

Т45

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ТИТОВ Станислав Олегович

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК

01.02.03 - Строительная механика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1988

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового
Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта
имени М.И.Калинина.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
профессор
Губенко В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Заруцкий В.А.

кандидат технических наук,
доцент
Брынза А.А.

Ведущее предприятие: утверждено решением Совета.

Защита диссертации состоится "9" декабря 1988 г.
в "15" часов на заседании Специализированного Совета
К 114.07.02 Днепропетровского института инженеров железнодо-
рожного транспорта имени М.И.Калинина.

Отзывы на автореферат прошу направлять по адресу:

320700, г. Днепропетровск-10, ул. Лазаряна, 2,

ДИИТ, Ученому секретарю Совета К 114.07.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

ноябрь 1988 г.

ТАРАСЕНКО

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Круговые замкнутые гладкие и подкрепленные цилиндрические оболочки находят все более широкое применение в различных областях современной техники. В реальных условиях эксплуатации такие конструкции подвергаются действию как статических, так и динамических внешних нагрузок. Если к настоящему времени поведение оболочечных конструкций при статическом нагружении изучено достаточно полно, то число работ, посвященных изучению этого вопроса при динамическом приложении нагрузки, значительно меньше, и, судя по публикациям последних лет, эта область строительной механики находится еще в стадии интенсивного развития. В связи с этим, важными с практической точки зрения являются исследования устойчивости оболочечных конструкций при их динамическом нагружении.

Для решения задач устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек в большинстве случаев использовались конструктивно-ортотропные модели, позволявшие при достаточно большом числе подкрепляющих элементов определять критические параметры нагружения на основе хорошо развитой к настоящему времени теории анизотропных оболочек. Однако, в ряде случаев такой подход не позволяет выявить специфические случаи деформации, обусловленные учетом дискретного размещения подкрепляющего набора.

Теоретические исследования по устойчивости гладких и ребристых цилиндрических оболочек при динамическом нагружении проводились обычно без учета влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер), что во многих случаях, как отмечено А.С. Вольским¹, может приводить к существенным погрешностям при определении критических нагрузок.

Для подкрепленных цилиндрических оболочек большинство исследований проведено с использованием гипотез классической теории.

Актуальными до настоящего времени остаются вопросы:

- расчета на устойчивость гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при действии динамических нагрузок, изменяющихся во времени по различным законам, в том числе с учетом волнового характера распространения усилий;

¹ Вольский А.С. Налинейная динамика пластин и оболочек. - М.: Наука, 1972. - 432 с.

Днепропетровский
институт инженеров
жел. доз. транспорта
им. М. И. Коваленко
БИБЛИОТЕКА

5231a

- исследования учета влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер), на устойчивость гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при динамическом нагружении;

- разработки методик определения рациональных параметров гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при динамическом нагружении;

- создания методик расчета на устойчивость подкрепленных цилиндрических оболочек, основанных на использовании более общих гипотез, в частности, уточненной сдвиговой теории типа Тимошенко.

Целью настоящей работы является:

- развитие методов исследования устойчивости при динамическом нагружении гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек для нагрузок, изменяющихся во времени по различным законам;

- разработка на их основе эффективных методик расчета и алгоритмов для решения задач устойчивости и выбора рациональных параметров таких конструкций при динамическом нагружении;

- решение новых задач устойчивости и выбора рациональных параметров гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при динамическом приложении нагрузки - с целью выявления качественных особенностей в поведении конструкций такого класса.

Научная новизна работы состоит в:

- формулировке аналитических критериев устойчивости гладких и конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек как с учетом, так и без учета волнового характера распространения усилий, используемых, в частности, в качестве ограничений в моделях оптимального проектирования;

- построении математических моделей для исследования устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек, как в рамках теории типа Тимошенко, так и классической теории с учетом влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер);

- формулировке аналитических критериев устойчивости для подкрепленных цилиндрических оболочек при степенном и прямоугольном законах изменения нагрузки во времени;

- численном исследовании с помощью ЭВМ влияния сил инерции, возникающих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер), на критические параметры нагрузок;

- изучении влияния геометрических характеристик обшивки и ре-
тер при учете их дискретного размещения на величины критических
нагрузок, изменяющихся во времени по указанным выше законам;

- решении задач выбора рациональных параметров подкреплен-
ных цилиндрических оболочек, испытывавших динамическое нагружение,
и получении существенной для строительной механики информации о
поведении конструкций такого класса.

Достоверность результатов работы подтверждается применением
известных методов исследования при решении задач устойчивости и
выбора рациональных параметров гладких и подкрепленных цилиндри-
ческих оболочек, а также сопоставлением, где это возможно, полу-
ченных результатов с результатами других авторов.

Практическая ценность работы состоит в возможности использо-
вания в расчетной практике конструкторско-технологических и про-
ектных организаций предложенной методики расчета на устойчивость
и выбора рациональных параметров таких конструкций минимальной
массы для быстро возрастающих во времени нагрузок.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы на-
шли применение при разработке научно-исследовательской темы
№ 01860127294 г.р. и хозяйственной темы № 01860086637 г.р. Днепро-
петровским институтом инженеров железнодорожного транспорта им.
М.И.Калинина. Разработанные в диссертационной работе модули, вхо-
дящие в пакет прикладных программ, внедрены на ряде предприятий,
а также переданы в фонд алгоритмов и программ Днепропетровского
госуниверситета. Соответствующие документы имеются в приложении к
диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались
и обсуждались на: VI Всесоюзном съезде по теоретической и приклад-
ной механике (Ташкент, 1986), IV Всесоюзном симпозиуме по физике
гидродинамических явлений и оптоакустике (Ашхабад, 1985), II Все-
союзном семинаре "Численные методы оценки устойчивости конструк-
тивных элементов подземных сооружений" (Апатиты, 1986), II Всесо-
юзной школе-семинаре "Динамика механических систем" (Томск, 1986),
II Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов "Проблемы оптими-
зации в машиностроении" (Алушта, 1986), II Республиканской школе-
семинаре молодых ученых и специалистов по теоретической и приклад-
ной гидродинамике (Алушта, 1986), XV и XVI конференциях молодых

ученых ИГиМах АН УССР (Харьков, 1987, 1988), семинаре отдела тонкостенных конструкций Института механики АН УССР (Киев, 1986, руководитель семинара – д.т.н., проф. Заруцкий В.А.), научном семинаре "Оптимальное проектирование конструкций, машин и приборов" филиала Научного Совета АН УССР по проблеме "Кибернетика" при Приднепровском научном центре (Днепропетровск, 1985–1988, руководитель семинара – акад. АН УССР Моссаковский В.И.). Диссертационная работа в полном объеме доложена на научных семинарах кафедр высшей математики и строительной механики Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основной использованной литературы и приложения, в котором приводятся документы о внедрении. Общий объем диссертации составляет 196 страниц, в том числе 123 страницы основного текста, 40 рисунков, 11 таблиц, 13 страниц списка основной использованной литературы из 113 наименований и 3 страниц приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, изложены основные направления выполняемых исследований, приведены сведения об апробации работы и ее структуре.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния исследований в области устойчивости и выбора рациональных параметров гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек, подверженных действию динамических нагрузок, изменяющихся во времени по различным законам. Отмечается, что значительные теоретические и экспериментальные исследования устойчивости гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек, подверженных динамическому нагружению, были проведены в работах В.А.Агамирова, И.Я.Амиро, Л.В.Андреева, А.Е. Богдановича, В.В. Болотина, А.С. Вольмира, В.З. Гришцака, В.М. Даревского, В.А. Заруцкого, А.Ю. Кадашевича, А.В. Кармишина, Л.И. Маневича, А.К. Перцева, С.Н. Кирюшиной, Н.И. Ободан, О.И. Теребушко, В.А. Фельдштейна, а также Абрахамсона, Гудьера, Маргера, Феппеля и других авторов. Воп

росами оптимального проектирования оболочек занимались: Н.В.Баничук, Г.И.Брызгалин, В.Б.Гринев, Е.Н.Герасимов, А.С.Дехтярь, С.Н.Кан, Б.Я.Кантор, И.Б.Лазарев, В.Л.Нарусберг, В.А.Постнов, Ю.М.Почтман, Р.Б.Рикардс, А.П.Филин, Н.П.Флейшман, Ф.Г.Шамиев и другие.

В настоящее время для формулировки задач устойчивости при действии динамических нагрузок существует два общепринятых подхода. Первый из них основан на том, что при определенных значениях параметров нагружения (когда время приложения нагрузки составляет $t \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ с) инерционными нагрузками в тангенциальных направлениях можно пренебречь. Другой подход (когда время приложения нагрузки составляет $t \sim 10^{-6} - 10^{-4}$ с) основан на учете влияния инерционных нагрузок в тангенциальных направлениях. Основные исследования по устойчивости конструкций такого класса при динамическом нагружении выполнены с помощью первого подхода и для нагрузок, изменявшихся во времени по треугольному, прямоугольному, параболическому и гармоническому законам.

В этой же главе отмечается, что вопросам оптимального проектирования гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при динамическом нагружении посвящено незначительное число работ, появившихся, в основном, в последнее время.

На основе проведенного обзора работ делаются выводы о необходимости дальнейшего развития существующих и создания новых методик расчета на устойчивость и выбора рациональных параметров гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек при действии динамических нагрузок, изменяющихся во времени по различным законам. В конце главы формулируются цели и задачи диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию влияния волн напряжений на устойчивость и выбор рациональных параметров гладких и конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек, как наиболее простых (модельных) объектов, позволяющих изучить некоторые общие закономерности, присущие конструкциям оболочечного типа вообще. Для этого синтезированы математические модели исследования устойчивости гладких и конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек с учетом и без учета волнового характера распространения усилий, позволяющие определять критические параметры действующих нагрузок.

В § 1.1 строится математическая модель для исследования устойчивости гладкой цилиндрической оболочки, когда волновой характер распространения усилий не учитывается: во внимание принимаются лишь

силы инерции, соответствующие нормальным перемещениям W . Предполагается, что под действием внешней нагрузки в оболочке возникают равномерно распределенные сжимающие напряжения, изменяющиеся в интервале времени $0 \leq t \leq t_0$ по степенному закону: $G = Ct^{\alpha}$ (C – постоянная нагрузки, $\alpha = 1, 2, 3, \dots$ – показатель степени изменения времени t и является целым положительным числом). Принималось, что потеря устойчивости оболочки обусловлена ее отклонением от положения, соответствующего безмоментному докритическому состоянию. Для решения задачи устойчивости используется уравнение, предложенное в работе²⁾ и описывающее характер возможного движения цилиндрической оболочки. В качестве критерия устойчивости использовалось условие начала возможности интенсивного нарастания нормальных прогибов. Для нагрузок, возрастающих во времени по степенному закону, получено

$$t = \sqrt[3]{\left(\frac{G_{mn}}{C}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \frac{1}{\alpha \omega_{mn}^2}} + \left(\frac{G_{mn}}{C}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

$$G = \left(\sqrt[3]{\left(\frac{G_{mn} C^2}{\alpha \omega_{mn}^2}\right)^{\frac{1}{\alpha}}} + (G_{mn})^{\frac{1}{\alpha}} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

где G_{mn} – напряжения статической потери устойчивости с параметрами волнообразования m и n в осевом и окружном направлениях, соответственно; ω_{mn} – частота собственных колебаний оболочки по той же форме. Критическое время приложения нагрузки и соответствующие ему критические напряжения определяются после минимизации выражений (1) и (2) по параметрам волнообразования. Отмечено, что выражения (1) и (2) остаются справедливыми и для ребристых оболочек как по конструктивно-ортотропной теории, так и теории, учитывающей дискретный характер размещения подкрепляющего набора.

При изучении общих закономерностей потери устойчивости удобнее использовать зависимости (1) и (2) в безразмерной форме: безразмерное критическое время и соответствующие этому времени напряжения (коэффициент динамичности). Так для гладкой цилиндрической оболочки коэффициент динамичности ψ соответствующий (2), имеет вид:

²⁾ Амиро И.Я., Заруцкий В.А. Методы расчета оболочек. Т. 2. Теория ребристых оболочек. – Киев: Наук. думка, 1980. – 368 с.

$$\psi = \left(\sqrt[3]{\frac{(C^*)^{\frac{2}{3}}}{\alpha} \frac{1}{M} \left(\frac{1}{2M} + \frac{M}{2} \right)^{\frac{1}{3}-1}} + \left(\frac{1}{2M} + \frac{M}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^3, \quad (3)$$

где C^* и M - соответственно, безразмерная постоянная нагружения и безразмерный жесткостной параметр оболочки. Для каждого фиксированного значения C^* при заданном M , после минимизации (3) по параметру M , можно вычислить соответствующую критическую величину ψ . Если значение заданного коэффициента динамичности меньше найденного, то максимальное значение нагрузки для конструкции не опасно, в противном случае возможна динамическая потеря устойчивости. Предложенный подход позволяет исследовать влияние постоянных нагружения для различных показателей степени α на устойчивость гладких цилиндрических оболочек при быстро возрастающих во времени нагрузках.

В § 1.2 при построении математических моделей гладких и конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек с учетом волнового характера распространения усилий используются уравнения безмоментной теории гладких и конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек, в которых учитывается влияние сил инерции, действующих в нормальных и тангенциальных направлениях. Постановка задач дополняется динамическими и кинематическими граничными условиями, а также начальными условиями перед фронтом волны. Решение осуществляется в два этапа. На первом этапе рассматриваются полубесконечные цилиндрические оболочки к торцам которых прикладывается нагрузка, изменяющаяся во времени либо по степенному, либо по прямоугольному законам (прямая волна). На втором этапе полученные результаты обобщаются для оболочек конечной длины (учет влияния отраженных волн). Для определения компонентов вектора перемещений точек срединной поверхности каждой оболочки используется лучевой метод. Установлено, что максимальные нормальные прогибы возникают у загруженного торца, поэтому в качестве критерия потери устойчивости можно принять условие, при котором величина максимального нормального прогиба достигнет значения, равного толщине оболочки h . Для гладкой цилиндрической оболочки выражения для критического времени и соответствующих ему критических напряжений получены в виде:

$$t_{кр} = \left(\frac{2\pi\rho_0 z^2 h^2 (d+1)(d+2)}{\psi C} \right)^{\frac{1}{d+1}} \quad (4)$$

$$N_{кр} = C \left(\frac{2\pi\rho_0 z^2 h^2 (d+1)(d+2)}{\psi C} \right)^{\frac{d}{d+1}} \quad (5)$$

где ρ_0 и ν - плотность и коэффициент Пуассона материала оболочки, r - радиус ее срединной поверхности.

В случае нагрузки, которая внезапно прикладывается к торцу оболочки и затем остается во времени постоянной (прямоугольный импульс), для определения критического времени следует в (4) положить $\alpha = 0$ и величину C заменить на N .

Предложенный подход позволяет исследовать влияние волн напряжений на напряженно-деформированное состояние и устойчивость гладких и конформно-ортотропных цилиндрических оболочек при действии нагрузок, изменяющихся во времени по указанным выше законам.

В § 1.3 в терминах нелинейного математического программирования (НМП) формулируется и решается задача оптимального проектирования гладкой цилиндрической оболочки минимальной массы при действии осевых сжимающих нагрузок, изменяющихся во времени по степенному и прямоугольному законам. В качестве варьируемых параметров выбирается толщина оболочки $h = X_1$ и радиус ее срединной поверхности $r = X_2$. Задача оптимизации формулируется в виде:

$$M(X) \rightarrow \min, \quad X \in \Omega, \quad (6)$$

где $M(X) = 2\pi r_0 L X_1 X_2$ - масса оболочки, Ω - множество допустимых значений варьируемых параметров $X = [X_1, X_2]$.

В качестве ограничений используются ограничения по прочности и устойчивости, полученные в соответствии с выражениями (2) и (5), а также ограничение на область применения сформулированных критериев:

$$g(X_1, X_2) \geq 0 \quad (7)$$

$$g(X_1, X_2) = \begin{cases} \eta(X_1, X_2) - 1 & \text{для критерия (2)} \\ 1 - \eta(X_1, X_2) & \text{для критерия (5)}, \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{где } \eta(X_1, X_2) = & \left(\frac{C}{2^{a+1} (2\pi)^{\frac{a+1}{2}} E^{\frac{a+1}{2}} \frac{1}{\nu^{\frac{a+1}{2}}} \alpha^{a+1} (\alpha+1)^2 (\alpha+2)^2 X_1^{\frac{a+1}{2}} X_2^{\frac{a+1}{2}}} \right)^{\frac{1}{a+1}} \\ & + \left(\frac{4 F^2 E^{a+1} X_1^2 \nu^a}{\rho^2 C^2 [3(1-\nu^2)]^{\frac{a+1}{2}} X_2^{a+1} (\alpha+1)(\alpha+2)} \right)^{\frac{1}{a+1}}, \quad \alpha \geq 1 \\ \eta(X_1, X_2) = \eta(X_1) = & \sqrt{\frac{4 F^2 (1-\nu^2)}{\nu} - \frac{\rho F E X_1^2}{\nu N}}, \quad \alpha = 0. \end{aligned}$$

Выполнение знака равенства в (7) определяет нижнюю границу приме-

ния аналитических критериев устойчивости, при которых волновым характером распространения усилий можно пренебречь.

Решение поставленной задачи осуществляется на основе теоремы Куна-Таккера при помощи подхода, предложенного в работе³⁾, основанного на последовательном рассмотрении включения в работу ограничений и позволяющего получить различные варианты оптимального решения.

На рис. 1 показаны варианты оптимального решения в различные моменты времени $t = \{3; 5; 7\} 10^{-4}$ с, полученные с учетом и без учета волнового характера распространения усилий для $\alpha = 1$. Кривые 1-3 определяют ограничения по прочности, 4, 5 - ограничения по устойчивости по критерию (5), 6-8 - ограничения по устойчивости по критерию (2) в соответствующие моменты времени, 9 - границу области ограничения (7). Видно, в частности, что при учете волнового характера распространения усилий оптимальное решение определяется неоднозначно, что позволяет проектировщику гибко выбирать оптимальные параметры для каждой конкретной конструкции - в зависимости от технологических и других характеристик.

С помощью предложенной методики оптимального проектирования гладких цилиндрических оболочек (как модельных объектов) при действии нестационарных нагрузок исследованы и другие качественные особенности в поведении таких конструкций.

Третья глава посвящена исследованию общих закономерностей потери устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек в рамках модели типа Тимошенко при действии быстро возрастающих во времени нагрузок.

В § 3.1 приводятся исходные предположения и зависимости линейной теории типа Тимошенко для подкрепленной оболочки. Напряженно-деформированное состояние обшивки описывается по методике, предложенной А.С.Вольмиром¹⁾. Из условия жесткого соединения обшивки и ребер, равенства перемещений нормальных прогибов и гипотезы прямолинейного недеформируемого элемента получены соотношения, связывающие компоненты вектора перемещений ребер с компонентами вектора перемещений точек срединной поверхности и углы поворота.

В § 3.2 выводятся выражения для полной потенциальной и кинетической энергий регулярно подкрепленной цилиндрической оболочки.

³⁾ Журу О.В., Почтман Ю.М., Филатов Г.В. Влияние импульсного характера нагружения на оптимальное распределение материала в оболочках // Докл. АН УССР. - Сер.А. - 1985. - № 7. - С. 36-39.

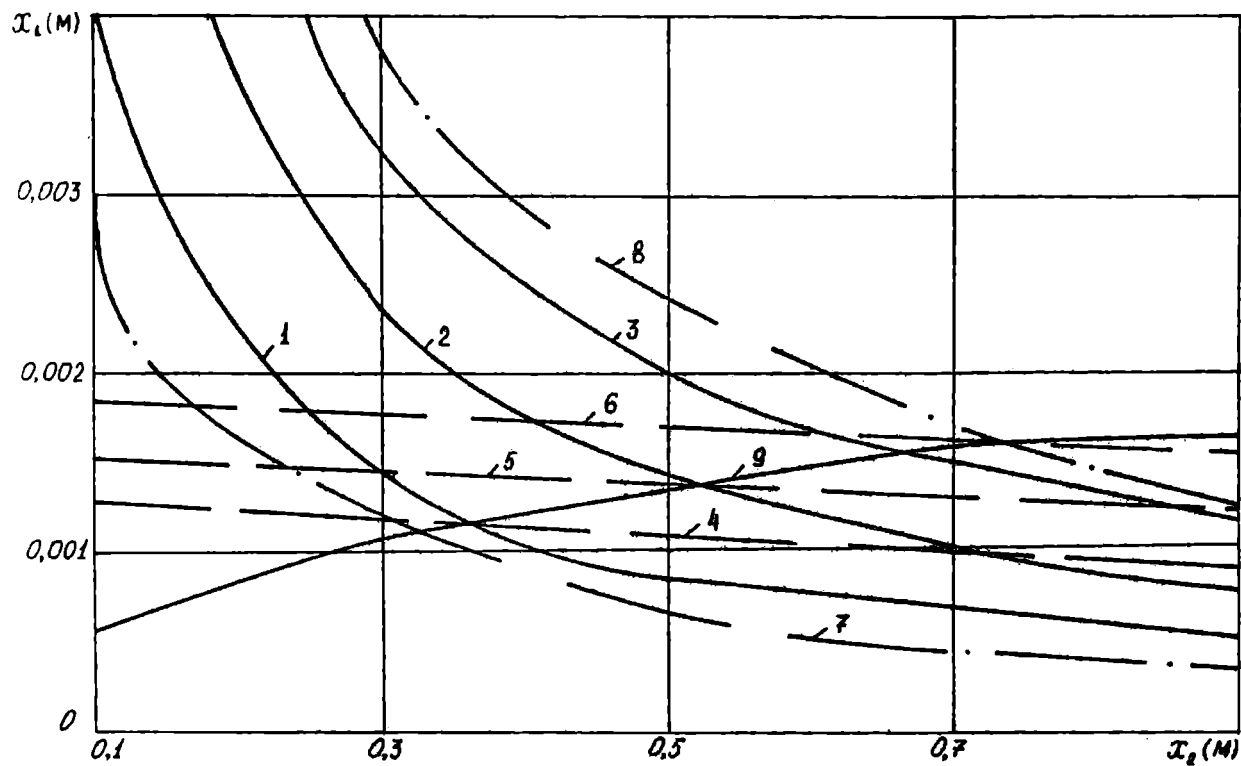


Рис. 1

Три компонента вектора перемещений и два угла сдвига, в предположении, что оболочка шарнирно оперта по торцам, аппроксимируются одночленными выражениями, содержащими десять линейно независимых функций времени и позволяющих рассматривать осесимметричное и кососимметричное деформирование оболочки с позиций стационарных волн. После подстановки этих выражений в формулы для потенциальной и кинетической энергий оболочки, а также интегрирования по продольной и окружной координатам, получены соответствующие зависимости, где дискретность регулярно расположенного подкрепляющего набора учитывается в виде конечных тригонометрических сумм.

В § 3.3 с использованием уравнения Лагранжа II-го рода получены две системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих характер возможного движения регулярно подкрепленной цилиндрической оболочки при осесимметричном и кососимметричном деформировании, которые имеют вид:

$$\sum_{j=1}^5 b_{ij}^s \frac{d^2 q_j^s}{dt^2} + \sum_{j=1}^5 a_{ij}^s q_j^s = 0 \quad (i, j = \overline{1,5}; s = \overline{1,2}), \quad (8)$$

где $b_{ij}^s = b_{ji}^s$ и $a_{ij}^s = a_{ji}^s$ — коэффициенты, зависящие от параметров волнообразования m и n , безразмерных жесткостных характеристик обшивки и ребер, а также тригонометрических сумм, учитывающих дискретный характер размещения подкрепляющего набора (кроме того коэффициент a_{33}^s зависит от приведенных значений осевых сжимающих напряжений или кольцевых напряжений внешнего давления), $q_j^s(t)$ ($j = \overline{1,5}$;

$S = \overline{1,2}$) — линейно независимые функции времени, входящие в выражения для компонентов вектора перемещений и углов сдвига.

Полученные системы уравнений (8) являются достаточно общими: если в каждой из них положить $b_{ij}^s = 0$ ($i, j = \overline{1,5}; S = \overline{1,2}$), то получим систему пяти линейных однородных алгебраических уравнений относительно $q_j^s = \text{const}$ для определения критических напряжений осевого сжатия, либо кольцевых напряжений внешнего давления; если положить $b_{ij}^s = 0$, $b_{33}^s \neq 0$, то получим систему четырех линейных алгебраических и одного обыкновенного дифференциального уравнения относительно линейно зависимых функций времени $q_j^s(t)$, которая приводится к одному дифференциальному уравнению, совпадающему по форме с уравнением, приведенным в монографии¹⁾ и описывающим характер возможного движения регулярно подкрепленной цилиндрической оболочки при динамическом нагружении; если положить $q_j^s = q_{j0}^s e^{i\omega t}$ ($q_{j0}^s = \text{const}$) то

получим уравнение для частоты собственных (при отсутствии внешней нагрузки, в противном случае – вынужденных) колебаний ω регулярно подкрепленной цилиндрической оболочки.

В § 3.4 после введения нормальных координат, представляющих собой линейную комбинацию компонентов вектора перемещений точек средней поверхности и углов сдвига при удержании минимальных значений собственных чисел, зависящих от осевых сжимающих напряжений или кольцевых напряжений внешнего давления и рассматриваемых как параметр, каждое из уравнений системы (8) записывается в виде:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \omega_{mn}^2 \left(\frac{1 - \frac{\sigma}{\sigma_{mn}}}{1 - \Delta_{mn} \omega_{mn}^2 \frac{\sigma}{\sigma_{mn}}} \right) X = 0, \quad (9)$$

где X – нормальная координата; Δ_{mn} – функция, зависящая от параметров m и n , безразмерных жесткостных параметров обшивки и ребер и характеризующая влияние сил инерции в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер); σ – величина осевых сжимающих напряжений или кольцевых напряжений внешнего давления.

В качестве критерия устойчивости используется условие начала возможности интенсивного развития прогибов на монотонном участке диаграммы „ X – σ “. Для нагрузки, возрастающей во времени по степенному закону, получено:

$$t = \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_{mn}}{C}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1 - \Delta_{mn} \omega_{mn}^2}{\alpha \omega_{mn}^2}} + \left(\frac{\sigma_{mn}}{C}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad (10)$$

$$\sigma = \left(\sqrt[3]{\frac{(\sigma_{mn} C^2)^{\frac{1}{2}} (1 - \Delta_{mn} \omega_{mn}^2)}{\alpha \omega_{mn}^2}} + (\sigma_{mn})^{\frac{1}{2}} \right)^2, \quad (11)$$

а для нагрузки, изменяющейся во времени по прямоугольному закону:

$$t = \sqrt{\frac{\sigma_{mn} - \Delta_{mn} \omega_{mn}^2 \sigma_0}{\omega_{mn}^2 (\sigma_0 - \sigma_{mn})}} \quad (12)$$

Путем минимизации выражений (10)–(12) по параметрам волнообразования m и n , получены критические значения искомых величин для конкретных законов нагружения.

В соответствии с предложенными алгоритмами определения критических параметров действующих нагрузок составлен модуль, входящий в

пакет прикладных программ (ППП) "ИМПУЛЬС Т" на языке ФОРТРАН-1У для ЕС ЭВМ, позволяющий определить: критические напряжения осевого сжатия или внешнего давления статической потери устойчивости; частоту собственных (вынужденных) колебаний; критические параметры нагрузок, изменяющихся во времени по степенному или прямоугольному законам. При этом в зависимости от соотношений числа продольных и кольцевых ребер с параметрами волнообразования рассмотрены как общий, так и частные случаи деформации, обусловленные учетом дискретного размещения подкрепляющего набора, классификация которых приводится в работе²⁾. Критические параметры действующих нагрузок найдены с помощью ППП "ИМПУЛЬС Т" и соответствует минимальному значению критических нагрузок из всех рассмотренных случаев деформации. Построенную выше модель оболочки на основе уточненной теории типа Тимошенко будем называть моделью Т.

В § 3.5 осуществлен переход от модели типа Тимошенко к модели подкрепленной цилиндрической оболочки, построенной в рамках гипотез классической теории, которая в дальнейшем называется моделью К. Для этой модели деформирование оболочки определяется через компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности обшивки.

Выражения для определения G_{mn} , ω_{mn} , Δ_{mn} , входящие в критерии (10) - (12), при этом существенно упрощаются: в каждой системе уравнений возможного движения оболочки (8) из пяти уравнений остаются лишь три, а все остальные зависимости выводятся аналогично приведенным ранее для модели Т. По типу модуля, входящего в ППП "ИМПУЛЬС Т", разработан модуль, входящий в ППП "ИМПУЛЬС К" для модели К и позволяющий определить критические нагрузки при статическом и динамическом нагружении, изменяющемся во времени по степенному и прямоугольному законам, а также частоту собственных (вынужденных) колебаний.

В 1У главе численно исследуется влияние параметров нагружения и геометрических характеристик обшивки и ребер на значения критических нагрузок осевого сжатия и внешнего давления, анализируются модели расчета подкрепленных оболочек, формулируются и решаются некоторые задачи выбора рациональных параметров регулярно подкрепленных цилиндрических оболочек. Численный эксперимент на ЭВМ проводился с помощью ППП "ИМПУЛЬС К" и "ИМПУЛЬС Т".

§ 4.1 и 4.2 посвящены изучению влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер), на значения критических параметров нагружения, изменяющихся

во времени по линейному, прямоугольному и степенному законам, при осевом сжатии – для оболочек с перекрестной системой ребер и стрингерных оболочек, при внешнем давлении – для оболочек с перекрестной системой ребер и шпангоутных оболочек. Рассматривались достаточно тонкие оболочки с $r/h = 400$, для которых влияние деформаций сдвига несущественно, что дало возможность проводить расчет в рамках классической теории с помощью ППП "ИМПУЛЬС К", позволяющего определить критические параметры нагружения как с учетом влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер) (модель В), так и без учета этих факторов (модель Б).

На рис. 2 и 3 для линейно возрастающей во времени нагрузки представлены зависимости P_g/P_g – для осевого сжатия и q_g/q_g – для внешнего давления от отношения скоростей нагружения $\frac{C_{\infty}}{C_{g0}} 10^4 (C_{\infty} = 5 \cdot 10^9 \text{ Па/с}, \dot{A} = 0 \text{ соответствует кривая 1, } \dot{A} = 1 - \text{кривая II, } \dot{A} = 2 - \text{кривая III, } \dot{A} = 3 - \text{кривая IV, } \dot{A} = 4 - \text{кривая V, } \dot{A} = 5 - \text{кривая VI}) \text{ и } C_g/C_{g0} 10^4 (C_{g0} = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Па/с. } \dot{A} = 0 \text{ соответствует сплошным и пунктирным кривым 1, } \dot{A} = 1 - \text{кривым II, } \dot{A} = 2 - \text{кривым III, } \dot{A} = 3 - \text{кривым IV}), \text{ соответственно. Сплошные кривые характеризуют поведение оболочек с перекрестной системой ребер, имевших 36 стрингеров, 8 шпангоутов (рис. 2) и 60 стрингеров, 2 шпангоута (рис. 3); пунктирные на рис. 3 - шпангоутных оболочек (2 шпангоута). Для всех рассмотренных типов оболочек существенное увеличение критической нагрузки для модели В по отношению к модели Б (принималось, что этот эффект имеет место при } P_g/P_g > 1,05) наблюдалось в диапазоне изменения критического времени ее приложения } t \sim 10^{-6} - 10^{-4} \text{ с. При осевом сжатии максимальное увеличение критической нагрузки для модели В по отношению к модели Б достигало 17,8\% при } C_{\infty}/C_{g0} = 10^6 \text{ и при } t < 4,29 \cdot 10^{-5} \text{ с приводило в модели В к качественно новому случаю деформации, который в последующем являлся определяющим. Максимальное увеличение критического внешнего давления для модели В по отношению к модели Б достигает 41,5\% для оболочек с перекрестной системой ребер и 7,8\% для шпангоутных оболочек при } C_g/C_{g0} = 10^4 \text{ и, в отличие от случая осевого сжатия, в модели В переход к качественно новому случаю деформации не наблюдался.}$

Численный эксперимент, проведенный для нагрузок, изменяющихся во времени по прямоугольному и степенному (в частности, при $\alpha = 2$ и $\alpha = 3$) законам показал, что максимальное увеличение (в 2 раза и более) наблюдается для внешнего давления при прямоугольном законе

5231a

Институт инженерной
физики
ЖЕЛ. ДОЛ. ИНСТИТУТА
ИМ. А. И. ВОЛЫНСКОГО
ВИА ИМОРЕКА

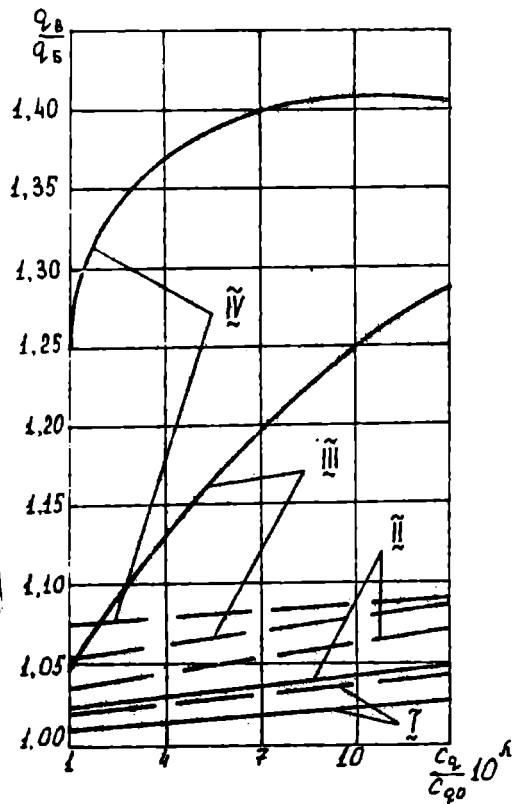


Рис. 3

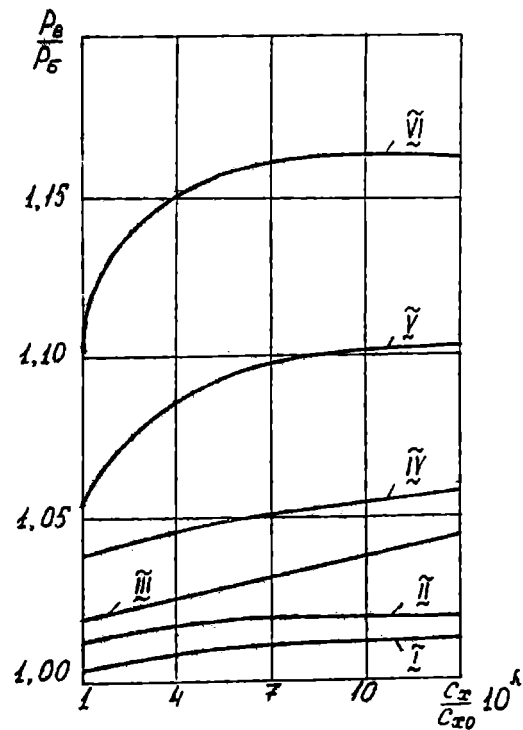


Рис. 2

изменения нагрузки, действующей на оболочку с перекрестной системой ребер.

В § 4.3 исследуется влияние параметров обшивки и ребер на примере критических значений нагрузок, изменяющихся во времени по линейному закону. В частности установлено, что увеличение эксцентриситета стрингеров при осевом сжатии практически не ведет к уточнению критических нагрузок для модели В по отношению к модели Б - в отличие от внешнего давления, когда увеличение эксцентриситета стрингеров в 4,5 раза приводит к увеличению критических нагрузок для модели В по отношению к модели Б до 43%.

В § 4.4 исследовано влияние деформаций сдвига на критические значения нагрузок, полученные при использовании модели В. Для этого оравнивались критические значения нагрузок, соответствующие моделям Т и В с помощью ППП "ИМПУЛЬС Т" и "ИМПУЛЬС К". Установлено, что значения критических нагрузок осевого сжатия (внешнего давления) для модели В всегда превышают соответствующие значения для модели Т. При этом влияние деформаций сдвига оказывается существенным только для оболочек с $\tau/h \leq 20$, когда критическое время нагружения составляет $t \sim 10^{-6}$ с.

В § 4.5 формулируется и решается задача выбора рациональных параметров подкрепленных цилиндрических оболочек при действии быстро возрастающих во времени нагрузок. Поставленная в терминах НПП задача формулируется аналогично (6). В качестве ограничений, в зависимости от вида нагружения, в ограничениях по устойчивости используется один из критериев (10)-(12), а также ограничение по прочности. Варьируемыми параметрами принимались: толщина обшивки, значения эксцентриситетов ребер, а также их число. Предполагалось, что ребра имеют квадратное поперечное сечение (однако общность не нарушается и для других форм сечений). Рассматривалось действие линейно возрастающей во времени нагрузки осевого сжатия. Решение задачи НПП проводилось с помощью ППП "ИМПУЛЬС К", включающего модуль оптимального проектирования, который реализует алгоритм поиска, предложенный в работе⁴⁾ и построенный на идее управляемого наброса в растяжимом гиперкубе. В частности установлено, что снижение массы конструкции с ростом скорости нагружения происходит, в основном, за счет увеличения толщин ребер при практически неизменном их числе.

⁴⁾ Гурвич И.Б., Захарченко В.Г., Почтман Ю.М. Рандомизированный алгоритм для решения задач нелинейного программирования// Изв. АН СССР, Техническая кибернетика. - 1979.- № 5.- С. 30-34.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Построены новые математические модели для решения задач устойчивости и выбора рациональных параметров гладких и конструктивно-ортоотропных цилиндрических оболочек при действии быстро возрастающих во времени нагрузок, с помощью которых:

а) сформулированы аналитические критерии устойчивости для определения критических параметров нагрузок как с учетом, так и без учета волнового характера распространения усилий;

б) исследованы общие закономерности потери устойчивости оболочек, позволяющие установить области изменения постоянных нагружения, при которых максимальное значение нагрузки является безопасным;

в) построены модели задач весовой оптимизации гладких цилиндрических оболочек, использующие сформулированные критерии устойчивости в качестве ограничений;

г) установлены области применения критериев устойчивости, для которых необходимо учитывать волновой характер распространения усилий; показано, что при использовании критерия, учитывавшего волновой характер распространения усилий, оптимальный проект определяется неоднозначно.

2. С учетом влияния сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер) исследованы общие закономерности потери устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек для формулировки критериев устойчивости при действии осевых сжимающих нагрузок и внешнего давления, изменявшихся во времени по прямоугольному и степенному законам.

3. В результате проведенных теоретических исследований разработаны модули в ППП "ИМПУЛЬС Т" и "ИМПУЛЬС К", позволяющие определить критические параметры для различных законов нагружения, как в рамках уточненной сдвиговой модели типа Тимошенко, так и в рамках классической модели.

4. На основе проведенного численного эксперимента на ЭВМ по определению критических параметров нагружения с помощью ППП, установлено, что:

а) для линейно возрастающей во времени нагрузки учет сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях, при вращении и кручении (для ребер) как при осевом сжатии, так и при внешнем давлении, приводит к существенному увеличению значений критических на-

рузок до 40% и более , когда время ее приложения составляет $t \sim 10^{-5} - 10^{-4} \text{ с}$;

б) с ростом скорости нагружения учет сил инерции, действующих в тангенциальных направлениях при вращении и кручении (для ребер) при осевом сжатии приводит к качественно новым случаям деформации при потере устойчивости , обусловленным учетом дискретности размещения подкрепляющего набора в отличие от внешнего давления, когда характер деформации в основном не изменяется ;

в) максимальное увеличение критических нагрузок от учета сил инерции , действующих в тангенциальных направлениях , при вращении и кручении (для ребер) наблюдается при прямоугольном законе изменения нагрузки внешнего давления для оболочек с перекрестной системой ребер;

г) учет деформаций сдвига может оказывать существенное влияние на уменьшение значений критических нагрузок $\tau/h \leq 20$, когда критическое время ее приложения составляет $t \sim 10^{-6} \text{ с}$.

5. Поставлена и решена задача НЛП по определению рациональных параметров подкрепленных цилиндрических оболочек. Установлено , что с ростом скорости нагружения масса оптимальной оболочки убывает , в основном , за счет изменения толщины подкрепляющих элементов при практически неизменном их числе . Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров для конструкций такого класса , подверженных действию быстро возрастающих во времени нагрузок

Автор выражает свою глубокую признательность кандидату технических наук , доценту Почтману Ю.М. за полезные рекомендации и помощь в выполнении диссертационной работы .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Губенко В.С. , Почтман Ю.М., Титов С.О. О применении дифракционного метода к исследованию напряженно-деформированного состояния оболочек конечной длины при импульсном нагружении // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по физике , акусто-гидродинамических явлений и оптоакустике . - Ашхабат. 1985.-С. 61.
2. Губенко В.С. , Кузнецов В.Н. , Папанов Г.А. , Титов С.О. , Ушаткин В.Л. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость оболочек при нестационарных воздействиях.-VI Всесоюз. съезд по теории -ческой и прикладной механике (аннотации докладов) . - Ташкент: ФАН , 1986.-С . 228.

3. Почтман Ю.М., Титов С.О. Устойчивость и оптимальное проектирование цилиндрических оболочек при распространении волн напряжений, вызванных действием осевых импульсных нагрузок// Докл. АН УССР. Сер. А.- 1986.- № 7.- С. 42-46.
4. Почтман Ю.М., Титов С.О. Устойчивость подкрепленных цилиндрических оболочек при быстро возрастающих во времени нагрузках// Докл. АН УССР. Сер. А.- 1987.- № 6.- С. 32-36.
5. Криворучко Т.М., Титов С.О. Исследование процесса распространения волн напряжений в искусственных небесных телах при ударном нагружении// Динамика механических систем: Тезисы докладов.- Томск, 1986.- С. 27.
6. Почтман Ю.М., Титов С.О. Определение критических значений динамической нагрузки, возрастающей во времени по степенному закону// Прикладные задачи теории сооружений.- Воронеж, 1987.- С. 79-83.
7. Почтман Ю.М., Титов С.О. Об учете волнового характера распространения усилий в полубесконечной цилиндрической оболочке// Исследования по строительным конструкциям и строительной механике.- Томск, 1987.- С. 132-140.
8. Титов С.О., Жмуро О.В. Модели для оптимального проектирования ребристых цилиндрических оболочек, испытывающих импульсное нагружение// Проблемы оптимизации в машиностроении. Всесоюз. школа молодых ученых. Тезисы докладов.- Харьков-Алушта, 1986.- С. 158-159.
9. Титов С.О. Устойчивость и колебания подкрепленных цилиндрических оболочек при действии быстро возрастающих во времени нагрузок// Прикладные задачи динамики и устойчивости механических систем.- Киев, 1987.- С. 67-73.
10. Титов С.О. Устойчивость регулярно подкрепленных цилиндрических оболочек, подверженных действию быстро возрастающих во времени нагрузок// XU научно-техническая конференция молодых ученых ИГМаша АН УССР. Аннотации докладов.- Харьков, 1987.- С. 34.
11. Титов С.О. Влияние инерции тангенциальных составляющих на устойчивость подкрепленных цилиндрических оболочек при действии быстро возрастающих во времени нагрузок// XVI научно-техническая конференция молодых ученых ИГМаша АН УССР. Аннотации докладов.- Харьков, 1988.- С. 15.



ТИТОВ Станислав Олегович

**УСТОЙЧИВОСТЬ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК**

Специальность 01.02.03 - Строительная механика

А в т о р е ф е р а т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано к печати 2.II.88. БТ 50350 Формат 60x84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л.1,2.

Уч.-изд.л.1. Заказ №1491. Тираж 100 экз. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа.

320700, ГСП, Днепропетровск, 10,

ул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.

Сканировала Камянская Н.А.