

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР ГУУЗ

Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени институт
инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина

На правах рукописи

Скалозуб Владислав Васильевич

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК
В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

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

Днепропетровск - 1982

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском инженерно-строительном институте.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент ПОЧТМАН Ю.М.

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор МАЛКОВ В.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
ЗАРУЦКИЙ В.А.

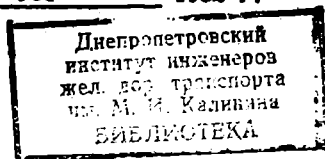
кандидат технических наук,
доцент ДЗОВА Л.П.

Ведущая организация Днепропетровский ордена Трудового
Красного Знамени государственный
университет имени 300-летия
воссоединения Украины с Россией

Защита состоится "25" "03" 1982 г. в _____ часов
на заседании специализированного совета К II4.07.02 при Днепро-
петровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров
железнодорожного транспорта (320629, ГСП, г.Днепропетровск-10,
ул. Академика В.А.Лазаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "25" "02" 1982 г.



Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент

РАДЗИХОВСКИЙ Ю.А.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

6691a

Актуальность. Одной из центральных проблем, поставленных директивными документами партии и правительства в области строительства, машиностроения, судостроения и других отраслей техники является комплексное повышение эффективности проектно-конструкторских разработок с целью уменьшения материалоемкости и стоимости, повышения надежности и долговечности, улучшения технических характеристик и т.п. Среди наиболее эффективных и распространенных выделяются тонкостенные конструкции, модели элементов которых со значительными функциональными возможностями при оптимизации (ребристые пластинки и цилиндрические оболочки) приняты в диссертации в качестве объекта исследования.

ДЛЯ ПОДАРОК

В настоящее время методы оптимального проектирования разработаны, в основном, в рамках однокритериального и детерминированного подходов. Хотя проектирование реальной конструкции на практике не удается свести к решению однокритериальной задачи, а для тонкостенных систем особенно важен учет случайной природы асимметрических, физических характеристик, случайных воздействий и т.п., эти вопросы в литературе рассмотрены недостаточно.

Необходимость более полного учета задач и требований реального проектирования делает актуальными исследования в области строительной механики, направленные на создание и совершенствование подходов и методик рационального проектирования при нескольких критериях качества в условиях неполной информации.

Цели работы:

1. Разработать методику оптимизации ребристых пластин и цилиндрических оболочек при нескольких критериях эффективности в условиях неполной информации и создать средства ее реализации на ЭВМ.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
Імені академіка В.Пазаряна

НТБ
ДНУЖТ

2. Учесть неполноту исходной информации, связанную со статистической природой внешних воздействий, геометрических параметров, физических характеристик и отсутствием нормативных требований при построении функций ограничений и критериев эффективности.

3. Рассмотреть многокритериальные постановки, использующие в качестве критериев наиболее важные характеристики объекта исследования – показатели веса, трудоемкости, унификации, надежности и долговечности (срок эксплуатации), – провести численные исследования для оценки эффективности разработанной методики и сформулировать практические рекомендации.

Научная новизна работы. Разработана новая методика проектирования ребристых пластин и цилиндрических оболочек в условиях нескольких критериев эффективности (показатели веса, трудоемкости, унификации, надежности, долговечности) и неполноты исходной информации о внешних воздействиях, геометрических и физических характеристиках конструкций, а также при нескольких вариантах нагружения.

Дано обоснование методики проектирования как игровой задачи поиска компромиссных решений. Впервые установлены признаки многокритериальных задач строительной механики, допускающие их интерпретацию как игровых.

Предложена модификация алгоритмов случайного поиска для процессов оптимизации применительно к многокритериальным задачам строительной механики. Разработан подход к диалоговому режиму выбора компромиссных решений при нескольких критериях эффективности.

Решены новые задачи оптимального проектирования ребристых пластин и цилиндрических оболочек в многокритериальной постановке и условиях неполной исходной информации; получена информация о свойствах компромиссно-оптимальных проектов и установлены конкрет-

ные возможности и область рационального применения рассмотренных векторных моделей оптимизации.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью постановок и применением апробированных методов статического расчета и исследования процессов потери устойчивости пластин и оболочек и методов теории исследования операций, соответствующих современному уровню научных представлений в указанных областях, а также сопоставлением отдельных результатов с аналогами, имеющимися в литературе.

Практическая ценность. Предложенные методы позволяют найти более обоснованные решения задач оптимизации пластин и оболочек. Полученные результаты исследований – методика, алгоритмы, программы и рекомендации, – могут быть использованы при постановке и решении конкретных задач проектирования реальных конструкций в условиях нескольких критериев эффективности при неполной информации, если имеются соответствующие средства анализа состояния или поведения проектируемой конструкции.

Алгоритмы оптимизации реализованы на ФОРТРАНЕ и АЛГОЛе и могут применяться для решения соответствующих задач. Методика проектирования внедрена на Воткинском машиностроительном заводе с получением определенного экономического эффекта.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на: – II Всесоюзной конференции по оптимальному управлению в механических системах (Казань, 1978); – Всесоюзной конференции "Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике" (Вильнюс, 1979); – Всесоюзной конференции "Современные методы и алгоритмы расчета и проектирования строительных конструкций с использованием ЭВМ" (Таллин, 1979); – Пятом Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Алма-Ата, 1981); – координационном совещании по проблеме случайного поиска (Цах-

кадор, 1981); городском семинаре по оптимальному управлению при Днепропетровском научном центре (Днепропетровск, 1980); XXXVII, XXXVIII научно-технических конференциях ДИСИ (1979, 1981 г.г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в статьях [I - 14].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений. Общий объем диссертации составляет 192 с., в том числе 133 с. основного текста, 15 рис. и 16 табл., список литературы из 167 наименований и приложения (документ о внедрении результатов, блок-схемы и программы для ЭВМ).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность вопросов многокритериальной оптимизации в задачах строительной механики при неполной информации, сформулирована цель работы, изложены основные положения и результаты выполненных исследований.

Глава I посвящена анализу современного состояния исследований проблемы оптимального проектирования при нескольких критериях эффективности и неполной информации в задачах строительной механики. Отмечается многообразие и выделены основные неопределенности: свойств материала и параметров конструкций; характера воздействий и условий эксплуатации; описания цели оптимизации и др. Значительный вклад в постановку и исследование соответствующих проблем строительной механики внесли: Н.В.Баннчук, Е.В.Бинкевич, В.В.Болотин, Г.И.Брызгалов, Е.Н.Герасимов, В.А.Заруцкий, В.А.Комаров, И.Б.Лазарев, Е.К.Липин, В.П.Малков, В.Я.Михайлищев, И.Ф.Образцов, Д.М.Почтман, Д.А.Радциг, М.И.Рейтман, В.Н.Репко, А.Р.Ряницын, Р.Б.Рикардс, Н.Д.Сергеев, Б.И.Снарский, С.А.Тышарев, В.А.Троицкий, Г.П.Черепанов, А.А.Чирас, Г.С.Шапиро, *Baier U.*

Cohn M., Parimi S., Prager W., Stadler W. и другие ученые. Обзор литературы показал, что неполнота информации статистической природы учитывается при проектировании по худшим условиям, или на основе вероятностных методов, а наличие нескольких целей может быть отражено при построении многокритериальных моделей оптимизации. Применение вероятностных и многокритериальных подходов для поиска параметров ребристых пластин и оболочек исследовано недостаточно.

Проведенный анализ позволил выявить источники, специфику и роль многокритериальных (векторных) задач в области строительной механики, которые возникают при оптимизации на множествах целей, объектов и условий функционирования. Проблема проектирования формулируется в виде:

$$\{W_j(\bar{X}) \Rightarrow \underset{\bar{X} \in D}{extr} \quad ; j=1, 2, \dots, N\}, \quad (1)$$

$$D = \{\bar{X} | g_k(\bar{X}) \leq 0; k=1, \dots, p; q_k(\bar{X}) = 0; k=p+1, \dots, m; x_i^- \leq x_i \leq x_i^+, i=1, \dots, n\}, \quad (2)$$

где W_j – критерии эффективности; \bar{X} – вектор управляемых параметров; $g_k(\bar{X})$ – функции ограничений. Многокритериальность (1)–(2), $N \neq 1$, вызывает специфическую необходимость анализа множества компромиссно-оптимальных решений $P_W \subset D$:

$$P_W = \{\bar{X}' | \bar{X}' \in D, \{\bar{X} | W_j(\bar{X}) \geq W_j(\bar{X}')\} \cap D = \emptyset\}, \quad (3)$$

где $W_j(\bar{X})$ максимизируется, а \emptyset – знак пустого множества.

Модель решения многокритериальных задач условно может быть представлена в форме некоторого множества:

$$MBO = \langle t, D, \bar{W}, \bar{X}, \{, B, r \rangle, \quad (4)$$

где MBO – модель векторной оптимизации; t – тип решения (выделить один проект из P_W ; выделить несколько компромиссных решений; упорядочить P_W по какому-либо признаку и т.д.); $\{$ – оператор

отображения \bar{X} в $\{W_j\}$, т.е. процедура получения значений $W_j(\bar{X})$; B – множество характеристик, определяющих значимость W_j (весовые коэффициенты и др.); Γ – правила выбора проекта из P_w . В зависимости от степени информированности при проектировании выделяются следующие подходы к реализации МВО (4):

- I. Выделение компромиссно-оптимальных конструкций P_w .
- II. Эвристическое сужение P_w .
- III. Аксиоматизация выбора компромиссного решения с определением его правила Γ .
- IV. Адаптивный подход.

Установлено, что исследования тонкостенных конструкций с позиций задачи (1)–(2) малочисленны и используют, в основном, подходы I–II. Вопросы обоснования конкретных методик решения задач проектирования по моделям (4) в строительной механике практически не рассматривались. На основе обзора литературы определены объект исследования, цель и задачи настоящей работы.

Глава II посвящена разработке методики постановки и решению многокритериальных задач оптимизации ребристых пластин и цилиндрических оболочек, представляющей собой логическую схему рассмотрения взаимосвязанных этапов, направленную на построение рационального компромиссного решения: 1 – выбор критериев эффективности; 2 – определение области компромиссных решений D_w ; 3 – формирование модели компромисса; 4 – поиск рациональной конструкции \bar{X}^c ; 5 – оценка W_j^c, \bar{X}^c .

Выполнены исследования по конкретизации этапов применительно к объектам исследования: аргументировано содержание этапов с учетом особенностей модели векторной оптимизации (4) при неполной информации и расчетных соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние и процессы потери устойчивости конструкции при дискретном расположении подкрепляющих ребер; дано обоснование

применения методов случайного поиска (СП) и построены модифицированные алгоритмы, предназначенные для решения многокритериальных задач по методу формирования обобщенной целевой функции; обосновано применение аксиоматизированной игровой модели компромисса за счет определения типа связей основных критериев эффективности, характеризующих условия неполной информации, и предложен человеко-машинный алгоритм поэтапного формирования решения, обеспечивающий целенаправленное сокращение области P_w .

1. На этапе I в качестве $W_j(\bar{X})$ выбираются критерии эффективности, связанные с определенными и неопределенными факторами. Примером $W_j(\bar{X})$ с неопределенными факторами могут служить показатели надежности или долговечности, когда отсутствуют нормативные требования.

2. При определении области компромисса производится анализ матрицы $[W_{ij}]$, где $W_{ij} = W_i(\bar{X}_j^0)$, $(i, j = \overline{1, N})$, а \bar{X}_j^0 — точка оптимума, когда в качестве целевой функции рассматривается критерий $W_j(\bar{X})$. В случае учета дополнительных требований на $W_j(\bar{X})$ в форме $W_{je}^- \leq W_{je}(\bar{X}) \leq W_{je}^+$, $e \leq N$, для определения области компромиссов необходимо решить задачи нахождения \bar{X}_j^0 таких, что

$$a) W_j^-(\bar{X}_j^0) = \max_{\bar{X} \in \tilde{D}} W_j(\bar{X}); \quad б) W_j^+(\bar{X}_j^0) = \max_{\bar{X} \in \tilde{D}'} W_j(\bar{X}), \quad (5)$$

где $\tilde{D} = D \cap D_w'$, $\tilde{D}' = D \cap D_w''$, $D_w' = \{\bar{X} | W_{je} > W_{je}^+\}$, $D_w'' = \{\bar{X} | W_{je} > W_{je}^-\}$; W_j^- , W_j^+ — "худшая" и "лучшая" оценка W_j соответственно.

3. При формировании модели компромисса в работе, следуя Д.Б.Гермейеру, использован игровой подход:

требуется найти такое значение \bar{X}^c , при котором

$$\Phi[\bar{W}(\bar{X}^c)] = \max_{i \in D} \Phi(W) = \max_{i \in D} \min_j \alpha_j = \max_{i \in D} \rho_j [W_j(\bar{X}) - W_j^-], \quad (6)$$

где $\rho_j = (W_j^+ - W_j^-)^{-1}$, а параметры W^- , W^+ соответствуют условию -

ям (5).

Критерии эффективности (материалоемкость, надежность, долговечность, величины критических напряжений при многовариантном нагружении и др.) обладают свойством взаимной противоречивости: улучшение одного критерия W_q возможно лишь за счет л ю б о г о другого $W_p, p, q \in [1:N]$. Установлено, что для построенной модели взаимосвязей критериев вида

$$\Omega = \{ \bar{W} | W_j \geq W_j^*; j \in \{k, l\}; W_k = 1/f_{kl}(W_l); W_k(e) \in \{W_k^-(e); W_k^+(e)\}; (7) \\ W_j \in [W_j^-; W_j^+]; W_j^* \in \{W_j^-; W_j^+\}, j = \{1, N\} \}$$

где f_{kl} обозначают монотонные зависимости, применение (6) обеспечивает получение единственного компромиссно-оптимального решения, не зависящего от масштабов измерения W_j при соблюдении соотношений: $\alpha_p = \alpha_q, p, q \in [1:N]$. Условие (7) позволяет обсуждать результаты компромисса (6). Более высокая, чем при использовании других видов $\Phi(\bar{W}_n)$, информативность служит логическим обоснованием модели (6) в многокритериальных задачах строительной механики. Приводятся примеры задач, содержательные и некоторые формальные признаки, состоящие в записи условий оптимальности равенствами, обеспечивающие множество Ω и обосновывающие применение (6).

4. При поиске рациональных конструкций, исходя из специфики исследуемых вопросов проектирования, показана приемлемость для практической реализации решений методов СП. Так как усложнение поверхностей уровня обобщенных критериев $\Phi(W_j)$ типа (6) и других и необходимость серии оптимизационных расчетов предьявляют к алгоритмам СП повышенные требования, предложен способ декомпозиции задачи $\text{max} \Phi(\bar{W}_n)$: выделения подмножеств $\{W_{jq}; W_{jp}\}, j, q, jp \in [1:N]$ для отслеживания перспективных направлений поиска компромиссного решения. Построены модифицированные алгоритмы, сущность которых состоит в наложении на известные схемы параметрической адаптации

СП составляющих ΔW_{jq} , ΔW_{jp} вида:

$$\bar{U}^{(k+1)} = \alpha \bar{U}^{(k)} - \Delta \bar{X}_k [\delta_\Phi (\Delta \Phi + d) + \delta_q \Delta \tilde{W}_{jq} \left(\frac{1 - \text{sign} \Delta W_{jq}}{2} \right) - \delta_r \Delta \tilde{W}_{je} \left(\frac{1 + \text{sign} \Delta W_{je}}{2} \right)], \quad (8)$$

где $\bar{U}^{(k)}$ - вектор "памяти" k -го шага поиска; $\Delta \bar{X}_k$ - приращения параметров \bar{X} ; коэффициенты: d ; $\alpha \in [0, 1]$ - забывания; δ_Φ , δ_q , δ_r - скорости адаптации. Исследованы возможности модификации (8) алгоритмов СП с учетом некоторых свойств МВО (4) (равноточивость, активные ограничения и т.п.), а также адаптации в допустимой и недопустимой области поиска.

5. Оценка и принятие компромиссного проекта конструкции (6) реализуется в диалоговом режиме на ЭВМ в виде поэтапного формирования рационального решения многокритериальной задачи. При обосновании метода целенаправленного сокращения исходной области D_W отмечается, что: любое искомое решение $\bar{W}^* \in D_W$, допускаемое связями, получается как реализация (6) путем последовательных коррекций некоторых $W_{p(k)}$: $\{W_{p(k)}^+ \varepsilon_{p(k)}; W_{p(k)}^- \varepsilon_{p(k)}\}$; $\varepsilon_{p(k)} > 0$, $p \in \{1: N\}$, k - номер итерации; благодаря отмеченным свойствам (6)-(7), возможен прогноз компромиссных оценок рациональной, согласно (6), конструкции $\bar{W}_{(k+1)}^c$ при $W_{p(k+1)}^- = W_{p(k)}^- + \varepsilon_{p(k)}$ в виде:

$$W_{p(k)}^c \leq W_{p(k+1)}^c \leq \alpha_{(k)}^c W_{p(k)}^+ + (1 - \alpha_{(k)}^c) W_{p(k+1)}^-; W_{j(k)}^c \geq W_{j(k)}^- + \alpha_{p'}^c \rho_{j'}^c, \quad j \in N / \{P\}, \quad (9)$$

где $\alpha_{p'}^c = (W_{p(k)}^c - W_{p(k+1)}^-) / (W_{p(k)}^+ - W_{p(k+1)}^-) < \alpha_{(k)}^c$; $\alpha_{(k)}^c$ - максимум (6). Соотношения (9) и подобные им позволяют сократить число итераций. Оценки $\bar{W}_{N(k)}^c$ считаются приемлемыми ($\bar{W}_{N(k)}^c \approx \bar{W}_N^*$), если в зависимости от условий проектирования нельзя: указать $\{j_p; \varepsilon_{p(k)}\}$; задать тенденции требуемых изменений $\{W_{j_p}\}$; упорядочить векторы оценок $A_i = A_i(W_{j_p})$, $i = 1, N-1$, связанные с решением вспомогательных задач. В последних двух случаях $\varepsilon_{p(k)}$ формируется автоматически, а рассмотрение $A_i(W_{j_p})$ позволяет выявить наиболее важные критерии $\{j_p(k)\}$. Информационный обмен с ЭВМ при решении задачи регламентируется.

Если для $\{W_j\}$ условие (7) не выполнено, то в рамках метода рассматриваются группы согласованных и противоречивых показателей, выявленные на этапе 2.

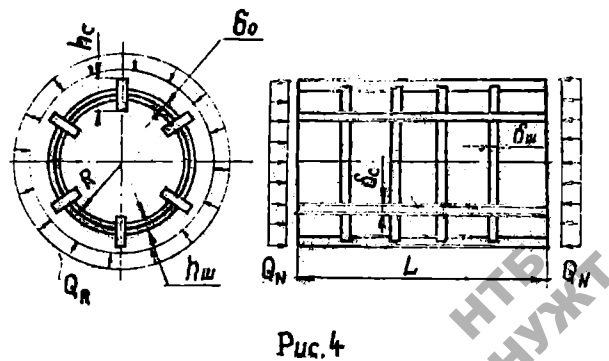
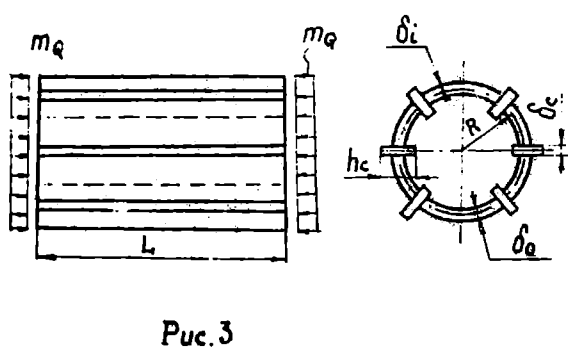
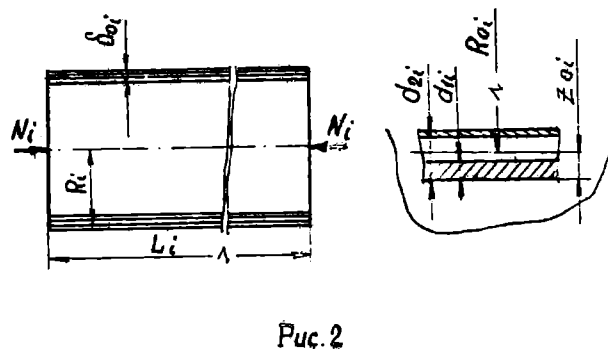
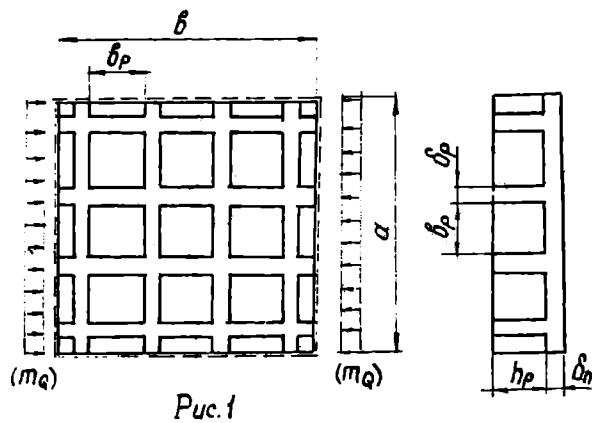
Результативность и общий характер использования разработанных процедур проиллюстрированы на задаче о рациональном нагружении пластины с учетом динамических воздействий и веса.

В главах III-V результаты второй главы использованы для решения задач проектирования при различных видах неполной информации.

В главе III разработаны многокритериальные постановки для оптимизации по весу и трудоемкости изготовления ребристых пластин, скимаемых равномерными торцевыми нагрузками (раздел 3.1, рис.1), а также для совместного проектирования совокупности гладких многослойных цилиндрических оболочек (рис.2), различных по значениям осевых сжимающих нагрузок и размерам (критерии материалоемкости и унификации параметров толщины слоев), в условиях неполноты описания связей характеристик процесса производства.

Предельные состояния (2) задают геометрические ограничения и ограничения по условиям прочности и ютери устойчивости конструкций и их элементов. Использована классическая постановка задачи упругой устойчивости и методика приведения тонких многослойных оболочек к эквивалентным однородным, когда межслоевые сдвиги не рассматриваются. Система ограничений охватывает случаи длинных, средних и коротких оболочек, а также позволяет учесть несовершенство формы для однослойных оболочек. Расчет критических напряжений в задаче о ребристой пластине проведен согласно исследованиям *Mitchell R., Kaplan J.*

Трудоемкость изготовления пластины \bar{K}_T определялась по трудоемкостям для листовой части, ребер и сборки $\bar{K}_T = [T_L, T_R, T_C]'$. Размскивались параметры пластины и подкрепления (рис.1). В качестве компромисса показателей \bar{K}_T и показателя веса K_G использована модель Φ_s : "справедливой уступки", позволяющая перейти к сравнению



относительных уровней затрат \bar{K}_T . Значительная устойчивость параметров рациональной по $\{\bar{K}_T, K_G\}$ конструкции к варьированию коэффициентами значимости $\bar{\lambda}$ составляющих \bar{K}_T и K_G позволила установить область значений $\bar{\lambda}$, для которой рациональный проект получается за один цикл процедуры главы II в рамках Φ_3 .

При исследовании вопросов проектирования множества оболочек (раздел 3.2) в качестве принципа оптимальности векторного критерия $\Phi(\bar{\delta}, \bar{R}) = [F_1; F_2]^T$ с компонентами

$$F_1 = 2\pi \sum_{i=1}^m (L_i K_i \sum_{j=1}^J (\delta_j \delta_{ij} \tilde{R}_{ij})), \quad (10)$$

$$F_2 = F_2(F_{2j}); F_{2j} = 1 + \sum_{i=1}^{m-1} \left[\prod_{p=i+1}^m \text{sign}(\delta_{ij} - \delta_{pj}) \right] \quad (11)$$

использована модель (6), для формирования которой строятся оптимизационные задачи нахождения границ компромиссно-оптимальных проектов, подобные (5). Рассмотрены несколько случаев вычисления характеристики $F_2(F_{2j})$ в зависимости от возможностей учета эффекта унификации. В (10)-(11) обозначено: $L_i, R_i^- \leq R_i \leq R_i^+, K_i, \delta_{ij}, \delta_j^-$, соответственно, - длина, радиус, число оболочек вида i , толщина слоя и плотность материала j -го типа. Разыскиваются параметры $[\delta_{ij}; R_i]$, $R_i L_i = \text{const}$. При реализации (11) вводились дополнительно ограничения связей $\delta_{i_1 j} \approx \delta_{i_2 j} (i_1 \neq i_2; i_1, i_2 \in [1:m]; j \in [1:J])$ вида:

$$\delta_{i_1 j} = \{ \delta_{i_2 j} / (|\delta_{i_1 j} - \delta_{i_2 j}| / \max\{\delta_{i_1 j}, \delta_{i_2 j}\}) \leq \varepsilon_j \}. \quad (12)$$

Поставленные дискретно-непрерывные задачи нелинейного программирования решались методом СП. Найдены области компромиссно-оптимальных проектов; показано, что модель (6) позволяет значительно сократить число различных толщин при приемлемом повышении материалоемкости (с 9 до 4, с 7 до 3; $\Delta F_1 \leq 7\%$ для однослойных оболочек); относительный эффект унификации возрастает с увеличением числа совместно проектируемых оболочек.

В главе IV исследованы вопросы оптимизации ребристых пластин и цилиндрических оболочек с учетом критериев веса, надежности и долговечности в условиях неполной информации о физических характеристиках материала, внешних воздействий, а также об отклонениях при их изготовлении. Показано, что ввиду отсутствия соответствующих рекомендаций и нормативов по выбору допустимой надежности конструкции P и приближенности задания срока эксплуатации T , а также взаимной обусловленности критериев $\{P, T\}$ и показателей экономичности G , векторные модели более полно и точно отражают ситуацию реального проектирования.

В разделе 4.1 рассмотрено проектирование однослойных оболочек в постановке раздела 3.2 (рис.2) при стохастических характеристиках свойств материала (E_w, σ_{T_w}, μ_w - модуль упругости, предел текучести, коэффициент Пуассона, соответственно) и формы $f(R/\delta) \neq 1$. Получены аналитические зависимости случайных величин, представляющих оптимальные параметры R_w, δ_w и вес G_w (при $f(R/\delta) = 1$) и построена векторная модель с упорядоченной совокупностью требований ($f(R/\delta) \neq 1$) вида:

$$\left\{ P_k [q_k(R, \delta, w)] \right\}_{k=\bar{1}, \bar{3}} \succ G(R, \delta, w) \succ f(R/\delta), \quad (13)$$

позволяющая исследовать рациональные проекты по методу последовательных уступок (\succ знак предпочтения). В (13) P_k - вероятностные требования к системе ограничений (2). При реализации E_w, σ_{T_w} считались нормально распределенными величинами; установлена зависимость "активности" ограничений по прочности или устойчивости от $q = E_w / \sigma_{T_w}$; показано, что влиянием μ_w можно пренебречь.

Аппарат оценки надежности по теории выбросов случайных полей из допустимой области, разработанный в работах В.В.Болотина, в разделе 4.2 применялся при рассмотрении класса задач проектирования ребристых пластин и стрингерных многослойных оболочек, для которых существенны флуктуации сжимающих напряжений, создающих гаус-

совское случайное поле $Q(z, t)$, по одной пространственной координате z . Этот подход позволяет учесть временной фактор при определении надежности и представить P в виде:

$$P = 1 - T \frac{C \sqrt{m_{Q_{zz}}'' m_{Q_{tt}}''} (Q^*(\bar{X}) - m_Q)}{(2\pi)^{3/2} m_Q \sigma_Q} \exp\left(-\frac{(Q^*(\bar{X}) - m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right), \quad (14)$$

где $t \in [0, T]$; $z \in [0, C]$; m_Q, σ_Q - математическое ожидание и дисперсия нагрузки, а $m_{Q_{zz}}'', m_{Q_{tt}}''$ - математические ожидания вторых частных производных по z и времени t , соответственно; $Q^*(\bar{X})$ - расчетная нагрузка, определяемая из условия

$$Q^*(\bar{X}) = \min_{1 \leq i \leq K} Q_i(\bar{X}) \quad (15)$$

для K функций ограничений.

Постановка многокритериальной задачи минимизации G и максимизации P и T проводилась по методике главы II-(5). Исследование задач с $\{P, T, G\}$ выполнено посредством модели (6) при проектировании свободно опертых пластин с размерами a и b (рис.1) и при оптимизации параметров шарнирно-опертых трехслойных цилиндрических оболочек длины L и радиуса R симметричного строения (рис.3), подверженных сжатию равномерно распределенными по торцам осевыми нагрузками. В первом случае развязывались $\{\delta_n, \delta_p, h_p, b_p\}$ (постановка раздела 3.1); во втором - толщины слоев δ_i ($i=1,3$), δ_c , h_c и число стрингеров K_c . Показатели веса имели вид:

$$a) V(\bar{X}) = \alpha a b \delta_n \left[1 + \frac{\delta_p h_p}{\delta_n \delta_p} \left(2 - \frac{\delta_p}{\delta_p}\right)\right]; \delta) G(\bar{X}) = 2\pi R \sum_{i=1}^3 \delta_i \delta_c + L K_c \delta_c h_c \delta_c; \quad (16)$$

где $\delta_i, \delta_c, \delta$ - плотности материалов. В выражении (14) для пластины принимались $C = a$, для оболочки $C = 2R$.

При расчете критических нагрузок осевого сжатия рассмотрена линейная постановка задачи устойчивости оболочки и применялся энергетический подход, позволяющий учитывать дискретное расположение ребер жесткости и использовать уравнение совместности деформаций

для гладкой цилиндрической оболочки. Учитывались ограничения по прочности на торцах, а также геометрические ограничения.

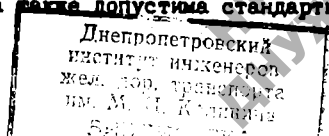
Ввиду того, что K_c - четное целое число, проблема проектирования сведена к частично целочисленной задаче оптимизации.

Численная реализация задач позволила получить рациональные, согласно (6), проекты \bar{X}^c , построить и исследовать область $P_{\bar{w}}$ компромиссно-оптимальных решений и показать, что критерии $\{P, T, G\}$ взаимно противоречивы, удовлетворяют (7). Достигнута высокая эффективность решения \bar{X}^c (увеличение веса до 5 %, снижение надежности до 2 %, а T - до 20-25 % относительно наилучших значений - при одной итерации). Показано, что при $U = \sigma_q / m_q < 0,1$ для оребренных пластин влияние на \bar{X}^c флуктуаций нагрузки незначительно, а для оболочки $var T$ может не рассматриваться. Существенный рост веса $G(P, T = const)$ происходит, если $P > 0,95$, причем для оболочки при $P < 0,95$ зависимость $G(P, T = const)$ близка к линейной. Оптимальная оболочка равноустойчива по всем частным формам потери устойчивости.

Исследована возможность практической реализации проектов \bar{X}^c с учетом отклонений при изготовлении и необходимости выбора параметров оболочек из сортамента - стандартизации. Считая \bar{X}_f случайным вектором, сформулированы и исследованы многокритериальные P - и M -модели задач стохастического программирования, где вместо (16) рассмотрены, соответственно,

$$P) G^* \Rightarrow \min_{\bar{x}_f \in D_x} P[G(\bar{X}_f) \leq G^*] \geq P_G^*; \quad M) M[G(\bar{X}_f)] \Rightarrow \min_{\bar{x}_f \in D_x}, \quad (17)$$

решения которых сопоставлены с результатами проектирования, полученными для детерминированных \bar{X} (M - знак математического ожидания; P_G^* - заданная вероятность). Установлено, что при $P \geq 0,99$, $T \geq 30+35$ лет модели нелинейного программирования с показателями (16) являются удовлетворительными, а ~~также допустима стандартизация~~ \bar{X}^c (увеличение G до 6 %).



В главе У рассмотрены вопросы проектирования цилиндрических оболочек длины L и радиуса R , подкрепленных шпангоутами и стрингерами, оптимальных по весу $V(\bar{X})$ или нескольким критическим нагрузкам, в условиях раздельного воздействия осевой силы Q_M и радиального давления Q_R . Искомыми параметрами \bar{X} являлись: $\delta_0, \delta_c, \delta_w, h_c, h_w$, число стрингеров K_c и шпангоутов K_w (рис.4).

Показано, что в зависимости от целей исследования и информации об условиях эксплуатации многоцелевое применение конструкции обеспечивается введением дополнительных ограничений или формированием многокритериальной задачи проектирования. При заданных нагрузках $\{Q_j\}, j \in \{N, R\}$, минимум $V(\bar{X})$ находится в рамках реализации модели, объединяющей различные ограничения, составленные для каждого вида воздействий, или из условия пересечения активных ограничений. Для исследования вопросов оценки (I8-а) или выбора запаса несущей способности конструкции (I8-б) при нескольких нагрузках $\{Q_j\}_e$ формируются многокритериальные задачи вида:

$$a) \max_j \frac{Q_j^{max} - Q_j(\bar{X})}{Q_j^{max} - Q_j^0} \lambda_j \Rightarrow \min_{\substack{\bar{X} \in D_{\bar{X}} \\ \bar{V} = V_3}}; \quad \delta) \min_j \lambda_j \frac{Q_j'(\bar{X}) - Q_j^0}{Q_j} \Rightarrow \max_{\substack{\bar{X} \in D_{\bar{X}} \\ \bar{V} = V_3}} (I8)$$

где V_3 - заданное или расчетное ($V_3' = C V_0, C > 1$) значение показателя V ; V_0 - минимум $V(\bar{X})$ при $\{Q_j\}_e$; $Q_j^0 = \min_{i,j} Q_{ij} (i, j = \overline{1, \ell})$ - находятся путем максимизации Q_j при $V = V_3$; Q_j^{max} ; коэффициенты λ_j учитывают информацию о частоте возникновения, или возможности изменения нагрузок $Q_j, j \in [1: \ell]$.

Предельные состояния конструкций определялись геометрическими, ограничениями по прочности на торцах и напряжениями потери устойчивости оболочки и ее элементов. Критические напряжения для случая шарнирного опирания рассчитывались с учетом дискретного характера размещения и продольных деформаций ребер в рамках энергетического подхода согласно зависимости:

$$q_p(\bar{X}) = \min_{(q_p)} \min_{(m_o, n)} \eta_{кр(q)}^{(p)}(\bar{X}), \quad (19)$$

где $\eta_{кр(q)}^{(p)}$ - характеристики общего и частных случаев деформации оболочки (q_p) ; $P \in \{N, R\}$; m_o, n - параметры волнообразования. Ограничения по напряжениям учитывали, что нагрузка Q_R при отсутствии изгиба эквивалентна сжимающим усилиям $Q_y = Q_R R$.

Ввиду дискретности подкрепления и (18)-(19) исходная проблема сведена к невыпуклой задаче оптимизации и исследовалась методом случайного поиска. Получены компромиссные проекты ребристых оболочек, анализ которых показывает, что среди рассмотренных воздействий нет доминирующих, а свойства оптимальных по весу оболочек в широком диапазоне $\beta = (2\sigma R L Q_R) / Q_N$ зависят от $\psi = R/L$. При $\psi = 0,25$ лимитирующим были ограничения по прочности на торцах $\sigma_N(\bar{X}) \leq [\sigma_T]$; при $\psi = 0,5$ решение \bar{X}^c определяли условия прочности и напряжения (19) для Q_R , а при $\psi = 0,75$ - напряжения (19) для Q_R . С целью сокращения счета упорядочена система ограничений и установлен способ приближенного задания \bar{X} , пригодный для выбора начальных (стартовых) точек поисковых методов оптимизации. В рамках подхода (18) возможен существенный рост критических нагрузок при приемлемом увеличении показателя V : для $V_0 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 0,8$; $\psi = 0,5$; получены $\{Q_N = 125 \cdot 10^4$ Н, $Q_R = 6,25 \cdot 10^4$ Н/м²\}; для $V' = 1,2 V_0$: $\{Q_N' = 200 \cdot 10^4$ Н, $Q_R' = 10 \cdot 10^4$ Н/м²\}. С расширением области компромиссного выбора эффективность многокритериальных моделей возрастала: так при $V'' = 1,1 V_0$ найдено лишь $\{Q_N'' = 150 \cdot 10^4$ Н; $Q_R'' = 7,5 \cdot 10^4$ Н/м²\}.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана новая методика оптимизации ребристых пластин и цилиндрических оболочек при нескольких критериях эффективности

и неполной исходной информации о внешних воздействиях, геометрических и физических характеристиках, а также при многих вариантах нагружения, позволяющая более полно учитывать требования реального проектирования.

2. Разработаны модификации алгоритмов случайного поиска и дано обоснование применения игровых моделей компромисса для решения многокритериальных оптимизационных задач строительной механики. Предложен новый подход к диалоговому (человеко-машинному) режиму поэтапного формирования рационального решения в условиях многокритериальности и неполной информации.

3. Предложены и реализованы новые, многокритериальные, постановки задач оптимизации конструкций при неполной информации. Установлена высокая эффективность игрового принципа компромисса (максимина) для выбора параметров ребристых пластин и многослойных оболочек по критериям веса, надежности и срока эксплуатации при случайных сжимающих воздействиях, а также для исследования вопросов многовариантного нагружения цилиндрических оболочек, подкрепленных шпангоутами и стрингерами. Показана целесообразность его применения для совместного проектирования совокупности гладких многослойных оболочек, различных по осевым нагрузкам и размерам, на основе показателей материалоемкости и унификации параметров толщин.

4. Исследования показали, что для проектирования ребристых пластин по критериям веса и трудоемкости изготовления может быть рекомендована компромиссная модель оптимальности в форме "справедливой уступки", позволяющая получить решение на основе сравнения относительных оценок затрат критериев эффективности.

5. Построены аналитические решения и многокритериальная модель с упорядоченными критериями эффективности, которая позволяет найти рациональные проекты гладких цилиндрических оболочек со

случайными характеристиками материала и формы при детерминированных или стохастических управляемых параметрах.

6. Изучены закономерности компромиссно-оптимальных (по весу, надежности и сроку эксплуатации) проектов с детерминированными и стохастическими векторами управляемых параметров для стрингерных трехслойных цилиндрических оболочек, и определены области, в которых несущественны отклонения, возможные при их изготовлении; установлено, что оптимальные конструкции равноустойчивы по параметрам общих и частных случаев потери устойчивости.

7. Показано, что при многовариантном нагружении конструкций вопросы оценки и выбора запаса несущей способности сводятся к решению многокритериальных задач проектирования. Исследования оптимальных ребристых цилиндрических оболочек, подкрепленных шпангоутами и стрингерами, свидетельствуют об отсутствии доминирующей нагрузки при равномерном сжатии конструкций осевым или радиальным давлением. Предложены способы упорядочения системы ограничений и выбора начальных (стартовых) точек, позволяющие повысить эффективность процедур оптимизации параметров ребристых оболочек.

8. Показано, что с расширением условий неполной информации и области компромиссного выбора (увеличением диапазона неопределенности требований к надежности и долговечности, увеличением запаса несущей способности по многовариантным нагрузкам, увеличением числа управляемых параметров в задачах унификации и т.п.) повышается эффективность многокритериальных моделей.

9. На основе выполненных исследований разработаны алгоритмы и программы оптимизации для ЭВМ. Результаты работы внедрены на Воткинском машиностроительном заводе с получением определенного экономического эффекта.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

НТБ
ДНУЖТ

1. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Об одной векторной модели задачи оптимального проектирования оболочек. - Строительная механика и расчет сооружений. 1979, № 5, с.17-20.

2. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Обобщенная модель оптимизации скатых цилиндрических оболочек со случайными параметрами. - Известия ВУЗов. Машиностроение. 1979, № 6, с.10-14.

3. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Об игровом подходе при постановке задач оптимального проектирования конструкций. - В сб.: Пространственные конструкции в Красноярском крае. Красноярск, 1979, вып. 12, с.95-103.

4. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Векторная модель оценки оптимального проекта подкрепленной пластины. - Известия ВУЗов. Авиационная техника. - Казань, 1980, № 4, с.64-87.

5. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Об одной модели согласования требований в многокритериальных задачах проектирования конструкций. - В сб.: Прочность и надежность технических устройств. - Киев: Наукова думка, 1981, с.38-45.

6. Герасимов Е.Н., Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Многокритериальные задачи теории оптимального проектирования конструкций (обзор) - В сб.: Динамика и прочность тяжелых машин. - Днепропетровск, 1981, вып. 6, с.101-111.

7. Почтман Д.М., Скалозуб В.В., Харитон Л.Е. Выбор оптимальной надежности подкрепленных трехслойных оболочек при случайных воздействиях. - В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюзный межвузовский сборник.-Горький, 1981, с.102-107.

8. Скалозуб В.В. Некоторые процедуры случайного поиска в задачах проектирования конструкций при нескольких показателях эффективности. - М.: ЦИНИС, 1980, вып. 4, - II с., № 1985 ДЕП.

9. Скалозуб В.В. Оптимальное проектирование ребристых цилиндрических оболочек как многофункциональных систем. - В сб.: Векторная и скалярная оптимизация конструкций. - Ижевск, 1981, вып. I, с. 97-105, ВИНИТИ, № 4962-81 ДЕП.

10. Скалозуб В.В. Некоторые проблемы многокритериальной оптимизации в задачах строительной механики конструкций. - В сб.: Векторная и скалярная оптимизация конструкций. - Ижевск, 1981, вып. I, с.85-96, ВИНИТИ, № 4982-81 ДЕП.

11. Почтман Д.М., Скалозуб В.В., Харитон Л.Е. Многокритериальные задачи оптимального проектирования континуальных систем при случайных воздействиях. - В кн.: Проблемы оптимизации: Тез. докл. Всесоюзной конференции. - Вильнюс, 1979, с.90-92.

12. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Автоматизированные процедуры постановки и решения некоторых многокритериальных задач оптимального проектирования. - В кн.: Современные методы и алгоритмы расчета и проектирования строительных конструкций: Тез. докл. Всесоюзной конференции. - Таллин, 1979, с.75-77.

13. Почтман Д.М., Скалозуб В.В. Стохастические методы оптимизации в многоцелевых задачах проектирования пластин и оболочек. - В кн.: Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. - Алма-Ата, Наука, 1981, с.294.

14. Почтман Д.М., Скалозуб В.В., Харитон Л.Е. Векторная оптимизация конструкции полта ваву, сполтаивости а часу превадзкы при наhodnych. - Slavebnicky časopis, 1979, No. 27, č. 11, s. 825-837.

Скалозуб Владислав Васильевич

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК
В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ
01.02.03- строительная механика**

**Подписано к печати 22.02.82. БТ.61097. формат 60x84/16. Бумага
для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л. I,34.
Уч.-изд.л. I. Тираж 100 экз. Заказ № 882. Бесплатно.**

**Участок оперативной полиграфии ДИИТа. 320629, ГСП, Днепропетровск,
Ю, ул. Акад.В.А.Лазаряна, 2.**

Сканировала Камянская Н.А.

**НТБ
ДНУЖТ**