

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА имени М.И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

М А Л О В Виталий Дрьевич

УДК 624.04

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЕВЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
УПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЧЕТКИХ ТРЕБОВАНИЙ
И ОГРАНИЧЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

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

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Государственном проектном институте Днепрпроектотальконструкция и Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени 300-летия воссоединения Украины с Россией.

- Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент ПОЧМАН Ю.М.
- Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор ДИХТЯРЬ А.С.
кандидат технических наук,
доцент СКАЛОЗУБ В.В.
- Ведущая организация — Ижевский механический институт.

Защита диссертации состоится "10" ФЕВРАЛЯ 1989 г.
в "15" часов на заседании специализированного совета
К ДП4.07.02 при Днепропетровском ордена Трудового Красного
Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени
М.И. Калинина. Отзывы на автореферат просим направлять по адресу:
320700, г.Днепропетровск-10, ул. Лазарина, 2, ДИИТ, Ученому
секретарю совета К ДП4.07.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "10" ЯНВАРЯ 1989 г.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темн. Одной из приоритетных научно-технических задач является дальнейшее освоение космического пространства, его использование в мирных целях для решения важных научных и экономических проблем. В настоящее время ведется перспективное проектирование пространственных стержневых крупногабаритных упругих конструкций (КУК), являющихся ослорными каркасами различных устройств, предназначенных для функционирования в околоземном пространстве (солнечные электростанции, космические радиотелескопы, ретрансляторы радиосвязи лов и т.д.). К числу перспективных способов формообразования таких конструкций относятся их синтез в виде стержневых структурных плит гексагонального очертания с пирамидой в качестве периодического элемента.

КУК обладают рядом специфических особенностей: значительными габаритными размерами, достигающими сотен метров; специфическими требованиями к динамическим характеристикам; отсутствием опорных закреплений; весьма высокой стоимостью, связанной с затратами на транспортировку к месту эксплуатации. Эти особенности в сочетании с необходимостью обеспечения чрезвычайно высокой надежности конструкции обуславливают актуальность постановки и решения задачи оптимального выбора параметров КУК.

Статический и динамический расчеты КУК, имеющих сложную топологию и содержащих до нескольких тысяч стержневых элементов, требуют больших ресурсов ЭВМ. Поэтому для решения задач оптимизации КУК, связанных с многократным расчетом конструкции при варьировании параметров, целесообразно использовать упрощенные расчетные схемы, сочетающие относительную простоту с достаточной точностью. Выбор рациональной расчетной схемы КУК является самостоятельной, достаточно важной задачей. В диссертационной работе он осуществляется путем сравнения результатов экспериментального исследования малоразмерной геометрически подобной модели КУК с данными ее динамического расчета по различным схемам.

Отсутствие действующих аналогов, а также апробированных методов и норм проектирования, стохастический характер нагрузок приводят к появлению в задаче оптимизации КУК фактора неопределенности, который необходимо учитывать при формализации требований к конструкции. Это обуславливает целесообразность применения математического аппарата, позволяющего корректно описывать

элементы математической модели оптимального проектирования КУК (ограничения и критерии) при наличии неопределенности. Эффективным является применение в данном случае теории нечетких множеств (ТНМ), которая в последнее время нашла широкое применение при исследовании разнообразных проблем принятия решений. Использование ТНМ при оптимальном проектировании конструкций (ОПК), в частности - КУК, позволяет существенно повысить степень адекватности математической модели оптимизации реальной системе предпочтений проектировщика, учесть его практический опыт, не поддающийся описанию в традиционной детерминированной форме. Необходимо отметить, что методы постановки и решения задач оптимизации конструкций с нечетко описанными целями и ограничениями освещены в литературных источниках крайне ограниченно.

Цель работы - разработка методики оптимального проектирования КУК при наличии нечетко сформулированных требований к конструкции и изучение влияния структуры оптимизационной модели на результаты ее реализации.

Основные задачи исследования:

- разработать эффективную методику оптимального проектирования конструкций с учетом факторов неопределенности на основе математического аппарата ТНМ;
- с помощью экспериментально-теоретического исследования малоразмерной модели КУК изучить вопросы выбора рациональной расчетной схемы для определения динамических характеристик конструкции в задачах ОПК;
- разработать и исследовать новые математические модели для оптимального проектирования КУК, учитывающие требования к их прочностным, динамическим и конструктивным характеристикам;
- получать существенную для инженерной практики информацию об оптимальных проектах КУК и их зависимости от генеральных размеров конструкции, величины действующих нагрузок, структуры предъявляемых к конструкции требований;
- создать программное обеспечение ЭВМ, предназначенное для решения задач ОПК при наличии нечетких целей и ограничений, а также для осуществления автоматизированной обработки результатов динамических испытаний конструкций.

Научная новизна работы:

- разработана общая методика формирования и решения задач строительной механики, связанных с оптимальным проектированием конструкций в условиях неопределенности на основе математическо-

го аппарата теории нечетких множеств, в частности — для крупногабаритных упругих конструкций;

- с помощью малоразмерной стержневой модели осуществлено экспериментально-теоретическое исследование различных схем для динамического расчета КУК гексагонального очертания; обоснован выбор рациональной расчетной схемы для решения задач оптимального проектирования конструкций этого типа;

- аналитически и экспериментально изучено влияние граничных условий на динамические характеристики КУК;

- получена новая информация об оптимальных проектах КУК и исследована зависимость их параметров от величин нагрузок, генеральных размеров и структуры требований к конструкции.

Практическое значение:

- разработанная методика постановки и решения задач ОПК с нечетко сформулированными требованиями к конструкции может быть применена к широкому классу инженерных конструкций с целью повышения эффективности соответствующих математических моделей оптимизации;

- выполненное в работе экспериментально-теоретическое сравнение различных расчетных схем КУК с непрерывными и дискретными параметрами позволяет оценить степень достоверности результатов динамического расчета по каждой из них и определить возникающие при их реализации погрешности в вычислении собственных форм и частот конструкции;

- полученные данные об оптимальных проектах КУК и их зависимости от нагрузок, генеральных размеров и требований к конструкции могут быть использованы при разработке натурных образцов стержневых КУК;

- разработанное математическое обеспечение ЭИМ может эффективно использоваться для решения широкого класса нечетко сформулированных задач ОПК, а также для автоматизированной обработки результатов динамических испытаний конструкций.

Достоверность результатов

Достоверность результатов оптимизации параметров КУК подтверждается применением известных методов строительной механики и теории нечетких множеств, а также сравнением (где это возможно) характеристик полученных в диссертационной работе оптимальных проектов с результатами опубликованных в литературе исследований. Достоверность экспериментальных исследований обеспечена использованием современных приборов и оборудования, эффективными

способами обработки и анализа полученных данных, а также методологическим обеспечением экспериментов.

На защиту выносятся:

- методика постановки и решения многокритериальных задач оптимального проектирования конструкций при наличии нечетких целей и ограничений;
- результаты экспериментально-теоретического исследования динамических характеристик КУК гексагонального очертания с помощью геометрически подобной модели конструкции;
- результаты оптимизации параметров КУК.

Внедрение результатов

Результаты исследований использованы при выполнении научно-исследовательской работы № 86-3-380 в Московском инженерно-физическом институте. Методика и программное обеспечение для ОПК при наличии нечетко сформулированных требований к конструкции использованы в ГИ Днепропроектстальконструкция при разработке типового альбома "Стальные конструкции одноэтажных производственных зданий с применением блоков покрытий размером 12х24 м с нерегулярным шагом стропильных ферм. Технические решения" (объект 4588 КМ), а также при проектировании корпуса № 201 Белоцерковского завода сельскохозяйственного машиностроения им. I Мая. Экономический эффект от внедрения составил 20,5 тыс. руб.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- всесоюзной конференции "Проблемы оптимизация и надежности в строительной механике" (Вильнюс, 1983);
- Всесоюзной научно-технической конференции по проектированию судовых корпусных конструкций "Корпус-83" (Николаев, 1983);
- Межреспубликанской научной конференции "Модели выбора альтернатив в нечеткой среде" (Рига, 1984);
- VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Ташкент, 1986);
- I и II Всесоюзных школах молодых ученых и специалистов "Проблемы оптимизации в машиностроении" (Харьков-Алушта, 1983, 1986);
- Всесоюзном научно-техническом совещании "Экспериментальные исследования и испытания строительных металлоконструкций" (Львов, 1987);
- научных семинарах "Оптимальное проектирование конструкций, ма-

шин и приборов" факультета Научного Совета АН УССР по проблеме "Кибернетика" при Приднепровском научном центре (научный руководитель – академик АН УССР В.И. Моссоаковский, Днепропетровский, 1983, 1986, 1988);

- IX научно-технической конференции молодых специалистов Всесоюзного объединения "Сорбметаллоостройнипроект" (Жданов, 1985).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Объем работы и дополнительные сведения

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 91 наименование, и приложений. Объем работы составляет 115 страниц машинописного текста, 50 рисунков и 20 таблиц.

Исследования по теме диссертационной работы выполнялись в соответствии с договором между Московским инженерно-физическим институтом и Государственным проектным институтом "Днепропроектотальконструкция" № ОНИС-528 от 01 июня 1987 г. по теме "Разработка проекта и испытание модели крупногабаритной упругой стержневой металлической конструкции с целью определения ее динамических характеристик и обеспечения помехоустойчивости".

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе рассматриваются особенности расчета и оптимизации параметров КВК. Приводится обзор работ советских и зарубежных исследователей; отмечается, что существенный вклад в развитие теории ОПК внесли Н.В. Баничук, Г.И. Брызгалов, В.Б. Гринев, А.С. Дехтярь, В.В. Козляков, В.А. Комаров, И.Б. Лазарев, В.П. Малков, В.Я. Михайлищев, В.Л. Нарусберг, Ю.М. Почтман, Л.А. Растрян, Н.Н. Складнев, Н.Н. Столяров, Ф.Г. Шамиев и другие ученые. Разработкой методов оптимального проектирования КВК занимались А.С. Гвамичава, Б.В. Сазыкин, М.М. Якушин, а также М.С. Андерсон, У.Г. Буш, В. Грин, М. Микулас, А.К. Нур, Р. Райан, Д. Хеджес.

Сложность реализации дискретной расчетной схемы КВК не позволяет использовать ее в оптимизационных алгоритмах, предполагающих многократный расчет напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик конструкции в процессе поиска оптимального проекта. Необходима ее замена упрощенными расчетными схемами. Для обоснования выбора таких схем предлагается осуществить эксперимен-

тажно-теоретическое исследование малогабаритной стартовой модели КУК.

Существенной трудностью при проектировании КУК является отсутствие действующих аналогов, а также статистических данных, характеризующих процесс эксплуатации подобных конструкций. Эти факторы неопределенности требуют широкого использования не только объективной, но и субъективной экспертной информации, относящейся к рассматриваемой проблеме. Эффективным математическим аппаратом для формулировки и решения задач, характеризующихся наличием неопределенности, являются методы ТМ. Основные концепции ТМ выдвинуты Л.А. Заде; дальнейшее развитие эта теория получала в работах советских исследователей А.Н. Борисова, В.Б. Жуковина, А.И. Орлова, С.А. Озловского, Д.Н. Шапаро и др., а также зарубежных авторов А. Кофмана, К.В. Негойце, К. Танаки, Х. Циммермана и др. В главе приводятся основные положения ТМ, классифицируется использование нечетких подходов для решения технических задач, анализируются некоторые варианты формирования нечеткой многокритериальной задачи принятия решений.

Во второй главе с использованием аппарата ТМ разрабатывается многокритериальная модель оптимизации параметров КУК.

В традиционной (четкой) постановке многокритериальная модель ОПК имеет вид:

$$\begin{cases} \bar{F} = \{f_k(\bar{X}) \rightarrow \text{opt}, & k = 1, \dots, s\}, \\ g_j(\bar{X}) > 0, & j = 1, \dots, p, \\ h_j(\bar{X}) = 0, & j = p+1, \dots, m, \\ \bar{X} \in E^n, \end{cases} \quad (I)$$

где $\bar{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор варьируемых параметров в n -мерном евклидовом пространстве E^n , $f_k(\bar{X})$ - частные критерии качества, $\bar{F}$ - вектор критериев качества, $g_j(\bar{X})$ и $h_j(\bar{X})$ - ограничения в виде неравенств и равенств. Основные концепции предлагаемого в диссертации подхода к формированию задач ОПК таковы:

- ограничения $g_j(\bar{X})$ и $h_j(\bar{X})$, а также критерии $f_k(\bar{X})$ описываются в идентичной математической форме и называются "требованиями к конструкции";

требования к конструкции могут быть четкими или нечеткими; в обоих случаях они выражаются функциями предпочтения, заданными в пространстве E^n .

- предполагается, что все требования имеют одинаковую важность для лица, принимающего решение (ЛПР), то есть оценки ЛПР исчерпывающим образом описываются функциями предпочтения (нормировка критериев коэффициентами важности отсутствует)

- процесс получения оптимального решения является интерактивным и итерационным: получая промежуточные результаты, ЛПР имеет возможность вносить коррективы в форму функций предпочтения или изменять область поиска;

- нечеткая субъективная информация, имеющаяся у ЛПР, привлекается для формирования задач ОПК с помощью методов сбора и анализа экспертных данных.

Параметрические ограничения формализуются при помощи нечеткого множества допустимых значений параметра с функцией предпочтения:

$$\mu_{c_i}(x_i) \rightarrow [0; 1], \quad x_i \in \bar{X}, \quad (2)$$

где величина $\mu_{c_i}(\tilde{x}_i)$ служит характеристикой субъективной относительной предпочтительности значения параметра $x_i = \tilde{x}_i$. Функциональные ограничения в нечеткой задаче ОПК имеют вид:

$$g_j(\bar{X}) > b_j, \quad h_j(\bar{X}) = b_j, \quad (3)$$

где b_j - нечеткая переменная с функцией принадлежности $\mu_j(b_j): \{b_j | b_j \in B, \mu_j(b_j) \rightarrow [0; 1]\}$, характеризующей возможность (с точки зрения ЛПР) нарушения четкой формы функционального ограничения на величину b_j . Представление частных критериев качества в нечеткой задаче ОПК зависит от уровня и характера информации, имеющейся у ЛПР. В диссертационной работе рассматриваются три случая:

1. ЛПР способен указать для критерия $f_i = f_i(\bar{X})$ допустимые границы изменения $f_i(\bar{X}) \in [f_i^-; f_i^+]$, а также наилучшее, по его мнению, из возможных значений в этом интервале f_i^* (субоптимальное значение). Тогда для критерия $f_i(\bar{X})$ принимается линейная, кусочно-непрерывная функция предпочтения $\mu_i(f_i)$

$$\mu_i(f_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } f_i \in (-\infty; f_i^-); \\ \frac{f_i^* - f_i^-}{f_i^* - f_i^-}, & \text{если } f_i \in [f_i^-; f_i^*]; \\ \frac{f_i^* - f_i}{f_i^* - f_i^*}, & \text{если } f_i \in [f_i^*; f_i^+]; \\ 0, & \text{если } f_i \in (f_i^+; \infty). \end{cases} \quad (4)$$

2. ЛПР опосредованно не только указать субоптимальное значение критерия f_i^* , но и количественно оценить допустимые отклонения величины f_i от этого значения. Тогда в качестве функции предпочтения принимается:

$$\mu_i(f_i) = \mu_i(u), \quad u = f_i - f_i^*, \quad (5)$$

значения которой могут быть получены непосредственно путем экспертного оценивания.

3. ЛПР может оценить значения критерия в некоторой количественной шкале, например, в баллах. В этом случае функция предпочтения имеет вид:

$$\mu_i(f_i) = \frac{Z_i - Z_{i \min}}{Z_{i \max} - Z_{i \min}}, \quad (6)$$

где $Z_{i \min}$, $Z_{i \max}$ — минимальная и максимальная балльные оценки.

В качестве интегрального критерия качества предлагается принять обобщенную нечеткую оценку варианта проектного решения, которая является пересечением нечетких множеств (2)–(6) и характеризуется функцией предпочтения $\mu_g(\bar{X})$:

$$\mu_g(\bar{X}) = \min \left\{ \mu_\varphi(\bar{X}), \min_{j=1, m} \mu_j(b_j), \min_{i=1, n} \mu_i(f_i(\bar{X})) \right\}, \quad (7)$$

где $\mu_\varphi(\bar{X}) = \min \mu_{c_i}(x_i)$. Условие оптимальности проекта эквивалентно требованию максимизации значения $\mu_g(\bar{X})$

$$\mu_g(\bar{X}) \rightarrow \max_{\bar{X} \in E^*} \quad (8)$$

Задача оптимизации параметров КУК, сформулированная в виде (2)–(8), включала следующие основные требования к конструкции: обеспечение прочности и устойчивости стержневых элементов в процессе вынужденного перемещения КУК; требования к низкой собственной частоте колебаний конструкции и соотношению между этой частотой и низкой частотой колебаний стержневого элемента; требования к длинам стержневых элементов, связанные с обеспечением геометрической формы конструкции и условиями транспортировки элементов к месту сборки; конструктивные требования к размерам поперечных сечений стержней; условие минимизации относительной массы конструкции γ (массы КУК, отнесенной к ее "площади", заданной генеральными размерами). Модель ОНК КУК включала 4 четких и 6 нечетких требований к конструкции. Вектор варьируемых параметров со-

держал длины и размеры сечений стержневых элементов (все сечения предполагались кольцевыми, тонкостенными).

В третьей главе рассмотрена возможность применения различных расчетных схем для определения динамических характеристик КУК. Реализация этих схем выполнялась применительно к малогабаритной, геометрически подобной модели конструкции (рис. I), состоящей из 418 стержневых и 109 узловых элементов.

Определены 6 низших собственных частот и форм модели по расчетной схеме в виде круглой изотропной пластины постоянной толщины, для чего использовалось дифференциальное уравнение колебаний осесимметричных тонких пластин. При определении параметра расчетной схемы обеспечивалась эквивалентность изгибной жесткости и габаритных размеров пластины соответствующим характеристикам модели.

С помощью метода конечных элементов (МКЭ) выполнены расчеты по схеме в виде гексагональной изотропной пластины, также эквивалентной конструкции по жесткости и размерам (число конечных элементов — 136, размерность глобальной матрицы — 225). Построена конфигурация 10 низших собственных форм и вычислены соответствующие им собственные частоты.

Алгоритм МКЭ использован также для расчета динамических характеристик модели по стержневым схемам, отличающимся свойствами узловых соединений (шарнирные и жесткие) и количеством степеней свободы в динамике (от 48 до 105).

В качестве граничных условий для всех расчетных схем было принято жесткое защемление модели в центральной зоне. Кроме того, для дискретной расчетной схемы с жесткими узлами определены собственные формы и частоты конструкции при имитации нулевых граничных условий. Для этого во все узловые точки вводилась связь малой жесткости, в совокупности эквивалентные упругому основанию, имеющему большую податливость.

Анализ результатов расчета показал, что 10 низших собственных частот модели лежат в диапазоне 0—65 Гц; гексагональная конфигурация модели вызывает появление кратных собственных форм (сопадающих по частоте, но различных по конфигурации). При изменении условий закрепления конструкции (переход от жесткого защемления в центральной зоне к "квазисвободным" условиям) зафиксирована инвариантность собственных форм, имеющих проходящие через центр конструкции оси симметрии (сохраняется как конфигурация форм, так и соответствующие им значения собственных частот). Формы с максималь-

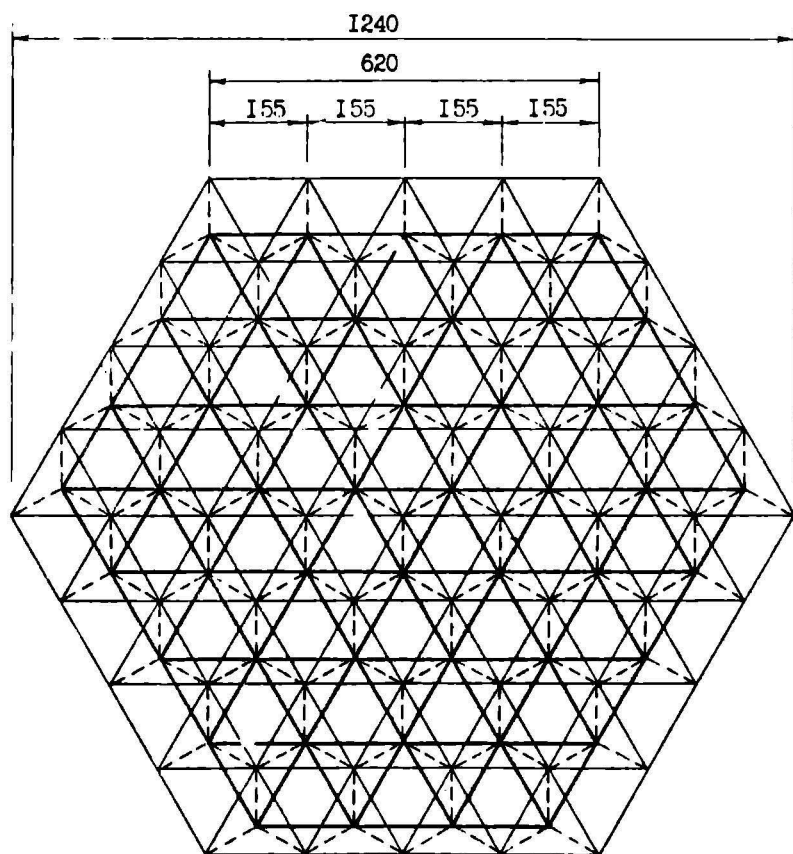


Рис. 1. Модель стержневой крупногабаритной упругой конструкции

НТБ
ДНУЖТ

ными амплитудами колебаний в центральной зоне проявляются только при имитации нулевых граничных условий.

В четвертой главе осуществлена экспериментальная проверка результатов аналитического определения динамических характеристик модели КУК, выполненного в третьей главе. Поскольку целью эксперимента являлось лишь сравнение методик расчета КУК (без цели непосредственного перехода от параметров модели к параметрам натурной конструкции), моделирование было ограничено геометрическим подобием. Модель выполнена из стали, все элементы имеют антикоррозионное покрытие. Удержание стержней в узлах осуществляется за счет сил трения. При необходимости модель можно трансформировать, изменяя ее массу и геометрические параметры (узловые элементы являются сборно-разборными). Для динамических испытаний был изготовлен стенд в виде жесткой пространственной рамы, в котором модель располагалась вертикально, что практически исключало влияние ее веса на изгибные деформации. Измерения и аналоговая регистрация колебаний модели КУК осуществлялись специально разработанной для этой цели многоканальной, бесконтактной измерительной системой на базе фотоэлектрических преобразователей Ф54С. В качестве регистратора использовался магнитоэлектрический осциллограф КОЮ с гальванометрами типа МО17. Метрологические исследования параметров системы позволили установить, что для нее диапазон измеряемых перемещений составляет 0-50 мм, рабочий частотный диапазон 0-70 Гц, нелинейность амплитудно-частотной характеристики не превышает 3 %, чувствительность регистрации составляет 0,05 мм на 1 мм осциллограммы, основная относительная погрешность измерения перемещений - до 1 %, относительная погрешность измерения частоты колебательного процесса - до 2 %.

Возбуждение колебаний модели КУК осуществлялось вибрационным способом - при помощи микроэлектродвигателя с регулируемой частотой вращения ротора, а также способом начального смещения. Во втором случае на модель накладывались дополнительные связи, которые затем "мгновенно" убирались. Первый способ позволял зафиксировать стационарные моногармонические колебания модели в резонансных режимах, второй способ - затухающие полигармонические свободные колебания. Сочетание двух способов обеспечивало возможность возбуждения колебаний в диапазоне 8-64 Гц.

Для обработки результатов динамических испытаний модели КУК была разработана автоматизированная система на базе микро-ЭВМ

"Искра-226". Аппаратурное и программное обеспечение системы позволяло преобразовывать экспериментальные данные из аналоговой формы в дискретную, вводить их в ЭВМ, выявлять и исправлять аномальные значения и осуществлять спектральный анализ зарегистрированных колебательных процессов.

Анализ экспериментальной информации, полученной при динамических испытаниях модели КУК, закрепленной в центральной зоне, позволял установить 9 собственных частот модели и для четырех из них идентифицировать собственные формы (№ I, 4, 5, 6). Имитация нулевых граничных условий выполнялась путем подвески модели в отходе на длинных тонких нитях, практически не препятствовавших ее изгибным колебаниям. Длина нитей выбиралась таким образом, чтобы частота колебаний системы "нить-модель" (как маятника) была на порядок ниже первой собственной частоты изгибных колебаний модели.

Сопоставление результатов аналитического и экспериментального определения динамических характеристик КУК показало, что:

1. Из шести рассмотренных в главе III расчетных схем КУК наиболее достоверными являются: а) стержневая схема с жесткими узлами и степенями свободы в динамике, заданными во всех узлах, кроме опорных; б) изотропная пластина гексагонального очертания. Для них показатель, характеризующий среднее расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями собственных частот в исследованной части спектра, составил 9,9 % и 14,2 % соответственно.

2. Для собственных форм колебаний КУК, имеющих проходящие через центр оси симметрии, два вида граничных условий – закрепление в центральной зоне и освобождающая конструкция – являются эквивалентными относительно соответствующих величин собственных частот и конфигураций форм.

3. Собственная форма колебаний КУК, соответствующая низшей собственной частоте, для конструкции с нулевыми граничными условиями характеризуется наличием двух осей симметрии.

Для ра четной схемы КУК в виде пластины гексагонального очертания в диссертационной работе получена аналитическая зависимость между спектром собственных частот и вектором варьируемых параметров оптимизационной задачи. Для использования этой схемы достаточно выполнить динамический расчет КУК по алгоритму МКЭ только один раз. Указанное обстоятельство делает ее в задачах ОПК более предпочтительной, чем дискретные стержневые схемы.

В пятой главе определены и исследованы оптимальные параметры КУК. При этом использовалась модель ОПК (7)-(8'), разработанная в главе II, в сочетании с расчетной схемой в виде гексагональной пластины, свойства которой изучены в главах III и IV.

С учетом особенностей функции $\mu_6(\bar{X})$ - в общем случае она является нелинейной, недифференцируемой и невыпуклой - для решения задачи (8) применялся алгоритм сканирования нечеткого пространства параметров с помощью многомерной псевдослучайной ЛП-последовательности, значения которой вычислялись по методу И.М. Соболя и Р.Б. Статникова. Для реализации алгоритма было разработано соответствующее математическое обеспечение ЭВМ.

Установлена зависимость между геометрическими характеристиками элементов, определяющими оптимальный проект КУК, и генеральными размерами конструкции (которые зависят от функционального назначения КУК и в вектор варьируемых параметров не входят).

Изменение генеральных размеров КУК оказывает существенное влияние только на размеры сечений наклонных элементов. Связь между оптимальной высотой конструкции (расстоянием между плоскостями) и ее генеральными размерами близка к линейной (табл. 7).

Таблица I

Генеральный размер КУК	Оптимальный проект $\bar{X}^{opt}$					$\eta(\bar{X}^{opt})$	$\mu_6(\bar{X}^{opt})$
	z_0^{opt}	z_1^{opt}	l_0^{opt}	l_1^{opt}	t^{opt}		
м	м	м	м	м	м · 10 ⁻³	кг/м ²	
200	0,0531	0,0674	7,16	11,76	0,947	0,494	0,497
250	0,0582	0,0646	7,32	11,60	0,923	0,491	0,470
350	0,0659	0,0643	7,71	11,40	0,896	0,505	0,440
450	0,0907	0,0644	8,57	11,80	0,872	0,522	0,394

z_0, z_1 - радиусы сечений стержневых элементов, t - толщина сечения; l_0, l_1 - длины стержневых элементов; η - относительная масса КУК; μ_6 - обобщенная оценка оптимального проекта $\bar{X}^{opt}$, определяемая согласно (7).

Исследовано влияние отдельных нечетко сформулированных требований к конструкции на результаты ОПК. Наиболее "жесткими" оказались при этом требования к относительной массе КУК и толщине сечения стержневого элемента. В диапазоне генеральных размеров от 200

до 450 м относительная масса η , изменялась от 0,494 до 0,52 кг/м^2 , что достаточно хорошо коррелирует с результатами, полученными в работах Х.Г. Буша, А.С. Гвамичавы, Б.В. Сазыкина. Определено влияние на результаты ОПК ограничений на максимальный линейный размер стержневого элемента и величину квазистатической нагрузки на конструкцию. Установлено, что наибольший эффект в плане улучшения характеристик конструкции способно дать уменьшение толщины сечения стержневых элементов при обеспечении их защиты от внешних воздействий и выполнении условий общей и местной устойчивости.

В приложении представлены: а) тексты программного обеспечения, разработанного для решения задач ОПК при наличии нечетких требований; б) тексты программного обеспечения, предназначенного для автоматизированной обработки результатов динамических испытаний; в) документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель задачи оптимального проектирования КУК, содержащая требования к ее прочностным, динамическим и конструктивным характеристикам. Вектор варьируемых параметров содержит длины и размеры сечений стержневых элементов. Ограничения и критерии качества сформулированы в виде четких и нечетких множеств с функциями предпочтения, определяемыми с привлечением экспертной информации.

2. Разработана основанная на ТНМ методика решения задач ОПК при наличии нечетко заданных целей и ограничений, а также реализующее ее программное обеспечение ЭВМ, использующее сканирование пространства варьируемых параметров с помощью многомерной ЛП_с - последовательности.

3. Осуществлено экспериментально-теоретическое исследование расчетных схем, предназначенных для определения динамических характеристик КУК. С этой целью изготовлена малоразмерная геометрически подобная модель конструкции, содержащая 418 стержневых и 109 узловых элементов. Для динамических испытаний модели разработаны многосканальная бесконтактная оптическая измерительная система, устройства для определения ее метрологических характеристик, а также испытательный стенд. Создана автоматизированная система обработки и анализа экспериментальных данных на базе микро-ЭВМ.

Экспериментально определены 9 низших собственных частот колебаний конструкции, для четырех из них идентифицированы собственные формы.

4. Результаты опытов сопоставлены с данными расчета модели по 6 расчетным схемам (трем с распределенными и трем с дискретными параметрами). Установлено, что наилучшее совпадение теоретических и экспериментальных данных обеспечивается расчетными схемами в виде изотропной пластины гексагонального очертания и в виде стержневой системы с жестким соединением элементов и степенями свободы, заданными во всех узлах, кроме опорных. Для первой из них установлена аналитическая связь между спектром собственных частот и вектором варьируемых параметров, что позволяет эффективно использовать эту схему в задачах оптимизации КЖК, где в процессе поиска оптимального проекта динамический расчет конструкции осуществляется многократно.

5. Определены и исследованы оптимальные параметры КЖК. Установлена их зависимость от генеральных размеров конструкции, величины нагрузок и структуры требований, входящих в задачу ОПК.

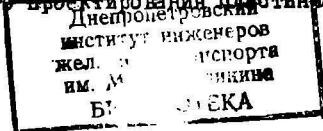
6. Результаты проведенного экспериментально-теоретического исследования расчетных схем КЖК и оптимизации ее параметров позволяют повысить качество проектных решений при разработке конструкций данного класса. Предлагаемая методика ОПК с нечеткими целями и ограничениями обеспечивает возможность постановки и решения оптимизационных задач с привлечением субъективной экспертной информации, что существенно повышает уровень обоснованности и адекватности соответствующих математических моделей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Малов В.Ю. К вопросу об оптимальном проектировании конструкций в условиях неопределенности // Проектирование судовых корпусных конструкций (КОРПУС-83). Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. - Николаев. - 1983. - С. 58-59.

2. Малов В.Ю. Нечеткий подход к формированию расчетных схем конструкций в задачах оптимального проектирования // Методы и системы принятия решений. Прикладные задачи анализа решений в технических системах. - Рига: РПИ. - 1986. - С. 41-44.

3. Малов В.Ю. Формирование многофакторной модели принятия решений для оптимального проектирования пластинато-стержневой кон-



струкции // Проблемы оптимизации в машиностроении. Тезисы Второй Всесоюзной школы молодых ученых и специалистов. - Харьков. - 1986. - С. 112.

4. Малов В.Ю. Автоматизация обработки результатов натурных динамических испытаний сооружений при случайных стационарных воздействиях // Всесоюзное научно-техническое совещание "Экспериментальные исследования и испытания строительных металлоконструкций" (ЭИИСМ-87). Тезисы докладов. - Львов. - 1987. - С. 152.

5. Малов В.Ю., Почтман Ю.М. Об одном подходе к формированию моделей задач оптимального проектирования конструкций в условиях неопределенности // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. - Горький: ГГУ. - 1986. - С. 117-124.

6. Малов В.Ю., Почтман Ю.М. Нечеткие модели многофакторного оптимального проектирования конструкций // Модели выбора альтернатив в нечеткой среде. Тезисы докладов межреспубликанской научной конференции. - Рига: РИИ. - 1984. - С. 155-156.

7. Малов В.Ю., Почтман Ю.М. Многофакторные задачи оптимального проектирования и теория нечетких множеств // Проблемы прочности. - 1985. - № 11. - С. 91-96.

8. Малов В.Ю., Почтман Ю.М., Сазыкин Б.В., Якушин М.М. Оптимальное проектирование крупногабаритных упругих конструкций по нескольким критериям качества в условиях неопределенности // М.: Препринт МИФИ, 078-85. - 1986. - 20 с.

9. Малов В.Ю., Сазыкин Б.В., Якушин М.М. Оптимальное проектирование крупногабаритных оборных конструкций в условиях неопределенности // VI Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. - Ташкент. - 1986. - С. 439.

10. Почтман Ю.М., Малов В.Ю. О применения теории нечетких множеств к задачам оптимального проектирования конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1983. - № 4. - С. 30-34.

В.Ю. Малов
АНТБ
ДНУЖТ

МАЛОВ ВИТАЛИЙ ПРЬЕВИЧ

**"Оптимизация параметров стержневых крупногабаритных
упругих конструкций при наличии нечетких требований
и ограничений на динамические характеристики"**

(автореферат)

БГ № 70311. Подписано к печати 20.12 88.

Формат 60x84 1/16. Бум. тип. № 1. Офс. печ.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100

Зказ 1845 Бесплатно.

Областное управление статистики

320091 г.Днепропетровск, ул.Столярова, 3