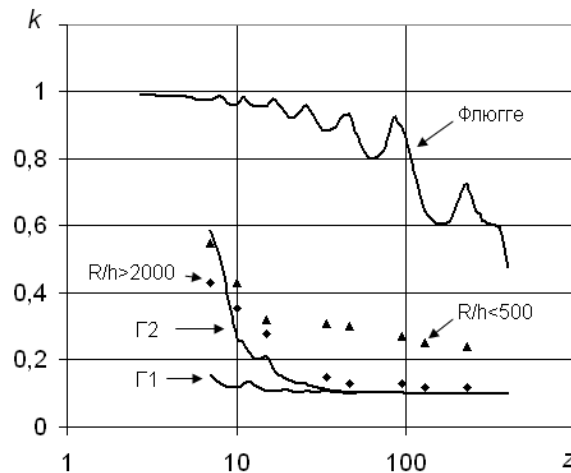


Рис. 4. Коэффициенты устойчивости сжатых цилиндрических оболочки с относительными толщинами $R/h < 500$ и $R/h > 2000$ при 99%-ном уровне вероятности попадания экспериментальных точек в вышележащую от неё область и расчетные значения коэффициентов k_0 для граничных условий Навье (Г1) и условия заделки (Г2) при $R/h = 100$

При значениях параметра $z \geq 30$ как величины параметров k_0 , определяющих границу безусловной устойчивости сжатых цилиндрических оболочек, так и нижние границы экспериментально определенных коэффициентов снижения критической нагрузки, практически не зависят от относительных длин оболочек z и в соответствии с соотношениями (2) величина параметра k_0 вычисляется как

$$k_0 = \frac{\nu^{2/3}}{\sqrt{1 - \nu^2}} \left(\frac{h}{R} \right)^{1/3}.$$

При значениях параметра относительной длины $z < 7$, а также тогда, когда коэффициент Пуассона равен нулю, величина параметра k_0 может быть вычислена по соотношению

$$k_0 = \frac{5\pi^2}{4\sqrt{3}z^2}.$$

Для оболочек средней длины, $7 \leq z \leq 35$, сопоставление расчётных значений параметра k_0 с нижней границей области экспериментальных значений коэффициентов устойчивости показало, что расчет границы безусловной устойчивости с учетом граничных условий, близких к реальным, обеспечивает надежную оценку положения нижнего предела устойчивости цилиндрических

оболочек при осевом сжатии в зависимости от ее относительной длины z (Рис. 4, кривая Г2).

Зависимость коэффициентов устойчивости от относительных толщин R/h сжатых цилиндрических оболочек при 99%-ном уровне вероятности попадания экспериментальных точек в вышележащую от них область представлена на Рис. 5. Там же представлена зависимость параметра сжатия k_0 от величины этого отношения для случая, когда торцы оболочек полностью защемлены.

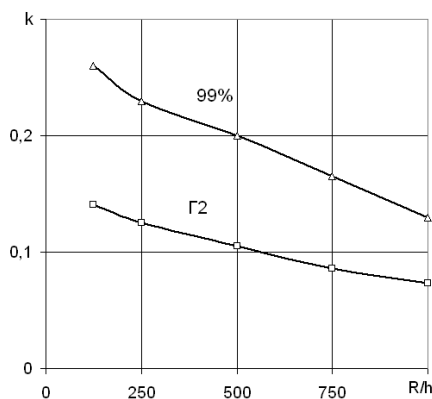


Рис. 5. Зависимость коэффициентов устойчивости от относительных толщин оболочек R/h (кривая 99%) и расчетные значения параметра сжатия k_0 для оболочек, защемленных по торцам (кривая Г2)

Зависимости параметров k_1 и k_2 от относительной толщины оболочек R/h в случае, когда $\nu = 0,3$ и $L/R=2$, представлены на Рис. 6.

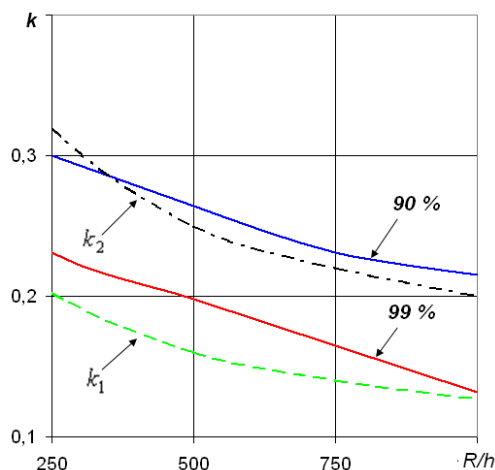


Рис. 6. Коэффициенты устойчивости оболочки k_1, k_2 (пунктирные кривые) и уровни 99 % и 90 % вероятности попадания критических усилий сжатия в вышележащую от них область

Проектировщики и изготовители реальных оболочечных конструкций применяли и применяют различные эмпирические коэффициенты понижения по отношению к данным классической теории малых прогибов. Так, например, в начале 60-х годов в США при проектировании элементов конструкций ракет «Тор» и «Сатурн» применялась статистическая кривая 99 % вероятности, тогда как в СССР при проектировании ракеты «Протон» в то время использовалась кривая 90 % вероятности.

Для практической оценки устойчивости сжатых цилиндрических оболочек согласно одной из рекомендаций предлагается брать в качестве расчетного значения критической силы минимальную величину нагрузки на кривой первого закритического равновесного их состояния – первую нижнюю критическую нагрузку (ей соответствует параметр k_z), зависимость которой от относительной длины оболочки z находится в соответствии с экспериментом. Зависимость параметра k_z от параметра z представлена на Рис. 7.

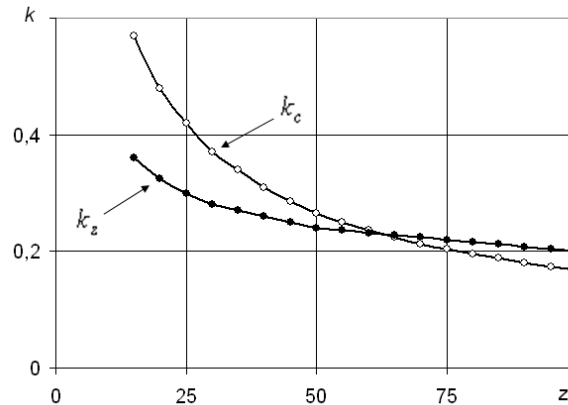


Рис. 7. Коэффициенты устойчивости сжатых цилиндрических оболочек:

- k_z - согласно первой нижней критической нагрузке;
- k_c - согласно локальному минимуму функции $k_n = \lambda_n(n)$.

Расчетами установлено, что значение параметра k_c , соответствующее локальному минимуму зависимости $k_n = \lambda_n(n)$, удовлетворительно согласуется (как это показано на Рис. 7) с зависимостью параметра k_z от относительной длины оболочки z .

В случае оболочек средней длины величина k_c зависит в основном от значений параметров относительной длины оболочки z и коэффициента Пуассона ν и может быть вычислена по соотношению

$$k_c = \frac{\sqrt[3]{60\pi^2}}{2\sqrt{3}} \left(\sqrt{1-\nu^2} + \frac{1}{2(1-\nu^2)} \right) \frac{1}{z^{2/3}} = \frac{4.37}{z^{2/3}}.$$

Появление тех или иных случайных силовых воздействий, которые обычно отсутствуют в лабораторных условиях, может оказаться вполне вероятным и даже неизбежным при эксплуатации конструкции. В зоне относительной устойчивости оболочки ($k_0 \leq k < 1$) эти силовые воздействия способны привести к явлению «скачка», приводящего к исчерпанию несущей способности оболочки. В рамках данной математической модели потеря устойчивости цилиндрической оболочки при значениях параметра осевого сжатия $k_0 \leq k < k_1$ может быть вызвана только осесимметричными силовыми воздействиями. При значениях $k_1 \leq k < k_2$ дополнительной причиной потери устойчивости становятся возмущения, возбуждающие балочные формы колебаний оболочки. Силовые возмущения, приводящие к овализации сечений оболочки, способны приводить к потере её устойчивости при значениях параметра осевого сжатия $k > k_2$. Таким образом,

возмущения, возбуждающие балочные формы колебаний оболочки, способны вызвать потерю оболочкой устойчивости прежде, чем силовые возмущения, приводящие к овализации ее сечений.

В разделе 2.3 приведены результаты применения разработанного подхода к прогнозированию коэффициентов устойчивости для замкнутой круговой цилиндрической оболочки, подверженной действию внешнего давления и осевого сжатия.

Равновесные состояния замкнутой круговой цилиндрической оболочки при комбинированном нагружении равномерным боковым давлением $p = k_p p_B$ и осевым сжатием $T_{11}^0 = k_c T_B$ анализировались с позиций динамического критерия устойчивости, что позволило выявить существование зон их безусловной и относительной устойчивости к силовым возмущениям.

Ломаная линия 1 в плоскости параметров k_c и k_p (Рис. 8, а) отделяет область устойчивости оболочек $\Omega_B = \Omega_0 \otimes \Omega_A$, прилегающую к началу координат, от области безусловной неустойчивости. На границе области безусловной неустойчивости, которую хорошо аппроксимирует линия $k_c + k_p = 1$, в спектре частот оболочки впервые появляется собственная частота, равная нулю. Область устойчивости оболочек Ω_B разделяется прямой $k_c = k_0$ на зоны безусловной Ω_A и относительной Ω_0 устойчивости.

Если значения параметров k_c и k_p принадлежат области $\Omega_A = \{ 0 \leq k_c < k_0 ; 0 \leq k_p \leq 1 \}$, то перекрестов частотных кривых нет и согласно динамическому критерию рассматриваемое равновесное состояние устойчиво к любым малым возмущениям, т.е. оно является безусловно устойчивым.

Если значения параметров k_c и k_p принадлежат области $\Omega_0 = \{ k_0 \leq k_c < 1 ; k_p \leq 1 - k_c \}$, то существуют такие их значения, при которых имеет место перекрест частотных кривых, так что при наличии малых силовых воздействий возможно проявление колебательной неустойчивости. Зона Ω_0 является зоной относительной неустойчивости.

В работе вероятность потери оболочкой устойчивости $p(k_c, k_p)$ при рассматриваемых значениях параметров осевого сжатия и внешнего давления определялась по формуле полной вероятности

$$p(k_c, k_p) = \sum_{n=0}^N p(n) p_n(k_c), \quad (3)$$

где $p(n)$ – вероятность гипотезы, согласно которой при потере устойчивости оболочки образуется n волн в окружном направлении;

$p_n(k_c)$ – вероятность потери устойчивости оболочки при условии образования n волн в окружном направлении.

Считалось, что

$$p_n(k_c) = \begin{cases} 0, & k_c < k_n; \\ 1, & k_c \geq k_n; \end{cases},$$

а величина вероятности $p(n)$ обратно пропорциональна частоте собственных колебаний оболочки ω_{nm} , соответствующей параметру k_n , $p(n) = \alpha / \omega_{nm}$. Величина α определялась исходя из условия нормировки.

Функция вероятности $P(k)$ потери устойчивости цилиндрических оболочек, характеризуемых параметрами $l/R=2$, $R/h=250$, $\nu=0,3$, при осевом их сжатии в отсутствии бокового давления показана на Рис. 8, б.

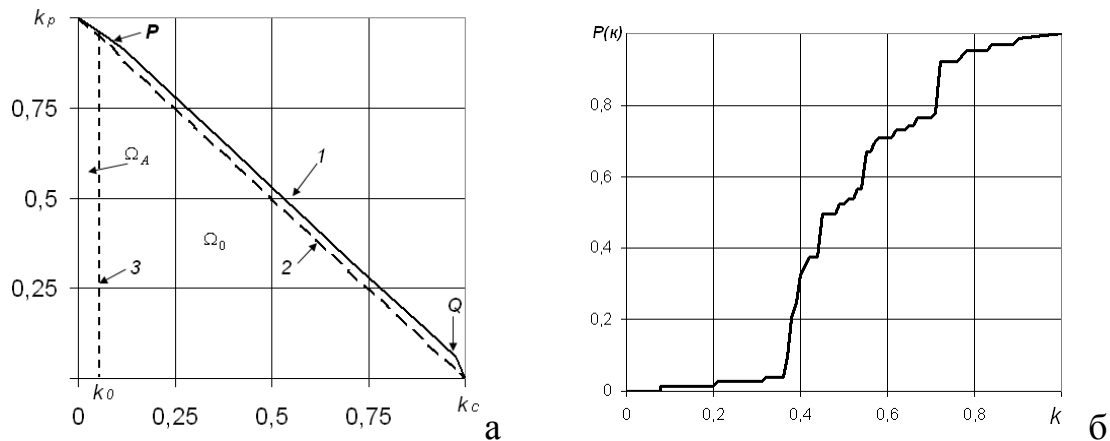


Рис. 8. – Зона устойчивости цилиндрической оболочки $\Omega_B = \Omega_0 \otimes \Omega_A$ при комбинированном нагружении внешним давлением и осевым сжатием (а); функция вероятности $P(k)$ потери устойчивости цилиндрической оболочки с параметрами $l/R=2$, $R/h=250$ при осевом сжатии (б)

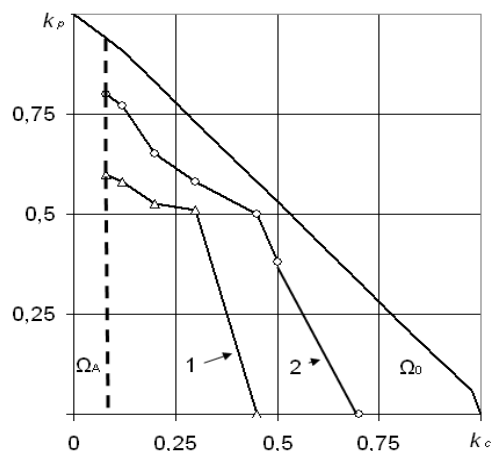


Рис. 9. Линии равной вероятности потери цилиндрической оболочкой устойчивости при комбинированном нагружении: 0,5 - кривая 1; 0,9 - кривая 2

При комбинированном нагружении оболочек боковым давлением и осевым сжатием использование вероятностной модели позволило построить линии равной вероятности в области относительной устойчивости Ω_0 . Изолинии вероятностей 0,5 и 0,9 для рассмотренных оболочек показаны на Рис. 9.

При решении вопроса об устойчивости цилиндрических оболочек, нагруженных всесторонним внешним давлением, используют поправочный коэффициент η к формуле Папковича для приведения в соответствие результатов расчетов и экспериментальных данных. Предполагается, что коэффициент η

зависит только от относительной толщины оболочки R/h . Расхождение между теорией и экспериментом в работе объясняется с привлечением понятия относительной устойчивости оболочек к силовым возмущениям.

В том случае, если траектория нагружения оболочки $pR = 2T_{11}^0$ целиком лежит в зоне ее безусловной устойчивости Ω_A , то перехлесты частотных кривых отсутствуют и величина критического всестороннего давления может быть определена по формуле Папковича. В противном случае траектория нагружения $pR = 2T_{11}^0$ пересекает зону относительной устойчивости Ω_0 и при этом существует вероятность потери оболочкой устойчивости. Эта вероятность может быть оценена по соотношению (3).

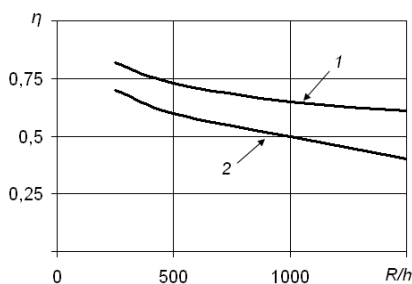


Рис. 10. Зависимость поправочного коэффициента η к формуле Папковича в случае всестороннего внешнего давления от относительной толщины оболочки R/h

Расчетные значения поправочного коэффициента η к формуле Папковича, полученные в работе с использованием указанного подхода (Рис.10, кривая 1) хорошо согласуются с коэффициентами η , основанными на анализе экспериментальных данных (Рис.10, кривая 2).

В разделе 2.4 приведены результаты применения разработанного подхода к прогнозированию безусловной устойчивости вафельных цилиндрических оболочек при осевом сжатии.

Для топливных баков, характеризующихся невысоким уровнем внутреннего давления, основным расчетным случаем является эквивалентное осевое сжатие. Основным методом расчета на устойчивость вафельных оболочек до настоящего времени является эмпирико-статистический метод, основанный на обработке результатов большого количества испытаний разнообразных цилиндрических оболочек (подкрепленных и гладких). Результаты этих испытаний представляются в виде графиков зависимости коэффициента устойчивости эквивалентной гладкой оболочки от параметров нагружения для различных отношений радиуса цилиндрической оболочки к толщине обшивки вафельной панели.

Величина критической нагрузки, полученной традиционным путем с использованием методик, базирующихся на статистической кривой 90% вероятности при определении нижней границы устойчивости вафельной обечайки бака горючего унифицированного блока РН «Ангара», составила 4050 кН. Запас по устойчивости при этом составляет величину 1,06.

Расчетные оценки критических усилий для этой вафельной обечайки были получены на основе исходной конструкторской документации. Оценка, соответствующая кривой 90 % вероятности, была проведена при учете избыточного внутреннего давления в баке путем определения условий, при которых в части спектра, характеризуемой числом волн в окружном направлении, равном двум, впервые наблюдается перехлест частотных кривых. Напряженно-деформированное состояние в оболочке считалось нелинейно зависящим от параметров нагрузки.

Расчетное значение критической нагрузки для обечайки составило 4101 кН в случае шарнирного опирания ее торцов и 4153 кН – в случае их полного защемления. Расчетный запас по устойчивости при этом оценивается величиной, лежащей в интервале от 1,07 до 1,09, что практически совпадает с результатом, полученным традиционным путем.

В разделе 2.5 представлены результаты оценки вероятности потери устойчивости ортотропных цилиндрических оболочек при их равномерном осевом сжатии.

Прогнозирование положения нижней границы устойчивости равновесных состояний сжатых в осевом направлении квазиоднородных по толщине ортотропных цилиндрических оболочек выполнено на основе концепции относительной устойчивости их равновесных состояний.

Параметр сжатия k рассматривался как случайная величина. Для каждой исследуемой оболочки определялись в рамках предложенной вероятностной модели как значение математического ожидания $k_M = M(k)$ этой случайной величины, так и значение параметра λ , численно равного отношению значения критического параметра осевого сжатия оболочки, определённого на основе экспериментальных данных $k_{экс}$, к величине параметра k_M , $\lambda = k_{экс} / k_M$. Параметры λ были определены для каждой из 81-ой стеклопластиковых оболочек (Рис. 11), результаты испытаний по которым на устойчивость при осевом сжатии были опубликованы.

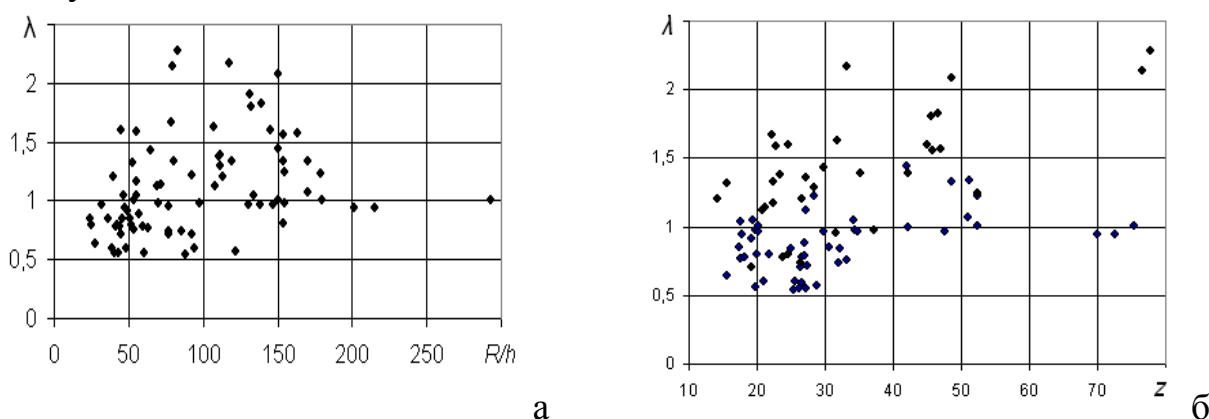


Рис. 11. Зависимость параметра $\lambda = k_{экс} / k_M$ от относительной толщины оболочки R/h (а) и от относительной длины z (б)

Согласно полученным результатам положение нижней границы области экспериментальных значений критических усилий сжатия ортотропных оболочек характеризуется величиной параметра $\lambda = 1$, если их относительная длина $z > 35$

или параметр $R/h > 150$ (Рис. 11, а), и величиною параметра $\lambda = 0,5$, если $R/h < 150$ или $z < 35$ (Рис. 11, б).

Установлено, что хорошую оценку положения нижней границы экспериментальных значений критических усилий сжатия ортотропных оболочек в диапазоне параметров $R/h < 150$ и $z < 35$ дает соответствующая локальному минимуму функции $k_n = \lambda_n(n)$ величина k_l (Рис. 12).

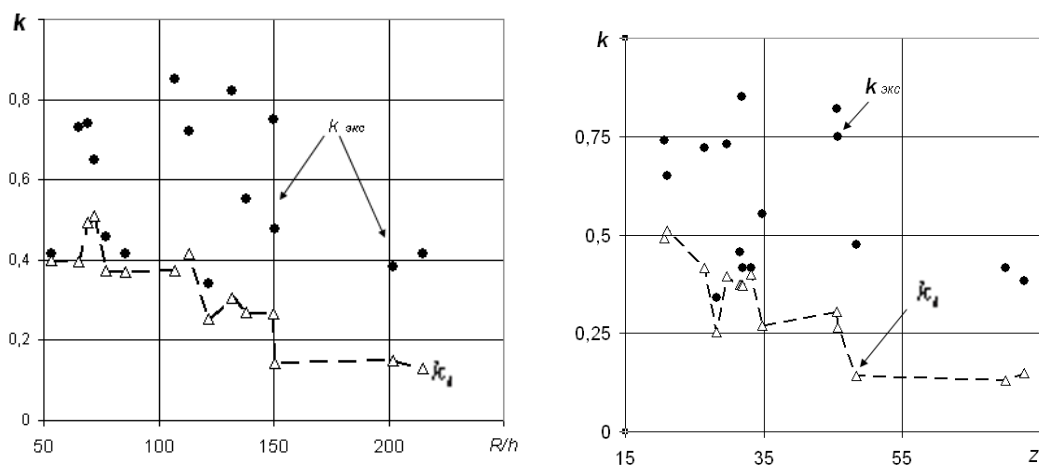


Рис. 12. Зависимость экспериментальных и расчетных коэффициентов устойчивости ортотропных оболочек ($k_{\text{экс}}$ и k_l) от их относительной толщины R/h (а) и длины z (б)

Полученные результаты показывают, что разработанный расчетно-теоретический подход применим к прогнозированию нижней границы области экспериментальных значений критических усилий сжатия ортотропных оболочек в широком диапазоне их геометрических параметров подобия.

В разделе 2.6 представлены метод определения динамических характеристик композитных слоисто-волокнистых цилиндрических оболочек и метод прогнозирования их устойчивости при осевом сжатии.

Решение задачи о колебаниях композитных слоисто-волокнистых оболочек с несимметричной укладкой слоев связано с необходимостью учета коэффициентов взаимовлияния «растяжение-кручение-изгиб» в физических соотношениях. Для таких композитных оболочек был разработан метод определения динамических характеристик, который использовался при расчетах частот и форм собственных свободных колебаний одно-, двух-, трех- и многослойных оболочек из высокомодульного графито-эпоксидного композита по гетерогенной и гомогенной моделям. Анализ полученных результатов показал, что расчет по гомогенной схеме приводит для оболочек с малым числом слоев к существенному завышению, на 28÷35 %, частот их собственных колебаний.

Расчеты по прогнозированию неустойчивости слоистых углепластиковых цилиндрических оболочек с произвольным характером расположения слоев в пакете, выполненных из углепластика КМУ-1ЛМ, проведены с учетом коэффициентов взаимовлияния «растяжение-кручение-изгиб» в физических соотношениях. Оболочки различались схемами армирования слоев, толщиной стенки, длиной и числом монослоев.

Результаты расчетов параметров осевого сжатия k_l для слоистых углепластиковых оболочек, соответствующих локальному минимуму функций $k_n = \lambda_n(n)$, в зависимости от относительной толщины оболочек R/h (Рис. 13, а) и их относительной длины z (Рис. 13. б) показали, что во всех рассмотренных случаях выполняется неравенство $k_{уст} > k_l$. Полученный результат подтвердил возможность прогнозирования несущей способности углепластиковых оболочек по исходной конструкторской документации в отсутствии информации о начальных несовершенствах.

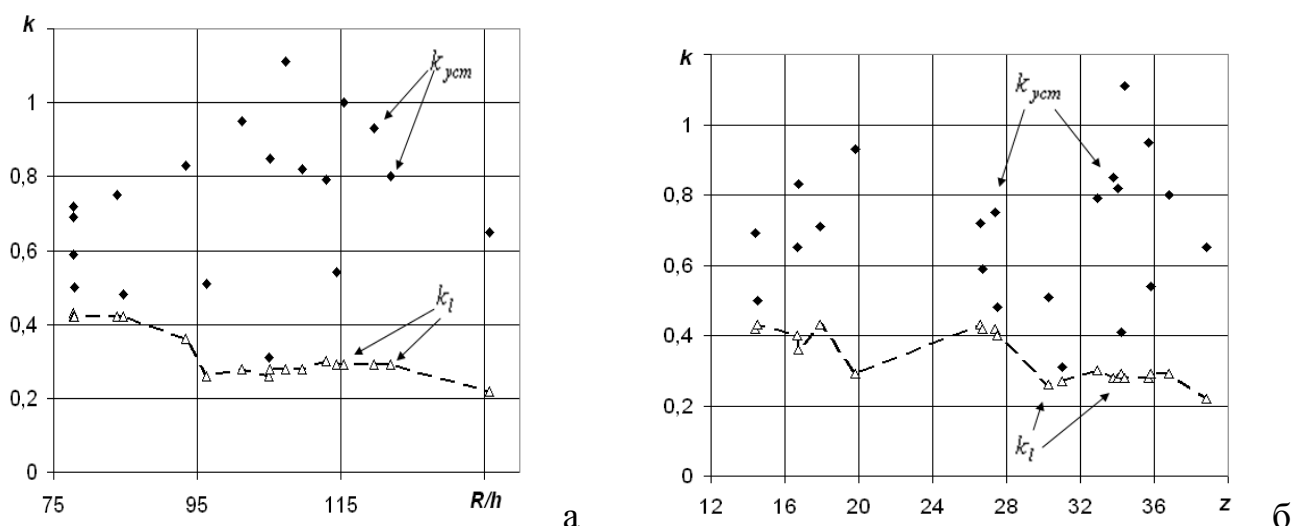
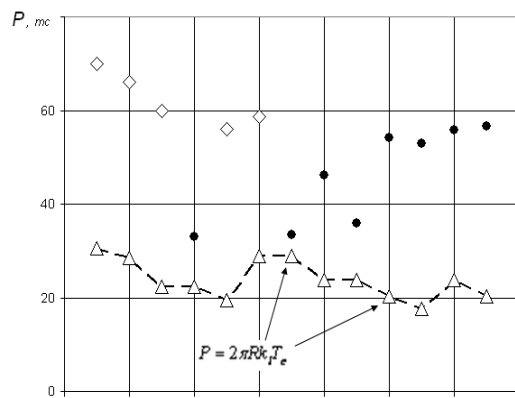


Рис. 13. Зависимость экспериментальных ($k_{уст}$) и расчетных (k_l) коэффициентов устойчивости углепластиковых оболочек от параметров относительной толщины R/h (а) и относительной длины z (б)

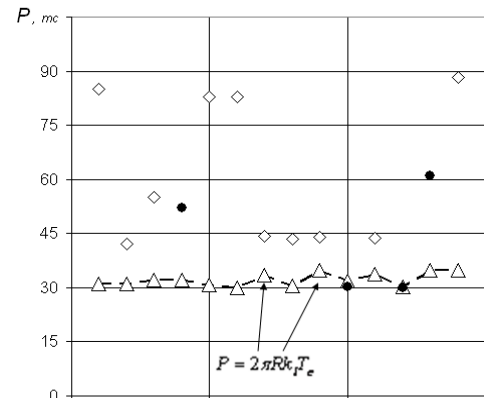
Испытания углепластиковых цилиндрических оболочек на осевое сжатие были проведены в Центре исследований прочности ФГУП ЦНИИмаш для 4-х партий оболочек, каждая из которых имела свою схему армирования. Все оболочки имели одинаковые внутренний диаметр $d=380$ мм и длину $l=570$ мм. В каждой партии присутствовали оболочки с заложенными на этапе их изготовления дефектами в виде непрочных.

Величины критических сил сжатия P , полученные в результате испытаний для оболочек без непрочных (светлые маркеры) и с непрочными (темные маркеры), представлены на Рис. 14 (а-г). Результаты расчетов критических сил $P = 2\pi R k_l T_c$, при превышении которых согласно предложенному подходу существует вероятность истощения оболочками несущей способности, показаны на этих рисунках пунктирными линиями.

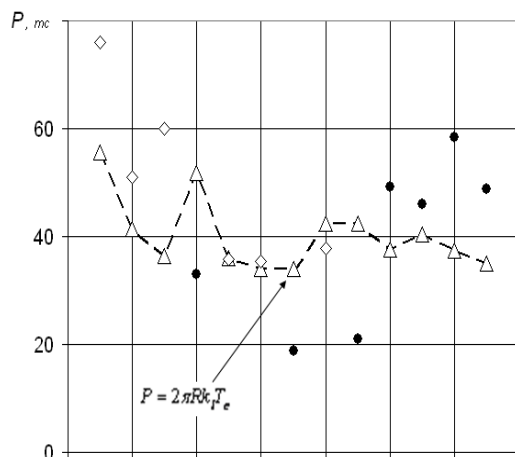
Согласно полученным результатам расчетное значение параметра осевого сжатия k_l для квазиоднородных стеклопластиковых и композитных оболочек обеспечивает оценку положения нижней границы экспериментальных значений их коэффициентов устойчивости, что предоставляет возможность инженеру при проектировании теоретически обосновывать выбор геометрических, структурных и упругих характеристик таких оболочек.



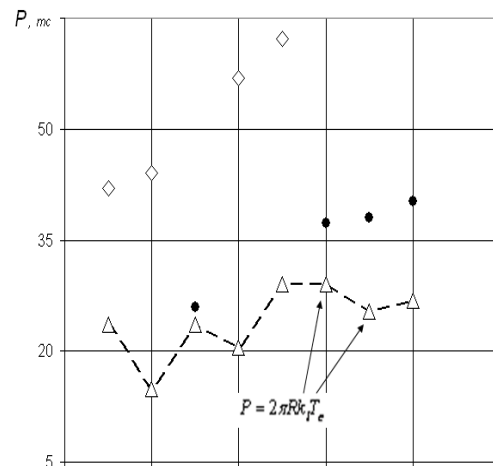
а) 90/0/90/90/0/90/90/0/90



б) 90/±30/90/±30/90/±30



в) 90/0/±45/90/0/±45



г) 90/0/±80/±15/0/90

Рис. 14. Результаты прогнозирования границ безусловной устойчивости и испытаний композитных оболочек с различными схемами армирования:

- △ — прогнозируемые значения сжимающих сил P , при превышении которых возможна потеря устойчивости;
- ◇ — экспериментальные значения сжимающих сил P оболочек без непрочеев;
- — экспериментальные значения сжимающих сил P оболочек при наличии непрочеев.

В третьей главе «Прогнозирование устойчивости оболочек вращения к силовым возмущениям» представлены результаты решения задач по прогнозированию неустойчивости равновесных состояний сферических оболочек при равномерном внешнем давлении и конических оболочек при осевом сжатии, равномерном внешнем давлении и взаимодействии с внутренним сверхзвуковым газовым потоком.

В разделе 3.1 представлены результаты прогнозирования на основе динамического критерия границы безусловной устойчивости сферических оболочек при внешнем давлении, для которых, как и для цилиндрических оболочек при осевом сжатии, существуют не только весьма существенные количественные, но и качественные расхождения.

Подход, основанный на использовании линеаризованных в окрестности положения равновесия уравнений движения и динамического критерия устойчивости позволил в данной задаче определить границу безусловной устойчивости сферических оболочек, которая обеспечивает надёжную оценку положения нижней границы экспериментальных значений критических усилий внешнего давления в широком диапазоне параметров R/h (Рис. 15, а) и $\mu = \sqrt[4]{12(1-\nu^2)} \sqrt{R/h} \sin \alpha_l$ (Рис. 15, б). Полученные расчетным путем границы безусловной устойчивости $\lambda(R/h, \mu)$ сферических оболочек при равномерном внешнем давлении показаны на рисунках пунктирными линиями.

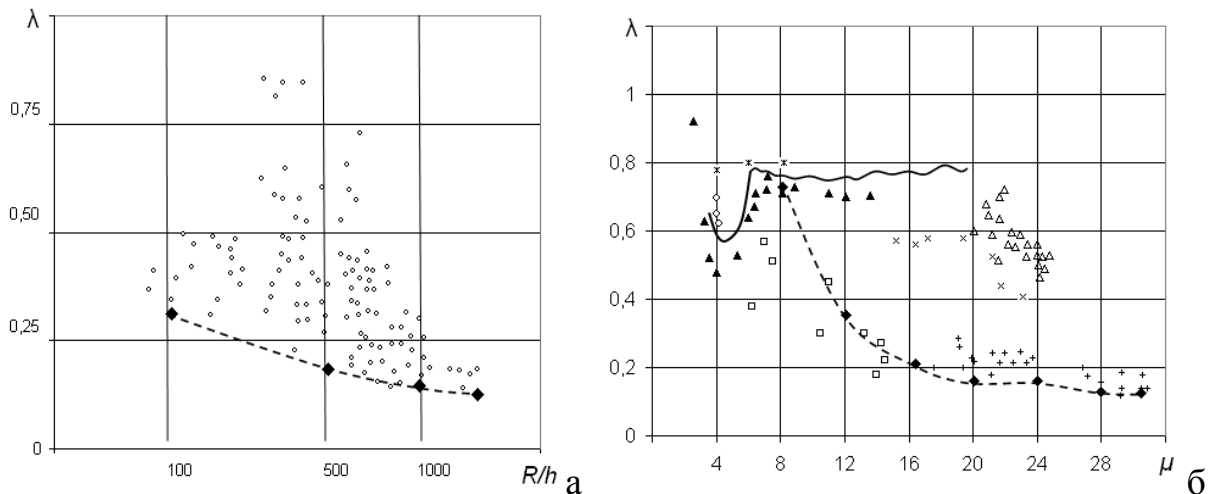


Рис. 15. Экспериментальные значения критических параметров сферических оболочек при равномерном внешнем давлении и зависимость границ безусловной устойчивости оболочек от их относительных толщин R/h (а) и параметра μ (б)

Полученные результаты вычислений величин давлений, соответствующих этой границе и понимаемых как необходимые условия неустойчивости рассматриваемых оболочек, качественно и количественно близки к нижней границе их экспериментально определённых критических значений.

Для сферических оболочек с параметрами $\mu < 8$ появление кратных отличных от нуля собственных частот не было выявлено. Критическое внешнее давление для таких оболочек может быть найдено по классической формуле Цолли.

В разделе 3.2 представлены результаты определения для сжатых в осевом направлении конических оболочек значений коэффициентов безусловной устойчивости k_0 , при превышении которых существует вероятность проявления колебательной неустойчивости. Верхняя критическая сила сжатия определялась при этом из условия первого появления в спектре конических оболочек частоты, равной нулю. Расчетами установлено, что во всех рассмотренных случаях расчетные значения коэффициентов k_0 меньше соответствующих им экспериментальных значений коэффициентов устойчивости $k_{уст} = P_{экс} / (2\pi E h^2 \cos^2 \alpha)$ (Рис. 16).

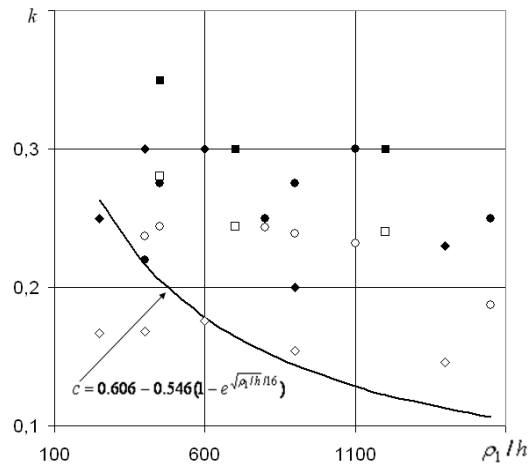


Рис. 16. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов устойчивости сжатых конических оболочек:

$\alpha = 10^\circ$ \diamond - расчет; \blacklozenge - эксперимент;
 $\alpha = 30^\circ$ \circ - расчет; \bullet - эксперимент;
 $\alpha = 45^\circ$ \square - расчет; \blacksquare - эксперимент.

Согласно полученным результатам при значениях параметра $k < k_0$ оболочкам гарантирована устойчивость, т.к. в этом случае невозможны ни колебательная, ни бифуркационная их неустойчивость.

В разделе 3.3 представлены результаты прогнозирования положения нижней границы области экспериментальных значений критических нагрузок конических оболочек при внешнем давлении.

Величина критического равномерного внешнего давления q при расчетах на устойчивость конических оболочек может быть оценена с использованием приближенной формулы Сейда для свободно опертой оболочки $q = k_q q_B = f(r_k) q_B$.

Здесь $r_k = 1 - r_0 / r_2$, r_0 , r_2 - радиусы торцевых сечений конической оболочки,

$$f(r_k) = 1 + 0.6r_k^3 \text{ при } r_k < 0.6, \quad q_B = \frac{0.92ER_c}{L(R_c/h)^{5/2}}, \quad R_c = \frac{r_0 + r_2}{2 \cos \alpha},$$

L - длина образующей оболочки, α - угол конусности при торце радиуса r_0 .

Отмечено, что при значениях параметра равномерного внешнего давления $k \in [0, k_q]$ существует ряд значений $k = k_{ij}^{(n)}$, при которых имеет место равенство парциальных частот с одинаковым числом волн в окружном направлении. В окрестности этих параметров существует вероятность возникновения колебательной неустойчивости, способной вызвать скачок оболочки к новому равновесному состоянию.

Условие непревышения параметром k значения k_0 , наименьшего из всех $k_{ij}^{(n)}$, является необходимым условием устойчивости оболочки к воздействию любых силовых возмущений, зависящих явным образом от времени.

В работе представлены результаты определения значений параметров внешнего давления k_0 и k_q конических оболочек с углами конусности $\alpha = 10^\circ$ и

$\alpha = 30^\circ$ при значениях $r_0/h = 100, 200, 400, 800$ в зависимости от параметра $z = L\sqrt{1-\nu^2} / \sqrt{R_c h}$ и $r_k = 0,4$ (Рис. 17).

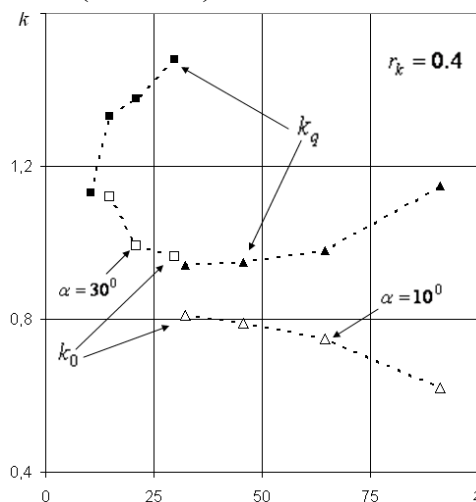


Рис. 17. Расчетные значения параметров относительного внешнего давления k_0 и k_q конических оболочек

В рассмотренных вариантах минимальное значение величины k_0 составило 0,62 при угле конусности $\alpha = 10^\circ$, а максимальное расчетное значение k_q составило величину 1,48 при $\alpha = 30^\circ$. Полученные результаты находятся в соответствии с экспериментальными данными, значения которых составляют от 60 % до 140 % от расчетных по формуле Сейда.

В разделе 3.4 приведены результаты разработки методического и программного обеспечения расчётов для определения условий возникновения флаттера сопловых насадков высотных ракетных двигателей.

Случаев отказа сопловых насадков высотных ракетных двигателей, обусловленных флаттером истекающего сверхзвукового газового потока, достаточно мало. Они были зафиксированы в ходе лётных испытаний, как в нашей стране, так и за рубежом, в середине восьмидесятых годов.

В силу того, что тонкостенные сопловые насадки не могут быть полностью экспериментально отработаны в ходе наземных испытаний, существует необходимость математического моделирования условий их функционирования и работоспособности. От математической модели неохлаждаемых насадков требуется наиболее полное и детальное описание их конструктивных особенностей, таких, как использование слоистых композиционных материалов и возможность усиления конструкции в ряде сечений упругими кольцами.

В работе представлен алгоритм численного анализа по определению условий возникновения повышенных вибраций в системе «сопловой насадок – газовый поток», основанный на исследовании зависимости частот собственных колебаний рассматриваемой механической системы от параметров газового потока. Собственные частоты аэроупругих колебаний рассматриваются как функции давления p_0 полностью заторможенного газа, которому соответствует давление в камере сгорания ракетного двигателя. При достижении потоком критических параметров в спектре исследуемой системы впервые появляется пара кратных

частот, отвечающих слиянию двух смежных мод колебаний. Достоверность результатов, полученных на основе использования разработанного программного комплекса *FLUTTER*, подтверждена сравнением с существующими расчетными и экспериментальными данными.

В разделе 3.5 приведены результаты прогнозирования условий возникновения флаттера насадков высотных ракетных двигателей из композитных материалов.

При исследовании условий возникновения флаттера конического насадка, выполненного из высокомодульного графито-эпоксидного композита с укладкой слоев по схеме $\pm\varphi$ к образующей оболочки, считалось, что как угол укладки слоев φ , так и толщина оболочки h , линейно меняются вдоль образующей.

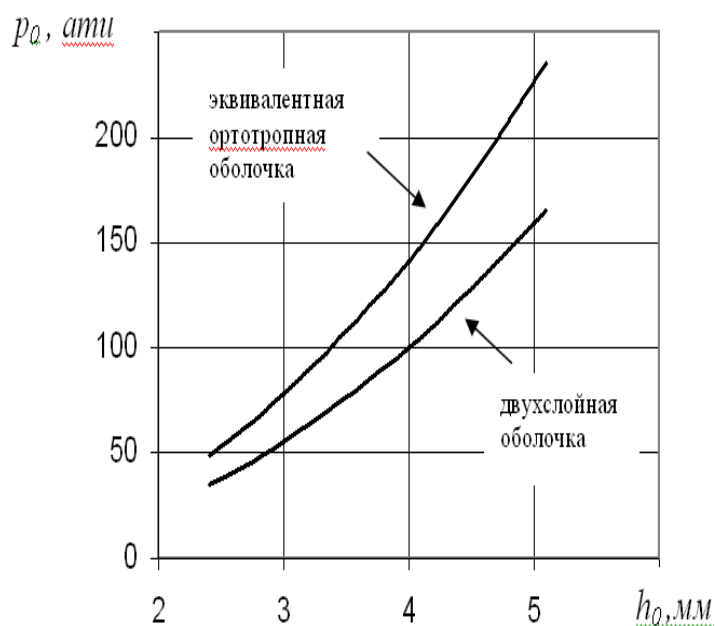


Рис. 18. Зависимость величины критического давления p_0 в камере сгорания от толщины торца насадка h_0

Величина критического давления p_0 полностью заторможенного потока определялась в зависимости от толщины торца h_0 меньшего диаметра конической оболочки. При расчётах использовались модели двухслойной и эквивалентной ортотропной оболочек. Полученные результаты показали, что расчёт с использованием модели ортотропной оболочки при малом числе слоёв может приводить к существенному завышению критических значений сверхзвукового газового потока (Рис. 18).

В разделе 3.6 представлены результаты расчетов по анализу условий возникновения флаттера изотропного конического насадка, усиленного в одном из сечений упругим кольцом – шпангоутом. Были рассмотрены два варианта установки кольца:

- 1 – кольцо расположено на срезе насадка ($x=L$);
- 2 – кольцо расположено в зоне локального максимума второй моды собственной формы колебаний оболочки ($x=0,4L$).

Зависимость величины отношения $\lambda = p_a^* / p_c^*$, где p_c^* – величина критического давления торможения для насадка без кольца, от величины относительной ширины кольца $z = a/h$ показана на Рис. 19.

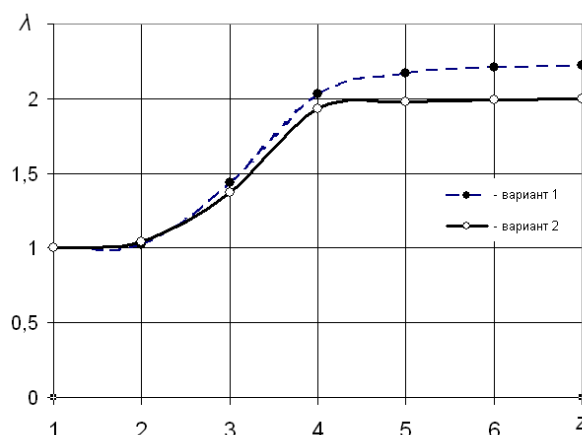


Рис. 19. Влияние относительной ширины кольца $z = a/h$ на величину параметра критического давления λ при истечении сверхзвукового газового потока

В результате была установлена критическая величина жесткости кольца, превышение которой не способствуют повышению величины параметра динамической устойчивости соплового насадка, а также даны рекомендации по выбору места установки такого кольца, оптимального по весу для системы кольцо - насадок.

В заключении подведены итоги работы и ее основные результаты.

3. Основные результаты и выводы

1 Дана новая постановка задач устойчивости равновесных состояний тонких упругих оболочек вращения при квазистатических нагрузках, предусматривающая определение устойчивости оболочек к малым силовым возмущениям.

2 Исследован характер возмущенного движения поверхности оболочки в окрестности ее равновесного состояния и определены условия, необходимые для возникновения колебательной неустойчивости тонких упругих оболочек вращения при осесимметричном нагружении.

3 Дано теоретическое обоснование существования зон относительной устойчивости равновесных состояний осесимметрично нагруженных упругих оболочек вращения к силовым возмущающим факторам и предложен метод оценки вероятности потери ими устойчивости в этих зонах.

4 Разработана методика, предназначенная для определения необходимых условий неустойчивости упругих оболочек вращения, нагруженных стационарными консервативными силами, не требующая при ее применении информации о формах и амплитудах начальных неправильностей поверхности оболочек.

5 Дано аналитическое решение задач определения границ безусловной устойчивости изотропных цилиндрических оболочек к силовым возмущениям при осевом сжатии и комбинированном нагружении внешним давлением и осевым

сжатием. Установлена зависимость этих границ от их длины и граничных условий.

6 Установлено, что разработанное методическое и программное обеспечение дает надежную оценку положения нижних границ экспериментальных значений критических параметров цилиндрических, конических и сферических оболочек при осесимметричных квазистатических нагрузках в широком диапазоне их безразмерных параметров подобия.

7 Созданы и прошли государственную регистрацию вычислительные программы прогнозирования неразрушающих сил сжатия ортотропных, вафельных и композитных цилиндрических оболочек, предназначенные для оценки их несущей способности и теоретического обоснования выбора коэффициентов статической устойчивости на основе проектной конструкторской документации при отсутствии необходимых статистических экспериментальных данных.

8 Разработаны математическая модель, метод численного анализа и программное обеспечение по определению условий возникновения повышенных вибраций сопловых блоков высотных ракетных двигателей, выполненных из композиционных материалов и усиленных бандажными кольцами. Достоверность полученных результатов подтверждена численными исследованиями насадков, у которых флаттер был зафиксирован в ходе летных испытаний.

9 Выполнены исследования по влиянию учета наличия бандажных подкреплений и анизотропии материалов слоистых оболочек на условия возникновения флаттера сопловых насадков РД.

10 Разработанное методическое и программное обеспечение документировано и готово к использованию на этапах эскизного и рабочего проектирования при определении границ безусловной устойчивости равновесных состояний оболочечных элементов конструкций и динамической устойчивости сопловых блоков высотных РД.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Колосов Г.И., Малинин А.А. Анализ условий возникновения флаттера сопловых насадков ракетных двигателей // Космонавтика и ракетостроение. 1999. № 16. С. 93-96. (0,125 п л / 0,09 п л)
2. Колосов Г.И. Флаттер составных оболочечных конструкций из композиционных материалов // Известия АН. Механика твердого тела. 2001. №3. С. 187-188. (0,06 п л)
3. Колосов Г.И. Численное исследование динамических характеристик слоисто-волокнутистых оболочек вращения // Известия АН. Механика твердого тела. 2001. №6. С. 156-162. (0,22 п л)
4. Колосов Г.И. Влияние возмущений, вызывающих колебания сжатой в осевом направлении замкнутой круговой цилиндрической оболочки как балки, на ее устойчивость // Космонавтика и ракетостроение. 2004. № 2(35). С. 122-124. (0,09 п л)

5. Колосов Г.И. Определение границы зоны абсолютной устойчивости сжатой в осевом направлении замкнутой круговой цилиндрической оболочки // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 1(38). С. 114-118. (0,15 п л)
6. Колосов Г.И. Вероятность потери устойчивости замкнутой круговой цилиндрической оболочки при равномерном осевом сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 2(39). С. 83-87. (0,15 п л)
7. Колосов Г.И. Устойчивость равновесных состояний сжатой в осевом направлении замкнутой круговой цилиндрической оболочки к малым возмущениям // Известия РАН. Механика твердого тела. 2006. №2. С.77-83. (0,22 п л)
8. Колосов Г.И. Устойчивость равновесных состояний замкнутой круговой цилиндрической оболочки к малым возмущениям при равномерном внешнем боковом давлении и осевом сжатии // Известия РАН. Механика твердого тела. 2006. №6. С. 182. (0,03 п л)
9. Колосов Г.И. Абсолютная и относительная устойчивость равновесных состояний замкнутой круговой цилиндрической оболочки при комбинированном ее нагружении равномерным боковым давлением и осевым сжатием // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 4(45). С. 57-63. (0,22 п л)
10. Колосов Г.И. Влияние параметра относительной длины цилиндрической оболочки на степень устойчивости ее равновесных состояний к малым возмущениям при равномерном осевом сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 1(46). С. 94-98. (0,22 п л)
11. Колосов Г.И. Устойчивость замкнутой круговой цилиндрической оболочки при внешнем боковом и гидростатическом давлениях // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 2(47). С. 61-65. (0,22 п л)
12. Колосов Г.И. Нижняя граница области относительной устойчивости защемлённой по торцам цилиндрической оболочки при равномерном осевом её сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 4(53). С. 67-70. (0,12 п л)
13. Колосов Г.И. Прогнозирование положения нижней границы области устойчивости цилиндрических оболочек из стеклопластика при равномерном осевом их сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 3(60). С. 61- 66. (0,19 п л)
14. Колосов Г.И. Определение условий возникновения флаттера слоисто-волоконистых сопловых насадков высотных ракетных двигателей // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 1(66). С. 76-81. (0,19 п л)
15. Колосов Г.И. Колебательная и вековая неустойчивость равновесных состояний цилиндрических оболочек при осевом их сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2 (67). С.145-150. (0,19 п л)
16. Колосов Г.И. Необходимые условия неустойчивости сферических оболочек при внешнем давлении // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 3. С. 90-96. (0,22 п л)
17. Колосов Г.И. Прогнозирование неустойчивости равновесных состояний сжатых композитных цилиндрических оболочек к силовым возмущениям // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 41-47. (0,22 п л)

18. Колосов Г.И. Колебательная неустойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 3. С. 75-80. (0,19 п л)
19. Колосов Г.И. Прогнозирование устойчивости равновесных состояний сжатых конических оболочек к силовым возмущениям // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 3(88). С. 47-53. (0,22 п л)
20. Колосов Г.И., Королев М.С. Определение условий возникновения флаттера оболочек, взаимодействующих с внутренним сверхзвуковым газовым потоком. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2001617341, 2011 г. (0,03/0,02 п л)
21. Колосов Г.И., Королев М.С. Прогнозирование несущей способности композитных цилиндрических оболочек при осевом сжатии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616856, 2015 г. (0,03/0,02 п л).
22. Колосов Г.И. Зона абсолютной устойчивости замкнутой круговой цилиндрической оболочки при комбинированном нагружении равномерным боковым давлением и осевым сжатием // Тез. докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород: 2006. Т. III, С. 115. (0,03 п л).
23. Колосов Г.И. Особенности прогнозирования положения нижней границы области экспериментальных значений критических нагрузок цилиндрических оболочек из стеклопластика при равномерном осевом сжатии на основе концепции относительной устойчивости их равновесных состояний // Материалы XVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец. 2010. Т. 2. С. 177- 182. (0,19 п л).
24. Колосов Г.И. Оценка положения нижней границы области экспериментальных значений критических нагрузок сферических оболочек при равномерном внешнем давлении // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец. 2011. Т. 2. С. 118-120. (0,09 п л).
25. Колосов Г.И. Необходимые условия неустойчивости изотропных цилиндрических оболочек при осевом сжатии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4 (4). С. 1529-1530. (0,06 п л).
26. Колосов Г.И. Численное исследование флаттера сопловых насадков высотных ракетных двигателей // Механика и процессы управления. Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. М.: РАН. 2011. Том 1. С. 160-166. (0,22 п л).
27. Колосов Г.И. Типы неустойчивости равновесных состояний цилиндрических оболочек при осевом сжатии // Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец. 2012. Т. 2. С. 125-129. (0,15 п л).
28. Колосов Г.И. Прогнозирование неустойчивости равновесных состояний сжатых композитных цилиндрических оболочек к силовым возмущениям // Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и

- технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2015. Т.2. С. 159-164. (0,19 п л).
29. Колосов Г.И. Устойчивость сжатой в осевом направлении замкнутой круговой цилиндрической оболочки к возмущениям, вызывающим овализацию сечений // Технология и оборудование для переработки древесины. Научные труды. 2004. Вып. 326. С. 260-262. (0,09 п л)
30. Колосов Г.И. Степень устойчивости замкнутой круговой цилиндрической оболочки к малым возмущениям при равномерном осевом сжатии // Ракетно-космическая техника. Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Материалы Международной научной конференции, посвященной 90-летию В.И. Феодосьева. Москва. 2006. С. 114. (0,03 п л).
31. Колосов Г.И. Влияние параметра относительной длины на величину зоны абсолютной устойчивости сжатых в осевом направлении цилиндрических оболочек // Материалы XIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Москва. 2008. Т.2. С. 16. (0,03 п л).
32. Колосов Г.И., Королев М.С. Определение границы абсолютной устойчивости конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек при осевом сжатии – ASD_V // Справ.-инф. бюлл. ФАП РКТ. 2015. Вып. 87. С. 12. (0,03/0,02 п л).