

М 454348

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н. Э. БАУМАНА



На правах рукописи

ПОЧТМАН Юрий Михайлович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ
ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ**

**01.02.06 — Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Днепропетровском инженерно-строительном институте.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. СВЕТЛИЦКИЙ В.А.
д.т.н., проф. ГРИНЕВ В.Б.
д.т.н., проф. ФИЛИН А.П.

Ведущая организация -

указана в решении Совета

Защита состоится на заседании специализированного совета
Д 059.15.08 при МВТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., 5. "18" июня 1987 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э. Баумана.

1/1 1987 г.

В. Дубинин

M454898



1457548

Почтман Ю.М. Развитие теории

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Оптимальное проектирование конструкций (ОПК) является сейчас одним из наиболее актуальных направлений в технике, тесно связанным с решением важнейшей народнохозяйственной проблемы снижения стоимости, материалоемкости и повышения эффективности конструкций, применяемых в различных отраслях машиностроения, поставленной в директивных документах Партии и Правительства.

Интенсивное развитие этого направления обусловлено появлением в последние годы новых методов математического программирования (МП) для решения экстремальных задач и открывшейся в связи с этим возможностью их численной реализации на современных ЭВМ.

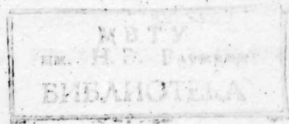
Для успешного решения научных и практических проблем, возникающих в теории и практике ОПК, необходима, во-первых, разработка и адаптация методов МП к конкретным оптимизируемым объектам, позволяющая наиболее полно учесть их особенности, а также получить решение соответствующих задач. Во-вторых, требуется создание адекватных математических моделей для оптимизации широкого класса стержневых систем, пластин и оболочек, отражающих последние достижения механики деформируемого твердого тела.

Новые задачи ОПК связаны с необходимостью изучения структуры различных механических систем, с разработкой методов выделения оптимальных систем, учитывающих особенности конкретной задачи и условия работы конструкции, с изучением свойств оптимальных систем и законов синтеза различных сооружений в широком плане.

Дальнейшее развитие теории и методов ОПК: разработка новых моделей для проведения многоплановых исследований по проблеме оптимизации в механике, применение аппарата методов МП к решению вопросов оптимального проектирования различных инженерных конструкций с использованием ЭВМ является также важной общенаучной задачей.

Тема диссертации включена в "Комплексную научную программу АН СССР по разработке основ механики деформируемого твердого тела и методов решения новых классов задач на 1975-1985 гг.", а также является частью координационного плана исследований АН СССР на 1980-1985 гг. по проблеме "Механика твердого деформируемого тела" (подсекция "Строительная механика конструкций").

Цель работы. Разработка комплекса поисковых математических методов, хорошо адаптированных к особенностям скалярных и векторных задач МП, возникающих при ОПК машин и аппаратов.



Создание общих моделей для весовой оптимизации широкого класса стержневых систем, пластин и оболочек сложной структуры – в форме моделей задач МП, а также частных моделей для конкретных типов этих конструкций и видов воздействий на них. Проведение обширного численного эксперимента на ЭВМ по реализации этих моделей, с целью изучения свойств соответствующих оптимальных проектов и выявления резервов оптимизации.

Исследование возможностей создания новых постановок и математических моделей для решения задач оптимального проектирования приспособляющихся конструкций как задач МП.

Разработка общих подходов и моделей для оптимизации конструкций по критериям надежности, адекватных современному уровню теории надежности, а также частных моделей – для наиболее распространенных в машиностроении видов конструкций.

Расширение в концептуальном плане возможностей многокритериального (МК) подхода к задачам ОПК. Синтез МК моделей задач оптимизации для основных элементов машиностроительных конструкций, с учетом последних достижений механики деформируемого тела, теории надежности и, на этой основе, изучение связей различных критериев качества, а также свойств оптимальных проектов.

Научная новизна и практическая ценность. Научная новизна диссертационной работы состоит:

- в исследовании вычислительных особенностей современных методов МП, разработке новых, и адаптации известных их алгоритмов к разнообразным сложным задачам ОПК;
- в создании с единых позиций принципиально новых математических моделей и оригинальных методик для оптимального (по различным критериям) проектирования широкого класса стержневых систем, пластин и оболочек, при разнообразных силовых воздействиях, в статическом и динамическом режимах работы, с учетом последних представлений механики деформируемого тела о поведении материала этих конструкций;
- в получении существенно новой для современного машиностроения информации о работе и свойствах оптимально запроектированных конструкций и разработке на ее основе соответствующих практических рекомендаций для проектной практики;
- в решении новых, проблемных, имеющих самостоятельное значение задач по оптимизации стержневых и континуальных систем, с привлечением последних достижений науки в области исследования операций, теории принятия решений и теории надежности.

Научные результаты работы использованы на предприятиях и в проектных организациях машиностроительного и строительного профиля

при проектировании и создании оптимальных конструкций и сооружений для различных отраслей народного хозяйства. Годовой экономический эффект от внедрения предложенных разработок в народное хозяйство составил 765,1 тыс. рублей.

Достоверность результатов. Во всех случаях, где это было возможно, автором проведены сравнения полученных результатов с данными других работ и получено удовлетворительное совпадение результатов. Достоверность основных результатов диссертации также подтверждается их внедрением в практику проектирования реальных конструкций, с получением соответствующего экономического эффекта. Кроме того, на различных этапах работы обоснованность результатов определяется применением апробированных в научной литературе теорий строительной механики, описывающих напряженно-деформированное состояние, а также процессы потери устойчивости и колебаний рассматриваемых конструкций, фундаментальными положениями и известными методами математического анализа, исследования операций и численными методами МП.

Апробация работы. Результаты диссертации доложены и получили одобрение на следующих Международных, Всесоюзных и Республиканских конференциях, совещаниях и научных семинарах:

На Международной конференции ИАСС по обобщенным пространственным конструкциям (Алма-Ата, 1977), на II Международной конференции "Оптимальное управление - теория и применение" (Лейпциг, 1980), на У Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Алма-Ата, 1981), на II Всесоюзном съезде по теории машин и механизмов (Одесса, 1982), на УШ, IX, X и XI Всесоюзных конференциях по теории оболочек и пластин (Ростов-на-Дону, 1971, Ленинград, 1973, Кутаиси, 1975, Харьков, 1977), на III, IV и V Всесоюзных конференциях по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1971, 1978, 1985), на VI и VII Всесоюзных конференциях по применению ЭВМ в механике деформируемого твердого тела (Ленинград, 1972, Ташкент, 1975), на Всесоюзных конференциях "Проблемы оптимизации в механике твердого деформируемого тела" (Вильнюс, 1969, 1974), на Всесоюзных конференциях "Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике" (Вильнюс, 1979, 1983), на IV Всесоюзной конференции по проблемам устойчивости в строительной механике (Харьков, 1972); на I и II Всесоюзных конференциях "Надежность и долговечность машин и приборов" (Кушымов, 1981, 1984), на VI и VII Всесоюзных конференциях по прочности и пластичности (Москва, 1975, Пермь, 1983), на II Всесоюзной конференции по оптимальному управлению в механических системах (Казань, 1978), на Всесоюзной конференции "Проблемы нелинейных колебаний механических систем" (Киев, 1978), на Всесоюзной конференции "Современные ме-

тоды и алгоритмы расчета и проектирования конструкций с применением ЭВМ" (Таллин, 1979), на Всесоюзной конференции "Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций" (Горький, 1984), на Всесоюзной конференции по проблеме "Оптимизация конструкций при динамических нагрузках" (Тарту, 1979), на Всесоюзной конференции "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" (Москва, 1983), на IV и V Всесоюзных конференциях по механике полимерных и композитных материалов (Рига, 1980, 1983), на IX и X Всесоюзных акустических конференциях (Москва, 1977, 1983), на V и VI Всесоюзных симпозиумах по экстремальным задачам (Горький, 1971, Таллин, 1973), на Всесоюзном симпозиуме по нелинейной теории пластин и оболочек (Казань, 1980), на Всесоюзном симпозиуме "Новые методы расчета на прочность и надежность" (Николаев, 1972), на Всесоюзном симпозиуме по численным методам в строительной механике корабля (Николаев, 1976), на Всесоюзной конференции по проектированию судовых корпусных конструкций (Николаев, 1983), на I Всесоюзном симпозиуме "Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика" (Кутаиси, 1985), на I Всесоюзном симпозиуме по математическим методам в механике деформируемого твердого тела (Москва, 1984), на II Всесоюзном семинаре "Численные методы нелинейного программирования" (Харьков, 1976), на I и II Всесоюзных научно-технических семинарах "Оптимизация технических систем" (Новосибирск, 1976, Винница, 1979), на XI Всесоюзной школе-семинаре по методам статистической оптимизации и их приложениям (Ишкар-Ола, 1974), на Научной сессии Советской национальной комиссии Международной ассоциации по пространственным конструкциям ИАСС (Тбилиси, 1971), на Республиканской конференции "Надежность и долговечность строительных машин" (Днепропетровск, 1979), на Республиканской конференции "Теория расчета многослойных панелей и оболочек" (Днепропетровск, 1975), на зональных научно-технических конференциях "Проблемы проектирования и внедрения рациональных конструкций и сооружений в условиях Дальнего Востока и БАМ" и "Снижение материалоемкости конструкций" (Хабаровск, 1976, 1977), на научных семинарах кафедр: "Строительная механика" МИСИ им. В.В. Куйбышева (1979, 1983), "Сопротивление материалов" КПИ (Киев, 1983), "Динамика и прочность машин" ХПИ им. В.И. Ленина (Харьков, 1980, 1981), К-5 МВТУ им. Н.Э. Баумана (1980, 1985), а также на научно-технических конференциях и научных семинарах кафедр ДИСИ и ДГУ (1967-1985 гг.).

Публикации. В области теории оптимального проектирования конструкций диссертант является автором свыше 200 опубликованных научных работ (в том числе 6 монографий); список основных работ

по теме диссертации помещен в конце автореферата. В публикациях с соавторами (аспирантами и учениками) диссертанту лично принадлежат: постановка проблемы, создание моделей для всех рассмотренных задач и прогнозирование возможных путей их решения, методология проведения исследований, анализ полученных результатов и формулировка основных научных выводов.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и приложений. Основной текст диссертации изложен на 282 страницах. Кроме того, в работу входят 50 иллюстраций, 28 таблиц и библиографический список, включающий 381 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении, на основе изучения опубликованных обзоров (в том числе - обзоров автора [2, 6, 12, 14, 26, 32, 43, 44, 58]) и работ анализируется современное состояние исследуемой проблемы, формулируются цели и задачи диссертации.

Отмечается, что в развитие теории и методов ОПК значительный вклад внесли работы советских ученых: В.В. Васильева, А.И. Виноградова, Н.В. Баничука, С.И. Богомолова, В.В. Болотина, Г.И. Брызгалина, Е.Н. Герасимова, В.Б. Гринева, Э.Р. Даниелова, А.С. Дегтяря, С.П. Дорошенко, Э.И. Иеги, И.Б. Лазарева, Ю.Р. Лепика, К.А. Лурье, В.П. Малкова, Д.А. Мацлявичуса, В.Я. Михайлидзе, Ю.В. Немировского, И.Ф. Образцова, А.М. Проценко, И.М. Рабиновича, Л.А. Растргина, М.И. Реитмана, А.Р. Ржаницына, Р.В. Рикардса, Н.Д. Сергеева, С.А. Тимашева, В.А. Троицкого, А.П. Филина, А.П. Чимаса, А.А. Чираса, Ф.Г. Шамиева, Г.С. Шапиро, Д.В. Юдина и др., а также зарубежных исследователей: Р. Беллмана, Л. Диксона, Р. Калабы, В. Прагера, С. Чжу, Ф. Гоффа, Э. Палнера, Э. Васютинского, Ф. Ниордсона, П. Педерсона, Э. Мруза, Е. Хауга, Н. Ольхоффа, В. Венкайя, Л. Шмидта, В. Пирсона и других.

Указывается, что как в СССР, так и за рубежом, развитием методов МП и созданию на их базе эффективных вычислительных алгоритмов для ЭЦВМ в последние годы уделяется большое внимание. Эти методы начинают занимать прочное место, наряду с другими методами анализа, в ОПК. В то же время, существующие стандартные алгоритмы основных методов МП (нелинейного и динамического программирования, случайного поиска и др.) недостаточно приспособлены для решения сложных задач, возникающих при ОПК, и не учитывают их специфику. Отсутствуют эффективные поисковые алгоритмы для решения МК задач ОПК. Становится очевидной необходимость синтеза общих моделей для весовой оптимизации стержневых систем (как с упругой, так и с неупругой ра-

ботой их материала), а также привлечения методов МП для оптимизации по другим критериям оптимальности (в частности, по энергетическим экстремумах).

Несмотря на актуальность проблемы, работ по весовой оптимизации конструктивных элементов машин типа пластин и оболочек сложной структуры (многослойных, ребристых, с отверстиями и т.д.) как при статическом и динамическом нагружении, так и в условиях их взаимодействия со сложной средой (в потоке жидкости, газа и т.д.), еще мало. Необходимы комплексные исследования по созданию общих оптимизационных моделей в рамках МП для указанных систем, с последующей модификацией применительно к частным видам конструкций и условиям их работы.

В последнее время повысился интерес к расчету с учетом приспособляемости — в связи с внедрением в практику расчетов по предельным состояниям — однако наблюдается диспропорция между имеющимися математическими предпосылками решения задач приспособляемости (в виде основных ее теорем и т.д.) и малоизученными задачами ОПК.

Одним из наиболее важных направлений интенсивно развивающейся сейчас теории надежности конструкций является оптимизация конструкций с учетом критериев надежности. Сочетая методы и принципы теории ОПК и теории надежности, можно отыскивать наиболее экономичные и совершенные в техническом отношении решения; несмотря на перспективность такого подхода, работ, посвященных этому вопросу, все еще недостаточно.

Детально рассмотренные в обзоре новые направления исследований позволяют также сделать вывод, что МК — постановки задач ОПК находятся сейчас на ранней стадии развития, причем поток информации по теории МК — задач и ее применению к ОПК непрерывно увеличивается.

Главные трудности приложения векторной оптимизации к ОПК связаны с постановками задач, отвечающими реальным запросам машиностроительной практики, выбором системы критериев и обоснованием разумного компромиссного решения.

Эти соображения и выводы послужили основой для выбора цели и постановки задач настоящего исследования.

Первая глава диссертации посвящена разработке и адаптации алгоритмов математического программирования для задач ОПК и в идейном смысле содержит теоретические основы для проведения последующих исследований по обсуждаемой проблеме.

Предложен и строго математически обоснован ряд вариантов алго-

ритмов независимого случайного поиска (СП), хорошо адаптированных для решения многоэкстремальных задач, с различными способами построения плотности распределения случайных проб:

а) алгоритм скользящего эллипса (АСЭ); б) неблуждающий алгоритм с направляющей сферой; в) алгоритм с неравномерной деформацией плотности распределения пробных точек.

Для класса задач ОПК, математическая модель которых представляет собой задачу нелинейного программирования с ограничениями типа неравенств, построен эффективный алгоритм СП, использующий АСЭ. Так как в большинстве случаев оптимизационные задачи сводятся к общим задачам МП (т.е. с ограничениями типа неравенств и равенств), то в этой главе синтезирован также ряд сглаживающих рандомизированных алгоритмов, которые, в частности, при своей работе используют только значение целевых функций:

а) алгоритм СП с аппроксимировавшим сферическим параболоидом;

б) поисковый алгоритм с аппроксимирующей поверхностью второго порядка;

в) алгоритм глобального поиска "с возвратом при неудачном шаге";

Предложены и доказаны теоремы, оценивающие эффективность, точность и сходимость этих алгоритмов; разработаны практические схемы для их реализации на ЭВМ; а также даны рекомендации об областях их рационального применения в ОПК.

Разработан алгоритм дискретно-непрерывного СП с самообучением для задач МП с нестационарными ограничениями, часто встречающихся при оптимизации конструкции с учетом потери устойчивости. Основная рекуррентная формула для формирования вектора памяти в этом алгоритме имеет вид:

$$W_i^{(j)} = \xi W_i^{(j-1)} - E \Delta G \Delta x_i - E_1 \Delta g \Omega \Delta x_i. \quad (I)$$

Здесь $\Delta x_i = X_i^j - X_i^{j-1}$; $\Delta g = g(X^j) - g(X^{j-1})$ - изменение величины управляющего ограничения; ΔG - приращение целевой функции; $\Omega = I$ при $\Delta g < 0$ и $\Omega = 0$ - в противном случае; ξ , E , E_1 , соответственно, параметры забывания и обучения. Доказана лемма, из которой вытекает, что если функции $G(X)$ и $g(X)$ непрерывно дифференцируемы в некоторой ε -окрестности точки X^* , то при работе с алгоритмом (I) вектор W стремится перестроиться в направлении антиградиента,

т.е. в среднем поиск будет направлен в сторону быстрого уменьшения функции цели. На тестовых задачах показано, что этот алгоритм при наличии нестационарных ограничений является более эффективным, чем традиционные алгоритмы СП, обладает высокой скоростью сходимости и достаточной точностью вычислений.

Разработаны также некоторые алгоритмы метода динамического программирования (ДП) применительно к тем задачам ОПК (при небольшом числе фазовых координат), для которых управляемый процесс является марковским, а критерии оптимальности обладают свойством аддитивности.

Как известно, при использовании алгоритмов дискретного ДП возникают значительные вычислительные трудности, связанные с ограниченным объемом памяти ЭВМ. Для их преодоления, на основе анализа особенностей некоторого класса задач оптимизации (тракуемых как задачи "распределения ресурсов"), доказана лемма и сконструирован специальный поисковый алгоритм, при использовании которого число членов последовательности Беллмана на каждом шаге значительно меньше, чем при использовании стандартных алгоритмов. Это, в свою очередь, позволяет максимально снизить затраты машинного времени.

Предложена, видимо впервые, идея совместного использования двух универсальных методов — ДП и СП, которая позволила в полной мере выявить основные преимущества каждого из методов при оптимизации широкого класса конструкций.

Значительное внимание в этой главе уделено разработке и исследованию специализированных алгоритмов СП, содержащих процедуры структурной адаптации и предназначенных для повышения эффективности нахождения экстремумов обобщенных критериев в задачах оптимизации конструкций с несколькими целевыми функциями $f_j(x)$.

Пусть функции $\{f_j(x)\}$, $\Phi[f_j(x)]$ минимизируются и η_k — точка траектории поиска, где $\Phi[f_j(\eta_k)] < \Phi[f_j(\eta_{k-1})]$. При выборе направления поиска в точке η_k используется, наряду с информацией о принципе оптимальности $\Phi(\cdot)$, также информация о некоторых критериях $\{f_{rk}(\eta_k)\}$. Считая, что $\{f_{rk}(x)\}$ представляет собой порождающую задачу в η_k , а $\Phi[\{f_j(x)\}]$ — возмущенную, детализированную модель, алгоритм параметрической адаптации определяется следующим образом:

$$W^{(K+1)} = \alpha W^{(K)} - \delta_p \Delta X_K (\Delta \Phi + d) - \delta_p \Delta X_K \Delta f_{jp} \times \\ \times \left(\frac{1 - \operatorname{sign} \Delta f_{je}}{2} \right) + \delta_e \Delta X_K \Delta f_{je} \left(\frac{1 + \operatorname{sign} \Delta f_{je}}{2} \right) \quad (2)$$

Здесь $W^{(K)}$ - вектор памяти K -го шага поиска; $\Delta \Phi$, Δf_{jp} , Δf_{je} - приращения, соответствующие возмущенной и порождающей задачам на K -ом шаге; $\alpha \in [0, 1]$ - коэффициент забывания, d - некоторая постоянная; δ_p , δ_e - коэффициенты забывания, $\delta_p = \delta_e = 0$, алгоритм (2) переходит в известный алгоритм Л.А. Растригина.

Сформулирована л е м м а, характеризующая распределение направлений вектора $W^{(K)}$, и позволяющая для алгоритма (2) подстраивать поисковую систему в антиградиентном направлении. Проведенный численный эксперимент убедительно продемонстрировал хорошее быстроедействие предложенного алгоритма и его большую эффективность при решении МК задач оптимизации.

Во второй главе рассматриваются вопросы оптимизации у п р у г и х и неупругих с т е р ж н е в ы х с и с т е м с помощью разработанных алгоритмов МП, а также некоторые вариационные задачи механики, часто встречающиеся при проектировании элементов машин и приборов, в которых критерием оптимальности служит минимум потенциальной энергии деформаций. Предложены общие математические модели для расчета упругих гибких стержней - в форме задач МП. Метод ДП используется для исследования больших прогибов стержней в геометрически нелинейной постановке. Задача сводится к минимизации функционала потенциальной энергии деформированного стержня:

$$E = \int_0^l F(\varphi, \varphi') ds, \quad (3)$$

$$\text{где } F(\varphi, \varphi') = \frac{1}{2} (\varphi')^2 + \frac{P_1}{EJ} \cos(\varphi + \delta_1) + \frac{P_2}{EJ} \cos(\varphi + \delta_2) + \frac{m\varphi}{EJ} + k\varphi - \frac{k^2}{2};$$

k - переменная кривизна стержня; φ - угол наклона касательной к упругой линии; P_1 , P_2 , m - внешние нагрузки.

Устанавливается, что здесь роль фазовой координаты играет величина φ , а управления - φ' . Интерпретируя данную задачу как протекающий во времени дискретный многошаговый процесс, получены функциональные уравнения ДП (применительно к прямому стержню постоянной жесткости, сжатому одной силой: $k = 0$; $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = 0$; $m = 0$) в виде:

$$f_K(c) = \min \{ F(c, \varphi'_K) \Delta + f_{K-1}(c^*) \}; \\ c^* = c + \Delta \varphi'_K; c = \varphi_K; K = 1, 2, \dots, N; \\ f_0(c) = 0; F(c, \varphi'_K) = \frac{1}{2} (\varphi'_K)^2 + P \cos c; \quad (4)$$

где Φ' - пространство управлений; $N \cdot \Delta = 1$.

Реализация на ЭВМ системы (4) дает возможность найти искомую оптимальную траекторию φ^{opt} , соответствующую деформированному состоянию гибкого стержня при заданной нагрузке. Далее предлагаемый способ развивается на случай гибких стержней с непрерывно или ступенчато изменяющейся по длине жесткостью. Построены графики, характеризующие деформированные состояния таких стержней в зависимости от закона изменения жесткости, величины внешней нагрузки и т.д. Исследованы сложные нелинейные задачи теории гибких стержней, когда имеются ограничения на деформации, а также поведение гибких стержней, "наматывающихся" на абсолютно жесткие шаблоны, уравнение поверхности которых известно. Изучена также краевая задача о равновесии гибких стержней с переменной длиной.

Синтезированы общие модели весовой оптимизации для статически определимых однопролетных балок в двух формах: как задача МП (модель А) и задача оптимального управления (модель Б). С их помощью и на основе адаптированных поисковых алгоритмов решены новые задачи по оптимизации упругих балок при наличии ограничений на напряжения, деформации, а также динамические и частотные характеристики, которые позволили получить существенную информацию о поведении и свойствах оптимальных проектов.

Для оптимального проектирования изгибаемых балок, подверженных ползучести, с использованием модели Б получена система функциональных уравнений в виде:

$$f_N(\dot{\omega}_N, \dot{\omega}'_N) = \min \{ h_N \Delta + f_{N-1}(\dot{\omega}_{N-1} + f_{N-1}(\dot{\omega}_{N-1}, \dot{\omega}'_{N-1})) \}; N=1,2,\dots, M_0; f_0=0, \quad (5)$$

где
$$\dot{\omega}_{N-1} = \dot{\omega}_N - \Delta \dot{\omega}'_{N-1}; \dot{\omega}'_{N-1} = \dot{\omega}'_N + B \left(\frac{2n+1}{2\theta_0 n} \right)^n |M_{N-1}|^n \frac{\text{sign } M_{N-1}}{h^{2n-1} (X_{N-1})},$$

$\dot{\omega}$ - скорость прогиба; M - изгибающий момент; B и n - константы ползучести; h - высота балки. Система (5) в диссертации реализована с помощью алгоритма, основанного на совместном использовании методов СП и ДП.

В последнем параграфе этой главы рассмотрены некоторые вопросы отыскания оптимальных по весу очертаний шарнирно-стержневых систем типа Фери.

Третья глава диссертации посвящена оптимальному проектированию подкрепленных и многослойных пластин при статическом и динамическом нагружении.

Широкий класс задач оптимального проектирования подкрепленных и многослойных пластин сведен к следующей модели задачи математического программирования по отысканию минимума качества конструкции, изображаемого функцией параметров проектирования, с учетом предельных условий, сформулированных в виде ограничений на поведение конструкции (ограничения поведения), а также при ограничениях на величины параметров (побочные ограничения). Требуется найти:

$$\min F(A_k); \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

при условии, что

$$L_i(A_k) \leq B_i(A_k) \leq U_i(A_k); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

и

$$A_k^L \leq A_k \leq A_k^U \quad (8)$$

где F - функция качества; A_k - вектор параметров конструкции, M - число этих параметров; $B(A_k)$ - матрица ограничений на поведение конструкции; $L(A_k)$ и $U(A_k)$ - соответственно, нижняя и верхняя границы поведения; N - число ограничений поведения; A_k^L и A_k^U - соответственно, нижняя и верхняя границы оптимизируемых параметров конструкции (эти пределы могут быть функциями параметров или постоянными величинами).

Принципиальные трудности при решении таких задач заключаются в том, что, в общем случае - это сложные нелинейные и невыпуклые задачи математического программирования, причем основным источником нелинейностей в неравенствах (7) являются физические соотношения, составляемые в предположении упругой работы материала. Для формирования соотношений (7) в этой главе диссертации в каждом конкретном случае либо выведены аналитические соотношения, либо использованы соответствующие методы дискретизации, в том числе, метод конечных элементов (МКЭ).

Рассмотрены вопросы оптимизации для изгибаемых трехслойных пластин в самой общей постановке - когда наружные слои выполнены из различных материалов (металл), а в качестве легкого заполнителя применяется легкий пенопласт. Отмечено, что в процессе оптимизации происходит перераспределение несущей роли материалов: уменьшается толщина заполнителя и увеличивается толщина внешних слоев; при нагружении нагрузкой произвольного вида оптимальному проекту уже не будет соответствовать симметричная структура пластины, Показано

что выигрыш в весе следует искать в конструкциях с легкими пенопластами сравнительно малой жесткости.

Предложены модели для оптимизации широкого класса пластин, нагруженных в своей плоскости (осевое сжатие): ребристых пластин вафельного типа при упругой и неупругой работе материала и трехслойных пластин.

Для указанного класса пластин исследован также вопрос учета при их оптимальном проектировании таких факторов, как сохранение конструкции устойчивости, ее способность выдерживать значительные нагрузки после выпучивания и т.д., которые вскрывают дополнительные резервы ее несущей способности. Предложена новая механическая модель оптимизируемых упруго-пластических вафельных пластин (с учетом дискретного расположения подкрепляющих ребер) для случая, когда критическое напряжение превышает предел пропорциональности. Энергетическим способом выведены (для формирования ограничений по устойчивости) зависимости для критических напряжений, в рамках теории малых упруго-пластических деформаций. Результаты численного эксперимента позволили сделать вывод, что оптимальные проекты, полученные по описанной методике, позволяют снизить вес конструкции до 10% (по сравнению с проектами, полученными в предположении упругой работы материала).

Построены модели задачи математического программирования для весовой оптимизации трехслойных панелей при продольном сжатии. Обсуждение и постановка оптимизационной задачи, а также ее решение выполнены, без ущерба для общности подхода, применительно к конструкциям с основным заполнителем.

Исследования показали, в частности, что на вес оптимальной панели существенное влияние оказывают начальные несовершенства, особенно стрела симметричной погиби внешнего слоя. Предлагаемый способ может быть применен как для оптимизации бесконечно широких трехслойных пластин, так и для пластин конечных размеров.

Предложена специальная методика решения задач оптимального проектирования пластин при описании их напряженно-деформированного состояния с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Предлагаемая методика сводится к следующему:

а) рассматриваемая конструкция представляется в виде дискретной конечноэлементной модели; б) формулируется задача поиска оптимальных параметров модели как задача математического программирования с ограничениями в виде матричных схем МКЭ; в) решается задача оптимального проектирования с помощью специального экстраполяционного алгоритма, каждая итерация которого заключается в построении и нахождении оптимальной точки аналитической вспомогательной задачи матема-

тического программирования.

Такой подход значительно сокращает количество обращений к матричным процедурам МКЭ для получения результата с требуемой точностью. Получены оптимальные проекты для следующих видов сжатых ребристых пластин: подкрепленных ортогональной сеткой ребер, ослабленных большим прямоугольным вырезом (расположенным симметрично и несимметрично относительно одной из осей симметрии пластины), а также для пластин с отверстиями, подкрепленными окаймляющими ребрами или замкнутой рамой.

Рассмотрены вопросы оптимизации пластин, подкрепленных сеткой ребер, при ограничениях на собственные частоты колебаний. Проведенные исследования показали, в частности, что в оптимальных проектах прямоугольных пластин продольные ребра практически не работают, а в квадратных — уже включаются в работу и их число становится равным числу поперечных ребер.

Показано, что задача оптимального (по быстродействию) управления колебаниями пластин может быть представлена в виде модели задачи математического программирования. Реализация полученной модели осуществлена на основе предварительной дискретизации, с использованием конечно-разностной аппроксимации по временной и пространственной координатам. Выведено модифицированное конечно-разностное уравнение для нулевого временного слоя и, далее, построена в общем виде система уравнений состояния управляемого объекта. Проведен численный эксперимент на ЭВМ, позволивший для задач сравнительно большой размерности (10–15 неизвестных параметров, 150–300 ограничений) получить весьма существенные для практики проектирования зависимости перемещений для любых точек исследуемых пластин, возмущающей нагрузки и управляющего воздействия от безразмерного времени устранения соответствующей формы колебаний, а также исследован характер перемещений пластин в различные моменты процесса оптимального управления колебаниями.

В четвертой главе обсуждаются вопросы оптимального проектирования и многослойных, композитных и подкрепленных оболочек в условиях сложных видов воздействий. Установлено, что при оптимальном проектировании многослойных, подкрепленных и композитных оболочек критические напряжения становятся функцией не только параметров обшивки и подкрепления, но и числа полуволн в окружном и осевом направлениях, образующихся при потере устойчивости, которые, в свою очередь, также зависят от варьируемых параметров оболочки. Следовательно, область поиска становится нестационарной:

ограничения, накладываемые на такую область, "дышат".

В диссертации широкий класс задач оптимального проектирования оболочек сведен к следующей модели задачи математического программирования.

Модель Г. Найти

$$\min_{\{k_j\}} \left\{ \min_{\{A_i\}} F(A) \right\} \quad (9)$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} B_i(A_i) &\geq 0 \\ \min_{(s)} \min_{(m_0, n)} (\tilde{B}_i(A_i)) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$A_i^L \leq A_i \leq A_i^V; \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, l_1 - 1; l_2 + 1, \dots, l; \quad j = l_1, l_2; \quad s = 1, 2, \dots, S,$$

где F - функция качества; A_i - вектор оптимизируемых параметров; A_i^L и A_i^V соответственно, нижняя и верхняя границы их изменения; m_0, n - целочисленные параметры полнообразованности в окружном и осевом направлениях; k_j - вектор дискретных величин, количественно характеризующий подкрепляющий оболочку силовой набор; $B(A_i)$ - матрица ограничений на поведение конструкций; S_i - величина, соответствующая определенному виду деформации конструкций.

В общем случае модель (9) - (11) обладает следующими особенностями:

а) функции $B_i^{(s)}(A_i) = \min_{(m_0, n)} \tilde{B}_i(A_i)$ "дышат" по целочисленным параметрам m_0, n и могут иметь при этом как гребенчатый, так и бимодальный характер;

б) величины m_0 и n связаны определенной зависимостью с дискретно изменяющимися величинами k_j , в результате чего функции $B_i^{(s)}(A_i)$ имеют овражный характер;

в) минимизация по S , соответствующая нестационарности ограничений, ведет к тому, что допустимые области изменения варьируемых параметров могут пересекаться и, как следствие, возможно появление локальных минимумов, а также разрывов или деформаций имеющихся сврагов.

С целью преодоления указанных затруднений при реализации задач оптимизации оболочек (в виде модели Г) в главе I разработан специальный поисковый алгоритм. Для формирования ограничений (10) в дан-

ной главе диссертации в каждом конкретном случае либо выводятся новые аналитические выражения, либо используются результаты исследований других авторов по решению соответствующих прямых задач (прочности, устойчивости, колебаний).

Созданы математические модели и проведены оптимизационные процедуры для гладких, стеклопластиковых и трехслойных оболочек при осевом сжатии.

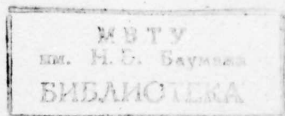
Детально разработана (на основе созданных новых математических моделей оптимизационных задач) методика оптимизации параметров широкого класса подкрепленных цилиндрических оболочек с учетом дискретного расположения подкреплений, при упругой и упруго-пластической работе материала и при сложных видах силовых воздействий (осевое сжатие, внутреннее давление, совместное осевое сжатие и внутреннее давление, кручение, совместное осевое сжатие и кручение и т.д.).

Рассмотрены задачи оптимизации для продольно-сжатых ребристых цилиндрических оболочек с большими прямоугольными подкрепленными вырезами.

М4547548
Анализ математических моделей указанных задач показал, что это - многоэкстремальные и многопараметрические задачи частично целочисленного программирования, у которых оптимизируемые переменные находятся в функциональной зависимости от целочисленных параметров волнообразования. Следовательно, функции, стоящие в ограничениях, в области изменения оптимизируемых параметров терпят разрывы первого рода. Получены проекты конструкций с оптимальными по материалоемкости параметрами (экономия материала составила в среднем до 10%). Многоэкстремальность задач проявилась в виде серии различных конструктивных решений каждой из оболочек в окрестности точки оптимума - поэтому сделаны выводы, что при разнице в затрате материала не более 5%, предлагаемые модели позволяют получать проекты оболочек с существенно различными сечениями и количеством элементов подкрепления и, следовательно, легко удовлетворять требованиям инженерной практики. Исследовано влияние эксцентриситета, в том числе "эффекта знака эксцентриситета", на параметры оптимальных проектов оболочек (при различных схемах подкреплений и характере внешней нагрузки) и даны соответствующие рекомендации для проектировщиков.

Предложена модель оптимизации по критерию минимума веса сферических оболочек, эксцентрично подкреплённых ребрами жесткости под действием внешнего давления. Приведены результаты численного эксперимента по ЭВМ, на основе которых проанализировано влияние несовершенств форм и эксцентриситета подкрепления на оптимальные проекты.

Синтезирована модель задачи оптимального проектирования при



ограничениях на частоты собственных колебаний цилиндрических оболочек, усиленных регулярной перекрестной системой ребер, эксцентрично расположенных относительно срединной поверхности, с учетом их дискретного размещения. Проведенный для этой модели численный эксперимент на ЭВМ показал, в частности, что оптимальны оболочки, имеющие относительно слабую обшивку и достаточно большое число сильных ребер. Отмечена существенная зависимость основных параметров оптимальных проектов от величины заданной собственной частоты.

Особенно эффективна, как показали исследования, весовая оптимизация для композитных подкрепленных и многослойных оболочек, так как при этом имеется возможность одновременно варьировать геометрию, структуру материала и основные параметры конструкции. Модели задач оптимального проектирования многослойных подкрепленных оболочек (слои выполнены из композита) созданы на методах расчета, учитывающих дискретное расположение подкреплений. При синтезе оптимизационных моделей многослойных подкрепленных оболочек предварительно, с помощью энергетического метода, выведены в линейной постановке основные формулы для критических напряжений.

Разработаны различные схемы подкреплений в оптимальных проектах, в частности, весьма эффективной оказалась полирегулярная система ребер, когда подкрепления меньшей жесткости регулярно размещаются в пролете между также регулярно размещенными ребрами большей жесткости. Показано, что одновременное использование при конструировании многослойной обшивки и подкреплений ведет к значительному выигрышу в весе по сравнению с автономным использованием каждого из этих резервов оптимизации. Получены соотношения, учитывающие влияние на несущую способность этих конструкций таких факторов, как эксцентриситет подкреплений и их дискретное расположение.

Результаты исследований по динамической оптимизации многослойных композитных оболочек (при ограничениях на частоты свободных колебаний), показали, что решающим оказывается подкрепление обшивки шпангоутами. Здесь особенно заметен учет эксцентриситета ребер (например, для полирегулярной системы ребер вес системы, спроектированной с учетом этого фактора, ниже примерно на 10%, чем вес системы, запроектированной без его учета).

Вопросы оптимального проектирования композитных слоистых цилиндрических оболочек из армированных пластиков рассмотрены также для случая динамического воздействия на оболочку сверхзвукового потока газа. Показано, что с увеличением скорости обтекания растет вес оптимальной оболочки: одновременно увеличивается сдвиговая жесткость материала.

Отметим еще, что при решении задач оптимального проектирования

оболочек рассматривались также следующие вопросы: оптимизация при случайных воздействиях, оптимизация по критерию надежности и многокритериальная оптимизация. Эти вопросы обсуждаются в VI и VII главах диссертационной работы.

Пятая глава работы посвящена оптимальному проектированию конструкций с учетом приспособляемости. Оптимальное проектирование приспособляющихся конструкций, внедрение в практику которого только начинается, дает возможность использовать дополнительные резервы повышения их эффективности, из которых отметим два основных. Во-первых, предельное состояние приспособляемости в большинстве случаев таково, что превышение нагрузки ее предельного значения не приводит конструкции к разрушению: даже при коэффициенте запаса, равном единице, в ней лишь увеличатся остаточные деформации. Во-вторых, для приспособляющихся конструкций характерно более полное использование несущей способности материала, чем для других конструкций.

Предложена общая модель оптимизации приспособляющихся конструкций в следующем виде:

Модель Д. Найти:

$$\Phi(X) \longrightarrow \min \quad (12)$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} f(\sigma, X) &\leq f(\sigma_s); \quad g(\sigma, X) = 0 \\ t(\sigma^e, X) &= 0; \quad p(X) \neq 0; \quad g(\sigma^e, X) = 0 \\ \sigma &= \sigma^e + p; \quad \varphi(\sigma, X) \leq [\varphi] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Здесь f - функция текучести; g, t - условия, соответственно, равновесия и неразрывности деформаций; φ - допустимая деформация.

Область существования решений, описываемых ограничениями g, t и p , должна определяться "вложенной" задачей оптимизации. Показано, что оптимальное проектирование приспособляющихся конструкций состоит из двух задач МП: внешняя (определение параметров оптимального проекта) решается однократно, а внутренняя (поиск некоторых фиктивных полей) многократно и на каждом шаге.

Показано, что все многообразие квазистатических нагрузок может быть сведено к линейной комбинации двух ее основных видов, названных нами квазистатическими и квазипостоянными. Выделение последнего вида нагрузок позволило, в свою оче-

редь, установить принципиальную возможность проектирования оптимальных конструкций, нагруженных этими нагрузками, без предварительного "упругого" расчета, что открывает перспективу для оптимального проектирования большой группы конструкций, методы "упругого" расчета которых требуют большого объема необходимых вычислений.

Введено имеющее важное методологическое и практическое значение понятие об оптимальной по приспособляемости конструкции, позволяющее идентифицировать соответствующую этой конструкции точку в пространстве остаточных напряжений. Ее определение, служащее одновременно алгоритмом для проектирования, можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \exists \sigma_y^0 \equiv 0 \rightarrow (\forall \tau \in R \rightarrow f(\sigma_y^e + \hat{\sigma}_y^0) \leq k^2) \wedge \exists \tau \in R \rightarrow \\ \rightarrow (\hat{\sigma}_y^0 \neq \tilde{\sigma}_y^0 \rightarrow f(\sigma_y^e + \tilde{\sigma}_y^0) > k^2) \wedge \exists \tau \in R \rightarrow \\ \rightarrow (\forall \alpha > 1 \rightarrow f(\alpha \sigma_y^e + \hat{\sigma}_y^0) > k^2)), \end{aligned} \quad (14)$$

где k^2 - константа текучести; α - параметр нагружения. Выражение (14) определяет конструкцию, находящуюся в предельном состоянии, т.е. устанавливает требования к координатам глобального экстремума. Проведенные исследования показали возможность существования в предельном состоянии приспособляемости фиктивных полей напряжений $\hat{\sigma}_y$, удовлетворяющих требованиям теоремы Мелана. Все эти поля должны обеспечивать $\min k^2$, т.е. любой из этих локальных экстремумов идентифицирует действительное поле $\hat{\sigma}_y^0$ некоторой фиктивной истории нагружения.

Рассмотрен ряд оптимизационных задач по приспособляемости стержневых систем; установлено, что при действии указанных выше нагрузок приспособляемость может существенно влиять на особенности оптимального проектирования, а также на оптимальное значение целевой функции.

Показано, что задача оптимального проектирования с учетом приспособляемости многоэкстремальна и может быть решена только методами ИП, в частности, с использованием разработанных в работе специальных алгоритмов метода СП. Существенная особенность предложенных алгоритмов состоит в их способности моделировать процесс приспособляемости как случайный процесс, на основе чего могут быть получены возможные поля - представители остаточных напряжений.

Проведенный обширный численный эксперимент на ЭВМ позволяет высказать следующие соображения о приспособляющих возможностях стержневых конструкций. Для неразрезных балок прямоугольного сечения запаса конструкции по приспособляемости составляет около половины за-

паса сечения по приспособляемости и общий запас по приспособляемости выполненных по "упругому" расчету конструкций составляет порядка 1,7-1,8; для неразрезных балок с сечением из эффективных профилей запас конструкции по приспособляемости превышает аналогичный запас сечения в 1,5-2 раза. Таким образом, для всех видов сечений неразрезных балок учет эффекта приспособляемости позволяет связать расчетный изгибающий момент в среднем на 15-20%, что приводит к экономии материала того же порядка. Показано, что одним из резервов оптимизации при проектировании многопролетных балок является переход от равномерной расстановки опор к оптимальной.

Исследованы оптимальные приспособляющиеся изгибаемые пластины. Для сведения оптимизационной задачи к задаче МП использовались модификации метода конечных разностей и стержневые модели. Большая часть переменных задачи представляет собой моменты в узлах конечно-разностной сетки, а проектным параметром является толщина пластины.

Процесс поиска на ЭВМ в пространстве остаточных усилий осуществляется на множестве приспособляющихся пластин, в котором функция цели улучшается на каждой итерации: на каждой итерации синтезируется проект приспособившейся пластины и статически возможные поля остаточных усилий в ней; эти поля можно также интерпретировать как возникшее поле некоторого нагружения - и в этом смысле траектория поиска моделирует процесс приспособляемости. Полученные результаты свидетельствуют о наличии у пластин больших (по сравнению со стержневыми конструкциями) запасов приспособляемости, что позволяет получить экономический эффект порядка 20-25%.

Отмечена целесообразность установки дополнительных внутриконтурных опор и установлена независимость оптимального проекта от коэффициента Пуассона.

Сформулирована новая математическая модель - оптимизационная задача при воздействии квазипостоянной нагрузки, предельные значения которой оказываются меньшими предельной статической и в ряде случаев совпадают с ней. Показано, что для исследования по приспособляемости конструкций указанную задачу можно сформулировать как новый тип задач предельного равновесия.

Исследования, проведенные к этой главе, представляют собой естественный этап дальнейшего развития теории и практики ОПК и, видимо, в первые позволили оценить приспособляющие возможности стержневых и континуальных систем в оптимизационных задачах.

В шестой главе разрабатываются общие постановки и основные модели для оптимального проектирования

конструкций по критериям надежности.

Модель для оптимального проектирования со скалярным критерием качества (объем, вес, стоимость конструкции), в предположении, что надежность конструкции должна быть не ниже допустимой, синтезирована в виде:

Модель II. Найти $\text{ext}_T F(\bar{X}, T)$ (I5)
при ограничении

$$P_T(\bar{X}, V) \geq P_{\text{доп}}, \quad (I6)$$

где $\bar{X}$ - вектор конструктивных переменных; T - заданный срок эксплуатации; $P_{\text{доп}}$ - допустимая величина надежности; P_T - функция надежности; $V(\bar{z})$ - заданное случайное поле (функция надежности зависит от T , если одна из компонент вектора $\bar{z}$ - время). Для вычисления функции, участвующей в ограничении (I6), используется предложенная в работах В.В. Болотина теория выбросов случайных полей из допустимой области, формируемой по условиям эксплуатации конструкции.

Выражения для ограничения по надежности получены в следующем виде:

а) если $V(\bar{z})$ - скалярное случайное поле:

$$P_T \approx 1 - |G| \frac{k_1^\circ k_2^\circ (V_* - m_0)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_V} \cdot \exp\left(-\frac{(V_* - m_0)^2}{2\sigma_V^2}\right) \geq P_{\text{доп}} \quad (I7)$$

б) если $V(t)$ - векторный стационарный гауссовский случайный процесс:

$$P_T \approx 1 - T \frac{\sigma_V}{2\pi\sigma_V} \cdot \exp\left[-\frac{(\varphi_0(\bar{X}) - m_0)^2}{2\sigma_V^2}\right] \geq P_{\text{доп}} \quad (I8)$$

Здесь k_1° , k_2° - волновые числа, в окрестности которых сосредоточена энергия поля; m_0 и σ_V^2 - математическое ожидание и дисперсия поля $V(\bar{z})$; $|G|$ - заданная область; V_* - некоторая заданная величина из области G ; σ_V^2 и $\sigma_V'^2$ - дисперсия процесса $V(t)$ и производной; $\varphi_0(\bar{X})$ - условие качества конструкции.

Анализ предложенных моделей показал целесообразность их применения в ОПК при действии на конструкции нагрузки, являющейся случайной функцией времени.

Установлено, что при использовании распределения Вейбулла для описания прочностных характеристик материала (что соответствует накопленной в последние годы статистической информации), в частности, предела текучести σ^* :

$$f(\sigma^*) = \frac{\beta}{2} \sigma^{*\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{\sigma^{*\beta}}{2}\right) \quad (19)$$

необходимо учитывать дополнительные ограничения на область применения теории выбросов к расчету надежности.

Для стержневых систем математическое ожидание числа выбросов случайного процесса $\sigma^*(t)$ в единицу времени в этом случае определяется зависимостью:

$$\dot{V}_+(G) \approx \frac{\sigma_{\dot{\sigma}^*}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\sigma_i)^\beta\right), \quad (20)$$

а параметры α и β находятся из соотношений:

$$\frac{m_{\sigma^*}^2}{\sigma_{\dot{\sigma}^*}^2} = \frac{\Gamma^2(1 + \frac{1}{\beta})}{\Gamma(1 + \frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{m_{\sigma^*}^\beta}{\Gamma^\beta(1 + \frac{1}{\beta})} \quad (22)$$

В выражениях (20) - (22) обозначено: σ_i - напряжение в i -м стержне; $\sigma_{\dot{\sigma}^*}$ - дисперсия процесса $\sigma^*(t)$; Γ - гамма функция. Так как соотношения (21) есть величина, обратная квадрату коэффициента изменчивости предела текучести W_{σ^*} , то используя особенности Γ -функции, вводится

Л е м м а 1. Для любого $W_{\sigma^*} \in [0, 1]$ существует такое

$\beta > 1$, что справедливо соотношение (21).

Исследование выражения (20) показывает наличие минимума функций $\dot{V}_+(G)$ при $\beta > 1$ и некотором векторе варьируемых площадей конструкции $S^0 = (S_1^0, \dots, S_n^0)$, ($S_i^0 > 0$), определяемом по формуле:

$$S_i = \frac{P_i}{[\Gamma(\beta-1)\alpha]^{1/\beta}} \quad (23)$$

В параллелепипеде $\Omega = \{S^0 \leq S_i \leq S_i^0, i = \overline{1, n}\}$ функция $\dot{V}_+(G)$ монотонно возрастает по S_i , что противоречит физическому смыслу величин $\dot{V}_+(G)$ и S_i . Следовательно, справедлива

Л е м м а 2. Если распределение величины σ^* подчиняется закону Вейбулла, а σ^* - нормальному закону, $W_{\sigma^*} \in [0, 1]$, то формула (20) применима для расчета надежности системы лишь при $S_i \geq S_i^0$, где S_i^0 определяется по формуле (23).

Эти соображения оказываются весьма важными при ОПК; в силу леммы 2, к ограничению (16) необходимо добавить систему ограничений:

$$S_i \geq S_i^0 \quad (24)$$

Проведенный в этой главе вычислительный эксперимент на ЭВМ по синтезу оптимальных однопролетных балок позволил выяснить влияние таких факторов, как уровень надежности и срок эксплуатации, на параметры оптимальных проектов и дать соответствующие рекомендации для проектирования. В частности, выяснилось, что влияние длительности срока эксплуатации на вес (стоимость) конструкции уменьшается при увеличении абсолютного значения этого периода, а вес (стоимость) оптимальной конструкции с увеличением допустимого уровня надежности возрастает, причем тем быстрее, чем этот уровень ближе к единице. Это свидетельствует о том, что завышение допустимого уровня надежности может привести к ощутимому перерасходу материала, хотя, с другой стороны, этот уровень должен быть связан с нормативным коэффициентом надежности и соответствовать назначению и ответственности данной конструкции.

Создан ряд новых моделей для оптимального проектирования оболочек с учетом надежности, как распределенных систем, с применением аппарата теории выбросов случайных полей из допустимой области к проверке ограничения по надежности. В качестве случайных полей рассматривались нагрузки или прочностные характеристики материала.

Седьмая глава посвящена развитию моделей и методов для многокритериальной оптимизации конструкций — как естественному на современном этапе продолжению исследования, проведенных в предыдущих главах. Особое внимание здесь уделяется, во-первых, концептуальным вопросам, связанным с формированием цели в виде вектора критериев, а, во-вторых, многоплановому характеру процесса проектирования, который требует комплексного подхода для описания реальной задачи выбора проектного решения.

С этих позиций исследованы вопросы оценки на этапе проектирования трудоемкости изготовления конструкции, с использованием таких производственных показателей как: вес, число элементов, объем сборки и т.д. Синтезирована модель МК задачи оптимального проектирования ребристых пластин по критериям веса и трудоемкости изготовления. Рассмотрены также вопросы оптимизации механических характеристик (типа удельной прочности) материала многослойной клееной панели в аварийном и безаварийном режимах работы, а также трехслойной панели — по весу и теплоизоляционным характеристикам.

При проектировании нескольких конструкций требования оптимальности каждой уже односторонние. Для исследования этого вопроса предложена новая модель учета унификации (для класса цилиндрических оболочек, отличающихся размерами и величиной нагрузки). Критериями оптимальности выбраны общая масса проекта и число одинаковых толщин

оболочек, а в качестве принципа оптимальности используется минимакс.

Рассмотрены вопросы учета случайной природы свойств материала и внешних воздействий в рамках лексикографического подхода, применительно к сжатым цилиндрическим оболочкам со случайными свойствами материала.

Модель МК-задачи проектирования оболочек такого класса со случайными параметрами имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} 1) \text{ Найти } F_1^*(\bar{X}, w) &= \max_{\bar{X} \in U_0} \min_{j=1,3} P_j \{f_j(\bar{X}, w)\} \geq N \\ 2) \text{ Найти } F_2^*(\bar{X}) &= f_{46}^* = \min_{\bar{X} \in U_{\bar{X}}} 2\pi j R \delta \\ &F_1(\bar{X}, w) > 1 - \Delta_1 \\ 3) \text{ Найти } F_3^*(\bar{X}) &= f_5^* = \min_{\bar{X} \in U_{\bar{X}}} (R/\delta) \\ &F_1(\bar{X}, w) \geq 1 - \Delta_1, F_2(\bar{X}) \leq \beta F_2^*(\bar{X}) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

при $\bar{X} \in [R, \delta]$; $R \in [R_n, R_b]$; $\delta \in [\delta_n, \delta_b]$.

Здесь: U_0 - область допустимых решений, которая окончательно формируется в процессе исследования модели задачи; $\Delta_1 < 1$ и

$\beta \geq 1$ - уступки, устанавливающие допустимые отклонения F_1^* и F_2^* от оптимумов. Проведенный численный эксперимент позволил оценить активность тех или других ограничений в оптимизационных задачах, а также дать соответствующие рекомендации при проектировании элементов машин и приборов с учетом случайных свойств материала.

Предложен в самом общем виде комплексный подход к решению МК задач ОПК, целью которого является описание и выбор рационального варианта действий проектировщика. Формализация цели в виде вектора критериев эффективности, определяющая постановку задачи, предполагает включение в модель выбора более ранних фаз инженерной деятельности - этапа постановки задачи ОПК. Определен класс задач ОПК, допускающих применение теории игр с существующим множеством критериев, когда система критериев обладает аксиоматическими свойствами.

С позиции многокритериального подхода разработана методика постановки и исследованы вопросы проектирования подкрепленных пластин и трехслойных цилиндрических оболочек при случайном характере действующих на них нагрузок. В случае, когда критерии оптимальности принимаются: вес G , надежность P и срок эксплуатации T конструкции, математические выражения для критериев оптимальности записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f_1(\bar{X}) &= P(\bar{X}) \rightarrow \max_{\bar{X} \in D_X}; P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ f_2(\bar{X}) &= T(\bar{X}) \rightarrow \max_{\bar{X} \in D_X}; T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ f_3(\bar{X}) &= G(\bar{X}) \rightarrow \min_{\bar{X} \in D_X} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Анализ результатов компромиссных решений позволил назначить целесообразные сроки эксплуатации и надежность для исследованных в работе конструкций, а также выделить достижимые оценки показателя их веса.

Полученные в этой главе результаты позволяют на основе современных представлений о развитии методов принятия решений совершенствовать теорию и методы ОПК.

В приложении к диссертации приведены блок-схемы для реализации основных разработанных алгоритмов на ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена разработке и развитию теории и методов ОПК. Проведенные исследования показали целесообразность и эффективность применения разработанных моделей и алгоритмов для решения широкого класса задач оптимального проектирования машиностроительных и других конструкций. В работе впервые получены решения большого числа новых сложных задач ОПК, а проведенный с помощью ЭВМ обширный числовой эксперимент содержит новую информацию о поведении и свойствах исследованных в диссертации оптимальных конструкций.

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработан комплекс новых поисковых рандомизированных алгоритмов, специально адаптированных для решения на ЭВМ одно, и многокритериальных задач МП, возникающих при ОПК машин, приборов и аппаратуры. Приведен ряд теорем и доказательств, подтверждающих точность и сходимость этих алгоритмов, а также проведен численный анализ их эффективности.

2. На основе предложенных алгоритмов решены некоторые новые нелинейные вариационные задачи механики, связанные с изгибом гибких стержней постоянной и переменной жесткости с различными крайними условиями (в том числе, при наличии ограничений на их деформации), где в качестве критериев оптимальности принимается минимум потенциальной энергии деформаций системы.

3. Синтезирован ряд новых моделей задач МП для весовой оптимизации балок с упругим и неупругим поведением материала при наличии ограничений на напряжения, деформации и динамические характеристики.

4. Предложены общие математические модели оптимизационных задач для пластин сложной структуры, а также частные модели — для конкретных типов этих конструкций (ребристых, слоистых, с отверстиями и

т.д.), при различных статических нагружениях и в динамических задачах. Для формирования ограничений на поведение конструкций в соответствующих задачах МП выведены аналитические соотношения, либо использованы соответствующие методы дискретизации (в частности, метод конечных элементов).

5. Применительно к широкому классу многослойных, композитных и подкрепленных оболочек, находящихся в условиях разнообразных видов воздействия (в том числе, в условиях взаимодействия со сложной средой), синтезированы, с учетом последних достижений механики деформируемого тела, новые математические модели задач ОПК. Изучены свойства полученных оптимальных проектов и указаны пути повышения резервов оптимизации.

6. Исследованы новые математические модели для решения задач оптимального проектирования приспособляющихся конструкций как задач МП, и на этой основе создана универсальная методика их проектирования на силовую нагрузку, а также проведена оценка основных параметров оптимизации на запасы прочности по приспособляемости.

7. Разработаны общие подходы и модели для оптимизации конструкций по критериям надежности, адекватные современному уровню математической теории надежности. На их основе и с применением предложенных поисковых алгоритмов решен ряд новых задач по оптимизации стержневых систем и оболочек с учетом надежности.

8. Предложены комплексные постановки, модели и даны решения новых многокритериальных задач проектирования для часто встречающихся в машиностроении типов пластин и оболочек. Исследованы принципиальные вопросы, связанные с формированием цели в виде вектора критериев, изучением связи различных критериев и выбора схем компромисса; при этом особое внимание уделено стадии постановок задач ОПК.

9. Указанные постановки и модели совместно отражают различные стороны и этапы реального проектирования элементов машин, приборов и аппаратуры, учитывают описание требований к физико-механическим свойствам и поведению объектов при эксплуатации, технико-экономические показатели процесса изготовления конструкций, а также как детерминистскую, так и стохастическую природу объектов.

10. Результаты теоретических исследований, выполненных в диссертации, внедрены на машиностроительных предприятиях при проектировании объектов, имеющих важное народнохозяйственное значение, с получением определенного экономического эффекта (сведения, подтверждающие внедрение, приведены в приложении), а также нашли свое отражение в учебных курсах некоторых ВУЗов и в учебных пособиях.

В совокупности осуществлено теоретическое обобщение и решение круп-

ной научной проблемы оптимального проектирования элементов машиностроительных конструкций типа балок, пластин и оболочек, в детерминированной и стохастической постановках, имеющее важное народнохозяйственное значение.

С П И С О К

основных работ автора, опубликованных по теме
диссертации:

А. Монографии

1. Динамическое программирование в задачах строительной механики. - М.: Стройиздат, 1975. - 110 с. (соавтор - Бараненко В.А.).
2. Расчет и оптимальное проектирование конструкций с учетом приспособляемости. - М.: Наука, 1978. - 208 с. (соавтор - Пятигорский З.И.).
3. Оптимальное проектирование строительных конструкций. - Киев: Вища школа, 1980. - 112 с. (соавтор - Пятигорский З.И.).
4. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем. Киев: Вища школа, 1982. - 116 с. (соавтор - Карновский И.А.).
5. Модели и методы многокритериальной оптимизации конструкций - Днепрпетровск: ДГУ, 1984. - 132 с.
6. Многокритериальная оптимизация конструкций. - Киев: Вища школа, 1984. - 202 с. (соавторы - Герасимов Е.Н., Скалзуб В.В.).

Б. Статьи

7. Динамическое программирование в задачах оптимизации конструкций, подверженных ползучести. - Докл. АН СССР, 1971, т. 196, № 3, с. 553-555.
8. Проектирование ребристых пластин минимального веса, имеющих заданные собственные частоты. - Изв. АН Арм. ССР. Механика, 1971, т. XXIV, № 6, с. 78-83.
9. К вопросу о выборе оптимальной формы сечений при косом изгибе. - Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1972, № 2, с. 9-11.
10. Выбор оптимальных параметров трехслойных оболочек как задача математического программирования. - В кн.: Сопротивление материалов и теория сооружений. - Киев: БудІвельник. 1972, вып. XVI, с. 36-30.
11. Оптимизация конструкций при ограничениях на их динамические и частотные характеристики. - Докл. АН СССР, 1975, т. 203, № 2: с. 307-308.
12. Оптимальное проектирование методами математического программиро-

- вания некоторых стержневых и континуальных систем с учетом потери устойчивости (обзор). - В кн.: Гидроаэромеханика и теория упругости. Днепропетровск: ДГУ, 1975, вып. 19, с. 107-114.
13. К вопросу об оптимальном проектировании подкрепленных сферических оболочек. - Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура, 1976, № 3, с. 40-44.
 14. Оптимальное проектирование пространственных конструкций (состояние вопроса, методы, перспективы). - В кн.: Доклады Международной конференции по облегченным пространственным конструкциям. М.: Стройиздат, 1977, с. 108-109.
 15. Некоторые векторные модели задач оптимизации пластин и оболочек. - Докл. АН УССР, серия А, 1978, № 6, с. 523-527.
 16. Собственные колебания и оптимальное проектирование многослойных подкрепленных цилиндрических оболочек, находящихся в потоке сжимаемой жидкости. - В кн.: Расчет пространственных строительных конструкций. Куйбышев: КуйГУ, 1981, вып. IX, с. 14-20.
 17. Динамическое программирование и нелинейные задачи статики тонких стержней. - Докл. АН СССР, 1968, т. 182, № 5, с. 1029-1031, (соавтор Бараненко В.А.).
 18. Применение метода динамического программирования к исследованию больших прогибов сжатых стержней. - Прикладная механика, 1969, т. У, вып. III, с. 132-135 (соавтор Бараненко В.А.).
 19. Динамическое программирование в задачах синтеза оптимальных стержневых систем. - В кн.: Сопротивление материалов и теория сооружений. Киев: БудІвельник, 1971, вып. XIII, с. 119-126 (соавтор - Бараненко В.А.).
 20. О совместном использовании методов динамического программирования и случайного поиска в задачах оптимального проектирования. - Строительная механика и расчет сооружений, 1973, № 1, с. 3-6. (соавторы - Бараненко В.А., Филатов Г.В.).
 21. Оптимальное проектирование ребристых цилиндрических оболочек с большими вырезами при осевом сжатии. - Прикладная механика, 1975, т. XI, вып. 5, с. 118-121. (соавторы - Волинский М.И., Пальчевский А.С.).
 22. Оптимизация параметров ребристых пластин, имеющих большие вырезы, на основе метода конечных элементов. - Проблемы прочности, 1979, № 7, с. 90-92. (соавтор - Волинский М.И.).
 23. Оптимизация подкрепленных цилиндрических оболочек при заданных ограничениях на собственные частоты колебаний. - Строительная механика и расчет сооружений, 1977, № 5, с. 17-21. (соавторы - Волинский Э.И., Заруцкий В.А.).

24. Об одном алгоритме случайного поиска для решения многоэкстремальных задач. - Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1974, № 1, с. 55-60. (соавтор - Волюнский Э.И.).
25. Алгоритм метода случайного поиска для оптимизации стержневых и континуальных систем. - Строительная механика и расчет сооружений, 1974, № 5, с. 27-30. (соавтор - Волюнский Э.И.).
26. Некоторые сглаживающие алгоритмы случайного поиска (обзор). - В кн.: Проблемы случайного поиска. Рига: Зинатне: 1978, вып. 6, с. 95-120. (соавтор - Волюнский Э.И.).
27. Расчет трехслойных панелей минимального веса как задача математического программирования. Изв. АН СССР, Механика твердого тела, 1973, № 3, с. 134-140. (соавтор - Годес Я.В.).
28. Оптимальное проектирование трехслойных пластин с сотовым заполнителем при осевом сжатии методом случайного поиска. - Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1973, № 6, с. 41-49. (соавтор - Годес Я.В.).
29. Рандомизированный алгоритм для решения задач нелинейного программирования. Изв. ВУЗов. Техническая кибернетика, 1975, № 5, с. 30-33. (соавторы - Гурвич И.Б., Захарченко В.Г.).
30. Синтез оптимальных балок заданной надежности. - В кн.: Динамика и прочность машин. Харьков: Вища школа, 1980, вып. 32, с. III-115. (соавторы Захарченко В.Г., Харитон Л.Е.).
31. Оптимальное проектирование изгибаемых трехслойных пластин. - Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1976, № II, с. 5-8. (соавтор - Косиченко А.А.).
32. Оптимальное проектирование методами математического программирования слоистых и композитных пластин и оболочек (обзор). - В кн.: Гидроаэромеханика и теория упругости. Днепропетровск, ДГУ, 1977, вып. 22, с. 92-103. (соавтор - Косиченко А.А.).
33. Расчет цилиндрических оболочек минимального веса методом случайного поиска с самообучением. - Докл. АН УССР, серия А, 1971, № 2, с. 163-166. (соавтор - Филатов Г.В.).
34. Применение метода случайного поиска при оптимальном проектировании цилиндрических оболочек. - Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1971, № 5; с. 199-201. (соавтор - Филатов Г.В.).
35. Расчет ребристых пластин минимального веса при осевом сжатии методом случайного поиска. - Прикладная механика, 1972, т. УШ, вып. I, с. 49-55. (соавтор - Филатов Г.В.).
36. Оптимизация параметров ребристых пластин при колебаниях методом случайного поиска. - Проблемы прочности, 1972, № 2, с. 83-85. (соавтор - Филатов Г.В.).
37. Об оптимальном проектировании некоторых приспособляющихся конструкций. - Строительная механика и расчет сооружений, 1973, № 2,

- с. 23-25. (соавтор - Пятигорский З.И.).
38. Оптимизация методом случайного поиска параметров подкрепленных цилиндрических оболочек. - Прикладная механика, 1973, т. IX, вып. 5, с. 38-43. (соавтор - Филатов Г.В.).
 39. Оптимальное проектирование конструкций, приспособляющихся к квазистатическим нагрузкам. Докл. АН СССР, 1973, т. 210, № 5, с. 1030-1032. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 40. Оптимальное проектирование приспособляющихся конструкции как метод установления их предельного состояния. - Докл. АН СССР, 1974, т. 216, № 6, с. 1237-1239. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 41. Оптимальное проектирование приспособляющихся пластин, имеющих дополнительные внутриконтурные связи. - Докл. АН СССР, серия А, 1975, № 3, с. 239-242. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 42. Статически возможные поля остаточных напряжений в оптимальных по приспособляемости конструкциях. - Докл. АН СССР, 1975, т. 225, № 2, с. 265-268. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 43. Оптимальное проектирование конструкций методом случайного поиска (обзор). - В кн.: Проблемы случайного поиска. Рига: Зинатне, 1975 вып. 4, с. 184-193. (соавтор - Филатов Г.В.).
 44. Оптимальное проектирование конструкций с учетом надежности (обзор). - Строительная механика и расчет сооружений, 1976, № 6, с. 8-15. (соавтор Харитон Л.Е.).
 45. Проектирование оптимальных по приспособляемости пластин при неизвестной теории нагружения. - Строительная механика и расчет сооружений, 1976, № 3, с. 7-10. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 46. Весовая оптимизация балок заданной надежности. - Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура, 1977, № 4, с. 42-45. (соавтор - Харитон Л.Е.).
 47. О проектировании изгибаемых пластин минимального веса, оптимальных по приспособляемости. - Изв. АН Арм. ССР. Механика, 1978, т. XXXI, № 2, с. 48-54. (соавтор - Пятигорский З.И.).
 48. Устойчивость и оптимальное проектирование многослойных композитных цилиндрических оболочек, усиленных полирегулярной системой перекрестных ребер. - Механика композитных материалов, 1979, № 1, с. 96-105. (соавтор - Тугай О.В.).
 49. Об одном подходе к оптимизации конструкций по критерию надежности. - Докл. АН СССР, серия А, 1979, № 1, с. 41-43. (соавтор - Харитон Л.Е.).
 50. Обобщенная модель оптимизации оболочек со случайными параметрами. Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1979, № 6, с. 10-14. (соавтор - Склясруб В.В.).

51. Об одной векторной модели задачи оптимального проектирования оболочек. Строительная механика и расчет сооружений, 1979, № 5, с. 17-20. (соавтор - Скалозуб В.В.).
52. *Vektorová optimalizácia konštrukcii podľa váhy, spolahlivosti a času prevádzky pri náhodných vplyvoch. - Stavebnícky časopis*, 1979, 27, № II, p. 829-837. (соавторы - Скалозуб В.В., Харитон Л.Е.).
53. Динамическая оптимизация многослойных цилиндрических оболочек, подкрепленных двумя регулярными системами ребер. Прикладная механика, 1980, т. XVI, № I, с. 47-54. (соавтор - Тугай О.В.).
54. Оптимальное проектирование подкрепленных оболочек как распределенных систем с учетом надежности. - В кн.: Проблемы машиностроения. - Киев: Навкова думка, 1980, вып. 10, с. 50-53. (соавторы - Харитон Л.Е., Захарченко В.Г.).
55. Проектирование композитных цилиндрических оболочек минимальной массы, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа. - Изв. ВУЗов. Авиационная техника, 1980, № 2, с. 62-66. (соавторы - Косиченко А.А., Рикардо Р.Б.).
56. Векторная модель оценки оптимального проекта подкрепленной пластины. - Изв. ВУЗов. Авиационная техника, 1980, № 4, с. 84-87, (соавтор - Скалозуб В.В.).
57. Оптимальное управление колебаниями пологих оболочек и пластин как задача математического программирования. - Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1981, № I, с. 192-195. (соавторы - Карновский И.А., Ланда Ч.Ш.).
58. Многокритериальные задачи теории оптимального проектирования конструкций (обзор). - В кн. Динамика и прочность тяжелых машин. Днепрпетровск: ДГУ, 1982, вып. 6, с. 102-112. (соавторы Герасимов Е.И., Скалозуб В.В.).
59. К вопросу об оптимальном проектировании многослойных панелей по вектору критериев качества. - В кн.: Динамика и прочность машин. Харьков: Виша школа, 1982, вып. 35, с. 74-78. (соавтор - Семенец С.Н.).
60. О разработке модели многокритериальной оптимизации конструкции из композитных материалов. - Механика композитных материалов, 1983, № 4, с. 669-674. (соавтор - Семенец С.Н.).
61. Аксиоматизированный подход к многокритериальной оптимизации конструкций. - Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1984, № 6, с. 153-156. (соавтор - Скалозуб В.В.).

ПОЧТМАН ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность - 01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано к печати 11.02.86 . БТ 70042. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага типографская № 1. Печать плоская. Усл.лнч.л. 1,86.

Уч.-изд.л. 2,05. Тираж 150 экз. Заказ № 45. Бесплатно.

Редакционно-издательский отдел ДГУ, 320625, ГСН,
г.Днепропетровск-10, пр.Гатарина, 72.

Ретап rint ДГУ, 320110, г.Днепропетровск, ул.Генерала Пушкина, 4