М261784

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М о с к о в с к о е

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

ФАБИШЕВСКИЙ Константин Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В СОЧЛЕНЕННЫХ ШАНГОУТОМ ОБОЛОЧКАХ ВРАЩЕНИЯ

Специальность 01.02.06 - Динамика, прочность и надежность машин, приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 1975

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор АЛЕКСЕЕВ С.А.

Официальные оппоненты
Д.Т.Н., профессор Антоненков О.Д.,
К.Т.Н. Малышев А.П.

Ведущее предприятие ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского

Автореферат разослан " " _____ 1975г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975г.
в " " час мин. на заседании специализированного [redacted] Совета по Динамике и прочности машин по адресу: Москва Б-5, 2-я Бауманс[illegible]

Ва[illegible]х, заверен-
ные п[illegible] адресу.

[illegible]ке училища.

[illegible]ЖАЛОСТИН А.А.

М261784

Зак. [illegible]-29938
Моск[illegible] 31/I-1975г.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1261784
Фабижевский К.В. Исследов

Актуальность темы. При эксплуатации летательных аппаратов имеют место быстропротекающие процессы, сопровождающиеся распространением упругих продольных волн в конструкции. Неучет указанных волновых процессов может привести к недопустимым перегрузкам приборных устройств систем управления, стабилизации и других систем, а также к разрушению конструкции из-за интерференции волн при отражении от элементов поперечного силового набора и узлов сопряжения оболочек.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование переходных волновых процессов в конструкции сочлененных шпангоутом оболочек вращения при действии продольной силы.

Общая методика. При достаточно плавном изменении нагрузки приближенные теории оболочек дают практически точные результаты, если изучается распространение продольных волн деформации. Переходные процессы, исследуемые в диссертации, рассмотрены в линейной постановке при условии гипотез Кирхгоффа-Лява.

№261784

Распространение продольных волн в цилиндрической оболочке, сопряженной шпангоутом с оболочкой вращения, в первом приближении исследовалось на модели составного стержня с промежуточной сосредоточенной массой. Ряд особенностей переходного процесса деформации сферической оболочки рассмотрены на одномерной модели круглой пластинки.

Для решения одномерных задач, рассмотренных в первой главе диссертации, использовался операционный метод. При этом перевод в пространство изображений функций, зависящих от временной переменной, осуществлялось с помощью интегрального преобразования Лапласа.

Уравнения движения сопряженных шпангоутом цилиндрической и сферической оболочек интегрировались на ЭЦВМ БЭСМ-6 по алгоритму метода прямых (конечно-разностная аппроксимация по координате и интегрирование методом Рунге-Кутта по времени).

Экспериментальные исследования продольного удара подкрепленной шпангоутом цилиндрической оболочки проводились с использованием современной электронной аппаратуры. Измерение отдельных параметров переходного процесса при продольном ударе оболочки о неподвижную преграду осуществлялось с помощью тензометрических датчиков и датчиков ускорения (акселерометров).

Научная новизна. Впервые исследуются волновые процессы в сочленённых шпангоутом оболочках вращения. Получены соотношения для амплитуд продольных волн, а также значения интегралов по времени от продольных усилий в фиксированных сечениях цилиндрической оболочки (импульсы продольных волн). Установлена связь между продольными усилиями в зоне контакта шпангоута и цилиндрической оболочки при прохождении продольной волны.

Показано, что в полюсе изотропной сферической оболочки и оболочки, имеющей жесткость в окружном направлении более чем в два раза превосходящую жесткость в меридиональном, выполняется условие равенства нулю второй производной по координате от меридионального перемещения. Установлено, что при фокусировании волны растяжения-сжатия максимальное значение усилий в полюсе сферической оболочки зависит от соотношения жесткостей в окружном и меридиональном направлении, а также от вида функции, определяющей зависимость по времени нагрузки, приложенной к контуру оболочки. С помощью реализованного на ЭЦВМ алгоритма метода прямых проведено исследование влияния некоторых параметров конструкции сопряженных оболочек на характер трансформации продольной волны в цилиндрической оболочке. Для одномерной модели конструкции в виде составного стержня с промежуточной сосредоточенной массой получено простое решение, описывающее распространение продольной волны. При сопоставлении этого решения с расчётом на ЭЦВМ показано, что одномерная модель конструкции позволяет исследовать начальный этап трансформации продольных волн в цилиндрической оболочке. Для цилиндрической оболочки, подкрепленной шпангоутом, указанная модель приемлема без ограничения на время переходного процесса.

Практическое значение. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании конструкций, а также при оценке перегрузок элементов различных устройств, имеющих упругую или жесткую связь с корпусом летательного аппарата.

Апробация работы. Работа была обсуждена и одобрена на конференции аспирантов и заседании кафедры, руководимой д.т.н.,профессором В.И.Феодосьевым. Основные результаты диссертационной работы были доложены в институте Проблем механики АН СССР на семинаре по механике оболочек и пластин, руководимым проф.С.А.Алексеевым, проф.А.Л.Гольденвейзером, проф.В.И.Феодосьевым.

Публикация. По результатам исследований опубликовано 2 статьи.

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения (180 стр. машинописного текста, 46 рис.), библиографии (158 наименования) и приложения (88 стр., 4 рис.)

Содержание работы

Во введении дается обзор литературы и постановка задачи.

Распространение продольных волн при соударении стержней впервые рассмотрены Сен-Венаном и Буссинеском. Дальнейшему прогрессу в изучении волновых процессов в элементах конструкций способствовали работы Похгаммера, Рэлея, Лява. В XX веке быстрое развитие промышленности и возникшие при этом практические задачи обусловили дальнейшее развитие динамики упругих тел. Большой вклад в данную область науки сделали А.Н.Крылов, А.И.Мандельштамм, С.П.Тимошенко, П.Ф.Папкович, Ю.А.Шиманский, И.М.Рабинович, С.А.Бернштейн, В.Флюгге, Г.Кольский и др.

В настоящее время особую актуальность приобрели задачи о воздействии быстроизменяющихся, ударных нагрузок. Не в последнюю очередь это вызвано бурным развитием таких отраслей промышленности, как строительство летательных аппаратов. Появление ЭЦВМ и совершенствование математических методов подготовили базу для решения широкого круга подобных задач, а успехи в области измерительной аппарательной аппаратуры расширили возможности экспериментальных исследований. Различным аспектам динамики элементов конструкций посвящены работы Л.Я.Айнолы, Н.А.Алумяэ, В.В.Болотина, В.Л.Бидермана, А.С.Вольмира, В.Гольдсмитта, Э.И.Григолюка, Н.А.Кильчевского, А.И.Лурье, У.К.Нигула, В.В.Новожилова, П.М.Огибалова, Я.Г.Пановко, Г.И.Петрашеня, Х.А.Рахматулина, Л.И.Слепяна, Г.С.Шапиро и многих других советских и иностранных ученых.

Проведенный анализ исследований, посвященных распространению волн растяжения-сжатия в составных конструкциях, а также сферических оболочках и круглых пластинках, позволил сделать следующие заключения.

Динамика составных оболочечных конструкций начала разрабатываться лишь в последние годы, причем в основном изучаются стационарные колебания. Большинство работ посвящено исследованию упрощенных моделей конструкций в виде составных стержней с сосредоточенными массами. Нет полной ясности в вопросе об отражении волн растяжения-сжатия от полюса изотропной оболочки вращения. Случай же ортотропной сферической оболочки вообще не рассмотрен.

Экспериментальные исследования трансформации продольных волн в цилиндрической оболочке, подкрепленной шпангоутом, также не нашли освещения в литературе.

Первая глава посвящена изучению трансформации волн растяжения сжатия в сочлененных оболочках на базе одномерных моделей.

В первом параграфе исследуется распространение продольных волн в полубесконечной цилиндрической оболочке, подкрепленной на расстоянии ℓ (II сечение) от торца (I сечение) абсолютно жестким шпангоутом.

Оболочка предварительно растянута между сечениями I и II усилиями $T_0^I = T_0^{II}$, затем усилие T_0^I снимается и одновременно к торцу прикладывается осевая сжимающая нагрузка $T_x(t)$. Параметры оболочки (толщина и физико-механические свойства) справа и слева от сечения II различны.

В качестве одномерной модели конструкции рассматривается составной стержень с промежуточной сосредоточенной массой.

Решение задачи получено с учётом многократного отражения волны от свободного торца и представлено в рядах в довольно громоздкой форме. В связи с этим в §§ 2,3 исследуется распространение только первой волны, т.е. без учёта отраженных от торца повторных волн.

Во втором параграфе на основе одномерной модели полубесконечных стержней с промежуточной сосредоточенной массой рассмотрена трансформация продольной волны в цилиндрической оболочке, подкрепленной шпангоутом. За начальный момент $\tau = 0$ принимается время, когда волна деформации достигает шпангоута, т.е. $\tau = t_0 - \ell/a_1 = 0$. Здесь: $a_1 = \sqrt{E_1/\rho_1}$ - скорость распространения продольной волны в первом стержне, E_1, ρ_1 - модуль упругости и плотность материала стержня. Граничное же условие на торце первого стержня преобразуется в начальное условие при $\tau = 0$. Это позволило получить решение в достаточно простой форме. В частности, если $T_0 \equiv 0$, $T_x(t)$ изменяется во времени по произвольному закону ($T_x(t) = E_1 h_1 \varepsilon(t)$)

$$\varepsilon_1(\tau, x_1) = -\left[\varepsilon(\tau_1) + \frac{a_2}{a_1}\varepsilon_2(\tau_1)\right]\delta_x(\tau_1) - \varepsilon(\tau + x_1/a_1),$$

$$\varepsilon_2(\tau, x_2) = -\frac{2a_1}{(1+\beta_1)a_2}\left\{\int_0^{\tau}\left[1 - \exp\left(\frac{1+\beta_1}{2\varkappa}(\tau - y)\right)\right]\frac{d\varepsilon(y)}{dy}dy\right\}\delta_x(\tau_2) \qquad (I)$$

Здесь:

$\tau_1 = \tau - x_1/a_1$, $\tau_2 = \tau - x_2/a_2$, $\varkappa = a_1 F_ш \rho_ш / 2E_1 h_1$,

$\beta_1 = \frac{h_2}{h_1}\sqrt{\frac{E_2\rho_2}{E_1\rho_1}}$, $a_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}$,

$\delta_x(\tau)$ – функция Хевисайда,

h_i, E_i, ρ_i – толщина, модуль упругости и плотность материала цилиндрической оболочки справа ($i = 1$) и слева ($i = 2$) от шпангоута,

ε_i – продольные деформации стержней- оболочек ($T_{x\,i} = 2\pi R h_i E_i \varepsilon_i$), начало координат $x_1 = x_2 = 0$ совпадает с местом сочленения оболочек (стержней) и шпангоута.

В диссертации приведено также решение для конкретного вида продольных нагрузок:

1) $\varepsilon(t) \equiv 0$, $T_0 = E_1 h_1 \varepsilon_0 \neq 0$; 2) $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon(t) = \delta_x(t)$;
3) $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon(t) = c_1 t \exp(-c_2 t)$; 4) $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon(t) = c_3 t^2 \exp(-c_2 t)$; 5) $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon(t) = \sin \omega t$

Из соотношений (I) имеет место зависимость:

$$\varepsilon_{10}(\tau) + \frac{a_2}{a_1}\varepsilon_{20}(\tau) = -2\varepsilon(\tau), \qquad (2)$$

где $\varepsilon_{i0}(\tau) = \varepsilon_i(\tau, x_i)\big|_{x_i = 0}$, т.е. сумма продольных деформаций цилиндрических оболочек (стержней) в месте контакта со шпангоутом не зависит от параметров конструкции (h_1/h_2 , $F_ш$), а является функцией нагрузки $T_x(t)/E_1 h_1 = \varepsilon(t)$ и отношения скоростей звука в оболочках a_2/a_1 . С использованием соотношения (2) в диссертации проводится качественный анализ интерференции продольных волн в окрестности сопряжения оболочек и шпангоута. Рассмотрен случай, когда нагрузка $T_x(t)$ мгновенно меняет полярность. При этом деформация ε_{10} по абсолютной величине может в три раза превышать амплитуду деформации $\varepsilon = T_x^{max} / E_1 h_1$. Указанный неожиданный результат достаточно подробно обосновывается.

Для продольной нагрузки, изменяющейся во времени по закону синуса ($\varepsilon(t) = \sin \omega t$), показано, что амплитуда проходящей волны определяется по соотношению

$$|\varepsilon_2|_{max} = \frac{K}{1+\beta_1} \frac{2\bar{\beta}}{\sqrt{\bar{\omega}^2 + \bar{\beta}^2}} \qquad (3)$$

здесь: $\bar{\beta} = (1+\beta_1)\rho_1 h_1 R / \rho_ш F_ш$, $\bar{\omega} = \omega R / a_1$, причем коэффициент K для первой полуволны монотонно возрастает от $K = 1$ при $\bar{\omega}/\bar{\beta} \to 0$ до $K=2$ при $\bar{\omega}/\bar{\beta} \to \infty$, для последующих же нечетных полуволн ($n = 3, 5, 7, \ldots$) $K|_{n\to\infty} \to 1$ и не зависит от $\bar{\omega}$, т.е. для больших $\bar{\omega}/\bar{\beta}$ имеет место тенденция к смещению первых полуволн проходящей волны $\varepsilon_2(\tau_2)$ при неизменной величине разности максимального и минимального значений деформации нечетной и четной полуволн.

Представляя функцию $T_x(t)$ в виде

$$T_x(t)/E_1 h_1 = \varepsilon(t) = \lim_{n\to\infty} \sum_{K=0}^{n} \left[\delta_x\left(t - K\frac{\tau_n}{n}\right) - \delta_x\left(t - (K+1)\frac{\tau_n}{n}\right)\right]\varepsilon_K,$$

где τ_n - время действия продольной нагрузки $T_x(t)$ $(\tau_n \neq \infty)$, с использованием соотношений (I) при $\varepsilon(t) = \delta_x(t)$ получены следующие зависимости между импульсами $\left(J_i^{(\varepsilon)} = \int_0^\infty \varepsilon_i(\tau, x_i)|_{x_i=const} d\tau\right)$ проходящей "2" отраженной "I2" и набегающей "I" волн

$$J_2^{(\varepsilon)}/J_1^{(\varepsilon)} = \frac{2}{1+\beta_1}\frac{a_1}{a_2} = \frac{2h_1\sqrt{E_1\rho_1}}{h_1\sqrt{E_1\rho_1} + h_2\sqrt{E_2\rho_2}}\sqrt{\frac{E_1\rho_2}{E_2\rho_1}},$$

$$J_{12}^{(\varepsilon)}/J_1^{(\varepsilon)} = \frac{\beta_1 - 1}{\beta_1 + 1} = \frac{h_2\sqrt{E_2\rho_2} - h_1\sqrt{E_1\rho_1}}{h_1\sqrt{E_1\rho_1} + h_2\sqrt{E_2\rho_2}} \qquad (4)$$

Соотношения (4) для импульсов продольных волн в составном стержне (оболочке) с промежуточной сосредоточенной массой оказываются аналогичными известным соотношениям, впервые полученными Релеем, для амплитуд волн в составном стержне без массы. Следует подчеркнуть, что отношения импульсов проходящей и отраженной волн к импульсу набегающей не зависят от инерционности шпангоута ($m_ш = 2\pi R F_ш \rho_ш$).

Проведенный анализ позволил описать также процесс трансформации продольных волн с учётом их повторного отражения от свободного торца (сечение I) оболочки-стержня.

Результаты этого параграфа могут быть получены как следствия из решения, приведенного в работе [2].

В третьем параграфе исследуется распространение продольной волны в цилиндрической оболочке, сочлененной шпангоутом с оболочкой вращения. Показано, что в первом приближении соотношения для волн деформации в цилиндрической оболочке могут быть выражены по уже полученным в § 2 зависимостям только вместо параметра β_1, необходимо подставить

$$\beta_{1э} = \left(1 + \frac{E_3 h_3 a_2}{E_2 h_2 a_3} \sin^2\theta_к\right) \beta_1 \qquad (5)$$

Здесь: $a_3 = \sqrt{E_3 / \rho_3 (1-\mu_3^2)}$ - скорость распространения волн растяжения -сжатия в оболочке вращения, E_3, ρ_3, μ_3 - физико-механические характеристики материала оболочки вращения, h_3 - ее толщина, $\theta_к$ - угол между касательной к срединной поверхности оболочки вращения и нормалью к поверхности цилиндрической оболочки в месте сопряжения оболочек со шпангоутом.

С использованием полученных решений (§§ 2,3) рассмотрена задача о предпочтительном выборе одного из вариантов конструкции. Показано в частности, что при малых частотах продольной нагрузки амплитуда проходящей волны в цилиндрической оболочке, сопряженной со слабоконической оболочкой ($m_ш = 0$, $\theta_к = 90^0$, $h_3 = h_1$), будет меньше, чем в конструкции равного веса, представляющей собой цилиндрическую оболочку, подкрепленную шпангоутом. При больших частотах нагрузки имеет место обратная картина.

В четвертом параграфе рассмотрена задача о поперечном воздействии по контуру круглой пластинки. Изображение функции $\bar{Q}_R(p)$ (Здесь $Q_R(t)$ - перерезывающая сила на контуре пластинки, p - параметр преобразования Лапласа по времени t) получено при произвольной зависимости по времени скорости перемещения жестко заделанного контура пластинки ($V(t)$). Обратное преобразование осуществлялось с использованием асимптотического представления Бесселевых функций для больших значений аргумента, т.е. при $p \to \infty$ ($t \to 0$). Конкретные зависимости получены для трех вариантов функций $V(t)$:

1) $V(t) = c_1 \delta_к(t)$, 2) $V(t) = c_2 t\, \delta_к(t)$

3) $V(t) = c_1(1 - \exp(-c_3 t))\, \delta_к(t)$

При этом ($T_{пк} = -Q_R$)

$$1)\quad T_{nk}/T_{1k}=\sqrt{\frac{h}{R}}\sqrt{\frac{1}{\pi\sqrt{3}\,\bar{t}}}\ /1,$$

$$2)\quad T_{nk}/T_{1k}=2\sqrt{\frac{h}{R}}\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi\sqrt{3}}}\ /\bar{t},$$

$$3)\quad T_{nk}/T_{1k}=2\sqrt{\frac{h}{R}}\sqrt{\frac{\bar{t}}{\pi\sqrt{3}}}\ exp(-\xi_3\bar{t})\int_0^{\sqrt{\xi_3\bar{t}}}exp(\lambda^2)d\lambda/(1-exp(-\xi_3\bar{t})) \qquad (6)$$

Здесь: T_{nk}, T_{1k} – осевые реакции со стороны круглой пластинки и цилиндрической оболочки при продольном перемещении абсолютно-жесткого шпангоута (случай $\theta_k = 0$, § 3), $\bar{t}=ta/R$, $a=\sqrt{E/\rho(1-\mu^2)}$ h – толщина пластинки.

Из соотношений (6) следует, что, если оболочка вращения (задача § 3) вырождается в круглую пластинку ($\theta_k = 0$), последняя не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на распространяющуюся в цилиндрической оболочке продольную волну.

<u>В пятом параграфе</u> исследуются напряжения в полюсе ортотропной круглой пластинки при радиальном воздействии по ее контуру нагрузкой, изменяющейся во времени как функция Хевисайда ($T_1|_{r=R}=Eh(1-\mu^2)^{-1}\delta_*(\bar{t})$). Из полученного операционным методом решения, следует, что если жесткость в окружном направлении пластинки больше, чем в радиальном ($\nu=E_\varphi/E_r>1$), то усилия в полюсе ($r=0$) тождественно равны нулю, если же $\nu<1$ то напряжения в полюсе для $t>R/a$ – бесконечны. Для изотропной же пластинки мембранные усилия в полюсе пластинки в два раза больше усилий на контуре $r=R$, при этом для $1<\bar{t}<3$, $\bar{T}_{10}=-2$; $3<\bar{t}<5$, $\bar{T}_{10}=0$; $5<\bar{t}<7$, $\bar{T}_{10}=-2$ и т.д. В моменты времени $\bar{t}=1,3,5,7,\ldots$, как уже показано ранее Новаком (Прикл.мех., сер. Е, т.29, 1962, № 2) усилия бесконечны ($T_{10}|_{\bar{t}=1}=-\infty$, $T_{10}|_{\bar{t}=3}=+\infty$ и т.д.).

<u>ВТОРАЯ ГЛАВА</u> посвящена численному исследованию задачи о переходном процессе деформации сочлененных упругим шпангоутом цилиндрических и сферической ортотропных оболочек при действии продольной силы, приложенной к торцу цилиндрической оболочки.

<u>В первом параграфе</u> приведены уравнения осесимметричного движения ортотропных оболочек вращения (теории Киргоффа-Лява), уравнения движения упругого шпангоута, соотношения, определяющие условия контакта оболочек и шпангоута, а также граничные условия.

Показано, что уравнение движения в проекции на касательную для полюса изотропной сферической оболочки вырождается в условие равенства нулю второй производной от меридионального перемещения (u) по координате (s). В случае, если коэффициент жесткости ортотропной оболочки ($\gamma = E_\varphi / E_\theta = \mu_\varphi / \mu_\theta$, где индекс " θ " означает меридиональное направление, " φ " - окружное) больше единицы и меньше двух, то при отражении волн растяжения -сжатия от полюса ($\theta = 0$) равна нулю меридиональная деформация, а $\partial^2 u / \partial s^2 |_{s \to 0} \to \infty$ ($s = R_0 \theta$, где R_0 - радиус сферической оболочки). Когда $\gamma > 2$, то равна нулю как меридиональная деформация, так и ее производная по координате ($\partial^2 u / \partial s^2 |_{s \to 0} \to 0$). Если же $\gamma < 1$, то меридиональная деформация и ее производная бесконечны. В этом случае линейная постановка задачи является некорректной.

Во втором параграфе дается интерпретация метода прямых применительно к задачам динамики сопряженных шпангоутом оболочек вращения.

В третьем параграфе проводится обсуждение результатов расчёта на ЭЦВМ БЭСМ-6 переходного процесса деформации конструкции при продольной нагрузке, изменяющейся во времени как функция Хевисайда, а также при экспоненциальной зависимости.

Результаты данного параграфа опубликованы в работе [I].

В четвертом, последнем параграфе второй главы исследуется влияние некоторых параметров конструкции на характер трансформации продольной волны, не имеющей сильных разрывов, сопоставляются результаты расчёта на ЭЦВМ и по зависимостям (I), (5). Отдельно рассмотрена также задача о распространении волны растяжения-сжатия в ортотропной сферической оболочке.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена экспериментальному исследованию трансформации продольной волны в цилиндрической оболочке, подкрепленной шпангоутом.

В первом параграфе дается описание эксперимента и схемы измерения. Исследования проводились на модели, представляющей собой цилиндрическую оболочку диаметром $2R = 200$ мм, толщиной $h = 2$ мм и длиной $L = 800$ мм. Верхний торец оболочки жестко скреплен с кольцом, а нижний - с конусом. На расстоянии $\ell = 100$ мм от нижнего торца во второй серии эксперимента к внешней поверхности оболочки приваривался шпангоут прямоугольного поперечного сечения. Для измерения продольных деформаций на расстоянии $\ell_g = 200$ мм от нижнего торца к цилиндрической оболочке

по стандартной технологии наклеивался тензодатчик (база 5 мм) Измерение ускорений в осевом направлении осуществлялось с помощью акселлерометра МС-318. Перед проведением эксперимента модель вертикально подвешивалась на проволочной тяге. Затем тяга разделялась, в результате чего происходило свободное падение модели и ее удар (конусом) о массивную плиту. Импульсы с датчиков воспроизводились на электронном двух лучевом осциллографе СI-I7 (усилитель СI-I5). Осциллограммы деформаций и ускорений фиксировались с экрана осциллографа на фотопленку (чувствительность I000 ед.)

Во-втором параграфе приведена методика и результаты калибровки тензодатчика и акселлерометра в условиях наиболее приближенных к условиям эксперимента. Процесс соударения массивного цилиндра и стержня с датчиками фиксировался с помощью скоростной киносъемки (СКС), а осциллограммы деформаций и ускорений воспроизводились по описанному в § I способу.

Предлагаемый метод калибровки датчиков лишен недостатка, свойственного обычным методам, поскольку отсутствует промежуточное звено в виде некоторой расчётной формулы, достоверность которой не всегда удовлетворительна. Единственное соотношение, связывающее параметры процесса (скорость, ускорение, деформация), представляет собой выражение закона сохранения импульса.

В третьем параграфе приведены результаты эксперимента, которые затем сопоставляются с расчётом на ЭЦВМ. В целом результаты эксперимента подтверждают результаты теоретических исследований, в частности, выполняется условие сохранения импульса, уменьшение амплитуды и увеличение длительности проходящей волны. Различие в максимальных значениях ускорений в различных сечениях оболочки (нижний торец, шпангоут, верхний торец) в эксперименте и расчёте не превышает 20-40%. Отмечено, что при ударе модели о неподвижную преграду для продольных деформаций цилиндрической оболочки с достаточной степенью точности имеет место аппроксимирующая зависимость

$$\varepsilon_1(t) = c_1 t^2 \exp(-c_2 t) \qquad (8)$$

причем в условиях эксперимента общая длительность импульса $\tau_n = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ сек, а время, соответствующее максимальному значению деформации $\tau_m = \tau_n / 3$.

Приложение раскрывает отдельные вопросы, связанные с распространением продольных волн в конструкциях летательных аппаратов, а также более подробно освещает некоторые разделы диссертации.

В § 1п рассмотрена упрощенная методика определения перегрузок элементов приборных устройств. Проводится анализ зависимости коэффициента перегрузки от параметров осциллятора с демпферами. С использованием соотношений § 2 Гл.I определяются перегрузки осциллятора при воздействии на точку его подвеса проходящей упругой волны в подкрепленной шпангоутом цилиндрической оболочке. Нагружение оболочки осуществляется продольной силой, изменяющейся во времени как функция Хевисайда. Показаны соотношения для перегрузок (ускорений) осциллятора в случае произвольной во времени нагрузки.

В § 2п приведены результаты экспериментального исследования трансформации продольных импульсов в свободно подвешенной полосе при разделении последней удлиненным детонирующим зарядом. Показано, что степень затухания амплитуды ( ) волны, характеризующая фактор рассеяния энергии (E) при распространении упругого возмущения, определяется по соотношению

$$\frac{E(t)}{E_0} = \frac{A^2(t)}{A_0^2} = \exp(-\zeta f t), \qquad (9)$$

где f – частота волны в гц,

ζ – коэффициент, зависящий от материала, в частности для стали $\zeta \approx 0{,}14$.

В § 3п дается вывод зависимости, связывающей импульсы падающей и проходящей продольных волн в составном стержне с промежуточной сосредоточенной массой.

В § 4п в безразмерной форме приводятся уравнения движения, а также алгоритм численного расчёта сопряженных шпангоутом цилиндрических и сферической оболочек.

В § 5п обсуждаются некоторые результаты работы Н.Д.Векслера (материалы Всесоюзного симпозиума по перех.процессам деф. обол. и пл., Таллин, 1967), посвященной исследованию распространения фронтовых разрывов при осесимметричной деформации оболочек вращения.

Диссертационная работа позволила сделать следующие выводы.

I. На основе упрощенной технической теории оболочек (теории Кирхгоффа-Лява) исследована задача о распространении упругих волн растяжения-сжатия в сопряженных шпангоутом цилиндрической и сферической оболочек.

2. Показано, что одномерная модель конструкции в виде составного стержня с промежуточной сосредоточенной массой позволяет описать начальный этап трансформации продольных волн в цилиндрической оболочке, сочлененной с оболочкой вращения. Для цилиндрической оболочки, подкрепленной шпангоутом, указанная модель приемлема без ограничения на время переходного процесса.

3. На основе одномерной модели конструкции получены простые аналитические решения, позволившие достаточно полно исследовать характер трансформации продольной волны в цилиндрической оболочке. Проведен анализ интерференции продольных волн в окрестности узла сопряжения оболочки и шпангоута. Показаны соотношения для амплитуд и импульсов проходящей и отраженной волн.

4. В асимптотическом приближении решена задача о поперечном ударе по контуру круглой пластинки. Полученное решение позволяет заключить, что в случае вырождения оболочки вращения в круглую пластинку последняя не оказывает сколь-нибудь заметного влияния на проходящую и отраженную волны в цилиндрической оболочке.

5. Проведено исследование напряжений в полюсе ортотропной круглой пластинки при радиальном воздействии по ее контуру мгновенно приложенной постоянной нагрузки. Показано, что за исключением фронта разрыва амплитуда волны при отражении от полюса в два раза больше амплитуды приложенной нагрузки. Для пластинки, имеющей жесткость в окружном направлении больше, чем в радиальном, напряжения в полюсе тождественно равны нулю.

6. При исследовании распространения волн растяжения- сжатия анализ условий в полюсе ортотропной сферической оболочки показал, что линейная постановка задачи некорректна в том случае, если жесткость в окружном направлении меньше чем меридиональном. Получены дополнительные условия в полюсе оболочки. При этом для изотропной оболочки, а также для оболочки, имеющей жесткость в окружном направлении более чем в два раза превосходящую жесткость в меридиональном направлении, в полюсе тождественно выполняется условие равенства нулю второй производной от тангенциального

перемещения по координате.

7. На основе анализа численного решения задачи о распространении упругого возмущения в ортотропной сферической оболочке следует, что при фокусировании волны растяжения-сжатия к полюсу её трансформация определяется не только параметром жесткости ортотропной оболочки, но и формой первоначальной волны.

8. С помощью реализованного на ЭЦВМ БЭСМ-6 алгоритма метода прямых проведено исследование влияния некоторых параметров конструкции сопряженных оболочек на характер трансформации продольной волны в цилиндрической оболочке при плавно изменяющейся во времени продольной нагрузке.

9. Экспериментальные исследования трансформации продольной волны в цилиндрической оболочке, подкрепленной шпангоутом, подтвердили выводы теоретического исследования о сохранении импульса, уменьшения амплитуды и увеличении длительности проходящей волны.

10. На примере эксперимента со свободно подвешенной длинной полосой показана степень затухания амплитуды упругой волны, характеризующая фактор рассеяния энергии. Для отношения амплитуд и энергий рекомендована формула в виде экспоненциальной зависимости, аргументом которой является произведение частоты волны, времени ее распространения и коэффициента, зависящего от материала.

Отдельные вопросы по теме диссертации отражены в следующих опубликованных работах автора.

1. Фабижевский К.В. Распространение упругого возмущения в сочлененных оболочках. Труды Уфимского авиац. инст. им. Орджоникидзе. Прочность авиационных констр. вып.40, 1978.

2. Фабижевский К.В. Распространение волны продольной деформации в цилиндрической оболочке, подкрепленной шпангоутом. Изв. ВУЗов сер. Машиностроение, 1974, № 8.