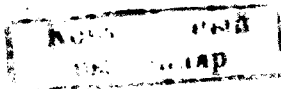


На правах рукописи

ЧЕРНЯВСКИЙ Олег Федорович



АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ

01.02.06 - Динамика и прочность машин,  
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора технических наук

Челябинск - 1980

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола

Официальные оппоненты

- доктор технических наук, профессор Зарубин В.С.
- доктор технических наук, профессор Шапиро Г.С.
- доктор технических наук, профессор Гриненко Н.И.

Ведущее предприятие— Государственный научно-исследовательский  
институт машиноведения имени академика А.А.Благонравова.

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании специализированного Совета Д.053.13.01  
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола  
(454044, Челябинск-44, проспект им.Ленина , 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
специализированного Совета



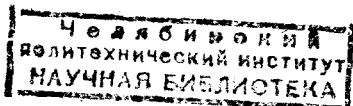
/А.А.Козев /

Актуальность тем. Рост температур, нагрузок и скоростей их изменения в современных атомных энергетических установках, газотурбинных двигателях, металлургическом и химическом оборудовании стимулирует развитие исследований в области прочности конструкций при повторных тепловых и механических воздействиях. Решение проблем оценки прочности высоконагруженных элементов указанных объектов связано с анализом повторяющегося вязко-пластического деформирования, подготавливающего процессы разрушения и приводящего при определенных условиях к недопустимым остаточным перемещениям.

При достаточно больших числах циклов нагружения процессы неупругого деформирования элементов конструкций, изготовленных из циклически стабильных и стабилизирующихся сталей и сплавов, постепенно стабилизируются вследствие образования стационарного поля остаточных напряжений и в пределах определенных допусков могут считаться одинаковыми в течение основной части ресурса. Расчетная оценка несущей способности требует определения предельных параметров тепловых и механических воздействий, при которых приращения и размахи неупругих деформаций в стабилизированных циклах деформирования ограничены в соответствии с заданной долговечностью, и исследования зависимости этих параметров от условий работы и характеристик конструкции. Для оценки долговечности при заданных внешних воздействиях необходимо определение размахов и приращений деформаций в стабилизированных циклах деформирования. Методы решения этих задач были развиты до сих пор недостаточно; актуальность их развития связана с повышением нагруженности и требований к надежности и долговечности высокотемпературных конструкций.

Цель работы состоит в разработке общих теоретических положений предельного анализа конструкций при стационарном циклическом неупругом деформировании, включающих вариационные формулировки задач определения предельных тепловых и механических воздействий при ограниченных приращениях и размахах неупругих деформаций за цикл и задач непосредственного (не требующего исследования процесса стабилизации) расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования при заданных внешних воздействиях;

в дальнейшем развитии точных и приближенных методов теории приспособляемости и их обобщении (на основе разработанных теоретических положений) применительно к определению предельных пара-



метров внешних воздействий вне области упругой приспособляемости и непосредственному расчету стабилизированных циклов неупругого деформирования конструкций при заданных внешних воздействиях;

в исследовании влияния ряда факторов (ползучести, концентрации напряжений, геометрической нелинейности, программ изменения внешних воздействий и температурных полей конструкции) на условия реализации прогрессирующего с числом циклов накопления односторонних деформаций и остаточных перемещений;

в разработке методик расчета условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций применительно к ряду типовых элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах, газотурбинных двигателей, металлургического оборудования.

Научная новизна. Получены общие вариационные формулировки задач предельного анализа и непосредственного расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования конструкций при циклических тепловых и механических воздействиях, являющиеся обобщением основных теорем теорий предельного равновесия и приспособляемости. Эти формулировки обеспечивают возможность расчета предельных внешних воздействий при заданной долговечности, а также стационарных циклов неупругого деформирования при заданных воздействиях с учетом пластических деформаций, ползучести и их взаимодействия.

Разработаны строгий (использующий аппарат линейного программирования) и приближенный метод расчета стабилизированных циклов упруго-пластического деформирования конструкций при заданных внешних воздействиях.

Проблема определения условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций сведена к задаче предельного равновесия фиктивно анизотропного тела; на этой основе предложены точный и приближенный методы определения обобщенных переменных при расчетах условий прогрессирующего формоизменения пластин и оболочек и развиты точные (использующие аппараты математической теории оптимальных процессов и линейного программирования) и приближенные статические методы расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения пластинок и оболочек.

Установлены необходимые и достаточные условия накопления односторонних деформаций в зонах нарушения геометрической однородности конструкций.

Выявлен механизм влияния ползучести на условия реализации прогрессирующего формоизменения конструкций при циклических механических и тепловых воздействиях.

Получены достаточные условия бифуркации процесса циклического неупругого деформирования, позволяющие найти верхнюю оценку условий прогрессирующего коробления конструкций в случаях, когда изменения геометрических характеристик в пределах каждого цикла нагружения несущественны.

#### Практическая ценность и внедрение результатов работы.

Применение полученной системы общих теорем и методов расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования конструкций обеспечивает повышение надежности и долговечности проектируемых машин, работающих в условиях повторных тепловых и механических воздействий; на основе этой системы созданы методики расчета условий прогрессирующего формоизменения внутрикорпусных элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах и выполнены расчеты ряда ответственных элементов реактора БН-600 (установленного на Белоярской АЭС); полученные результаты использованы при проектировании для разработки мероприятий, исключающих возможность прогрессирующего формоизменения элементов реактора БН-600; методики расчета внедрены в проектной организации и используются при проектировании новых реакторов; разработанные методики расчета элементов реакторов на быстрых нейтронах включены в проект "Норм расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок";

методика расчета условий прогрессирующего накопления одноосевых деформаций в дисках осевых газовых турбин развита с учетом сложных реальных программ изменения температур и скоростей вращения, длительности эксплуатации и концентрации напряжений у замковых выступов диска; эта методика используется при проектировании газовых турбин в производственном объединении "Пролетарский завод";

разработаны методики расчета условий прогрессирующего формоизменения находящихся в эксплуатации элементов металлургического оборудования типа цилиндрических и конических оболочек, позволившие дать количественные оценки предельных параметров тепловых воздействий при несущественных механических нагрузках;

предложенные общие методы анализа стабилизированных циклов деформирования конструкций и методики расчета пластинок и оболочек включены в методические указания "Методы и алгоритмы расчета

на приспособляемость и формоизменение", созданные в соответствии с заданием № 08.04 утвержденной Госстандартом СССР "Программы работ по реализации задания 6.1.01.04 Государственного пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы в части создания комплекса межотраслевых нормативно-технических документов по методам расчетов и испытаний на прочность в машиностроении".

Апробация работы. Содержание отдельных разделов работы докладывалось на III Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Москва, 1968) на VI, VII, IX, X и XII Всесоюзных конференциях по теории оболочек и пластинок (Днепропетровск, 1979; Ростов на Дону, 1971; Ленинград, 1977; Кутаиси, 1975; Ереван, 1980), на VII Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Горький, 1978), на Всесоюзной конференции по теоретическим основам расчета строительных конструкций (Москва, 1970), на II и III Всесоюзных симпозиумах по малоцикловой усталости в элементах конструкций (Челябинск, 1974; Паланга, 1979), на научной сессии Советского национального комитета международной организации по пространственным конструкциям (Тбилиси, 1971), на международном симпозиуме по основам теории пластичности (Варшава, 1972), на IV международной конференции по строительной механике ядерных реакторов (SMIRT-4; Сан-Франциско, 1977), на XI, XII, XIII, XIV и XV научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (Канев, 1970, 1972, 1974, 1977, 1980), на научно-технических совещаниях по проблемам прочности двигателей (Ленинград, 1971, 1972, 1975, 1979), на семинарах отдела термпрочности Государственного научно-исследовательского института машиноведения (Москва, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1977, 1980), на ежегодных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1970-1980 годах.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, включающих 300 страниц машинописного текста, 93 иллюстрации, 21 таблицу и список литературы, содержащий 396 названий. Общий объем работы 423 страницы.

Во введении к диссертации дано обоснование актуальности и приведена аннотация работы, включающая описание основных теоретических результатов, разработанных методов расчета, их экспериментальной проверки, практических приложений и внедрения.

В первой главе дан анализ основных направлений исследования предельных состояний конструкций, испытывающих неупругое деформирование при циклических тепловых и механических воздействиях, и сформулированы задачи данной работы.

Расчетный анализ прочности конструкций в указанных условиях включает задачи оценки долговечности при заданных внешних воздействиях и задачи оценки несущей способности, т.е. определения предельных параметров механических и тепловых воздействий при ограниченной снизу или сверху долговечности.

Решение этих задач базируется прежде всего на результатах исследования деформационных и прочностных характеристик материалов при малоцикловом изотермическом и неизотермическом нагружении. Значительные теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении были проведены Ю.Н.Работновым, С.В.Серенсенем, Р.М.Шнейдеровичем, Н.А.Махутовым, А.П.Гусенковым, А.А.Ильюшиным, И.А.Биргером, В.Ф.Шорром, Д.А.Гохфельдом, Н.Н.Малининым, Г.С.Писаренко, В.Т.Трощенко, Ю.Н.Шевченко, А.Г.Угодчиковым, *L.F. Coffin*'om, *S.S.Manson*'om и рядом других авторов.

Эти исследования показали, что в общем случае деформационные характеристики материалов изменяются от цикла к циклу. Однако для широкого круга сталей и сплавов при достаточно большом числе циклов они постепенно стабилизируются в определенном (характерном для условий эксплуатации) диапазоне температур и напряжений и в пределах определенных допусков могут считаться не изменяющимися от цикла к циклу в течение значительной части ресурса. Соответственно определились два основных подхода к анализу неупругого поведения конструкций при циклических изменениях температур и нагрузок, подготавливающего процессы разрушения.

Один из них связан с детальным исследованием напряжений и деформаций во всех циклах нагружения, начиная от исходного состояния, характеризуемого начальными (технологическими) остаточными напряжениями. Этот подход призван давать наиболее точную и полную информацию о работе конструкции. Он получил в последние годы значительное развитие в работах И.А.Биргера, И.В.Демьянушко, А.А.Ильюшина, Д.А.Гохфельда, А.Г.Угодчикова, Ю.Г.Коротких, В.В.Москвитина, Ю.Н.Левченко, *Ph.Hodge*'a, *J.H.Argyris*'a, *D.C.Zienkiewicz*'a, *P.Pirzynski* и *A.Sawczuk*'a и ряде других исследований.

Однако практическая реализация данного подхода продолжает сталкиваться с рядом принципиальных и технических трудностей, вызванных отсутствием (на стадии проектирования) надежных данных о технологических остаточных напряжениях и программах изменения внешних воздействий, а также высокой трудоемкостью расчета, ограничивающей возможность анализа достаточно большого числа циклов, проведения вариантных исследований и определения параметров внешних воздействий, отвечающих заданной долговечности.

Второй подход к анализу неупругого поведения конструкций при циклических внешних воздействиях (его развитию посвящена данная работа) связан с непосредственным (не требующим последовательного анализа всего процесса стабилизации) исследованием стабилизированных циклов деформирования конструкций. Стабилизация поведения конструкций достигается (в общем случае - асимптотически по числу циклов) вследствие стабилизации характеристик циклического деформирования материала и образования благоприятного поля остаточных напряжений в процессе неупругого деформирования конструкции в первых - нестабильных - циклах. Общие доказательства существования стабилизированных циклов деформирования конструкций и единственности напряжений в таких циклах, базирующиеся на квазитермодинамическом постулате Друккера, были даны *C. Frederick*'ом и *P. Armstrong*'ом. Частным случаем стабилизации деформирования конструкций является приспособляемость, при которой стационарное поле остаточных напряжений обеспечивает чисто упругую работу конструкции.

Преимуществами данного подхода являются сравнительная простота расчетов, наглядность получаемых механизмов деформирования и их зависимости от различных факторов, возможность определения предельных значений параметров внешних воздействий (в том числе - при неполной информации о программах нагружения), независимость результатов расчета от технологических остаточных напряжений. Следует, однако, отметить, что применение этого подхода ограничено определенным кругом материалов и условий работы, для которых возможна стабилизация деформационных характеристик. Кроме того, за рамками данного подхода остается задача определения повреждений и перемещений, накопленных в процессе нестабильной работы конструкции.

Два рассматриваемых подхода дополняют друг друга; наиболее эффективным является, повидимому, их совместное применение.

Наибольшее развитие в рамках анализа стабилизированных циклов деформирования конструкций получила теория приспособляемости, яв-



ляющаяся обобщением теории предельного равновесия на случай повторных внешних воздействий. Теория приспособляемости позволяет установить предельные параметры внешних воздействий, при которых скорости пластических деформаций после завершения процесса стабилизации равны нулю (или, напротив, отличны от нуля). Развитие этой теории связано с работами Е.Мелана, В.Койтера, В.Прагера, А.Р.Ржаницына, В.И.Розенблюма, В.В.Москвитина, А.Понтера, Д.Майера, Д.Черрадини, Ф.Ходжа, А.Савчука, Я.Кенига. Широкое практическое применение теории приспособляемости обеспечили теоретические и экспериментальные исследования Д.А.Гохфельда. Наиболее перспективной областью приложений теории оказались конструкции, работающие в нестационарных температурных полях как при существенных, так и при слабых механических нагрузках, а также конструкции, испытывающие повторные воздействия подвижных нагрузок. В решении задач оптимального проектирования приспособляющихся конструкций наиболее значительные результаты были получены А.А.Чирасом, А.Э.Воркаукассом, Р.А.Каркаукассом.

Обзор исследований, посвященных теории приспособляемости, показал, что до сих пор были недостаточно развиты актуальные для практических приложений методы анализа условий приспособляемости с учетом ползучести, сложных реальных программ изменения температур и нагрузок, геометрической нелинейности, особенностей распределения напряжений в зонах нарушения геометрической однородности конструкций. Дальнейшего развития и упрощения потребовали методы расчета условий приспособляемости, прежде всего — статические методы, дающие оценку снизу для параметров предельного цикла.

Значительно слабее (по сравнению с теорией приспособляемости) были развиты до сих пор методы определения предельных внешних воздействий для конструкций, работающих за пределами приспособляемости. Известны лишь отдельные частные примеры решения таких задач (работы Д.А.Гохфельда, *J.Bree, F.Beer'a, D.Burgreen'a, W.O'Dannel'a* и *J.Porovsky*); общая теория предельного анализа при непрекращающемся циклическом неупругом деформировании до сих пор отсутствовала.

В области непосредственного расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования при заданных внешних воздействиях ряд решений был получен Б.Ф.Шорром применительно к задачам циклической ползучести и расчетам знакопеременного пластического течения.

Проведенный в первой главе диссертации анализ основных теоретических положений, расчетных методов, экспериментальных проверок и практических приложений исследования стабилизированных циклов деформирования конструкций позволил сформулировать следующие задачи данной работы:

разработка основных теоретических положений предельного анализа конструкций при стационарном циклическом неупругом деформировании, включающих вариационные формулировки задач расчета предельных параметров тепловых и механических воздействий при ограниченных сверху или снизу приращениях и размахах неупругих деформаций за цикл и являющихся обобщением теорий приспособляемости и предельного равновесия;

разработка вариационных формулировок задач расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования при заданных внешних воздействиях, обеспечивающих возможность расчета процессов прогрессирующего накопления односторонних деформаций;

развитие (на основе общих положений анализа стабилизированных циклов неупругого деформирования) теории приспособляемости с учетом ползучести, геометрической нелинейности и сложных реальных программ изменения температур и нагрузок;

дальнейшее развитие точных и приближенных методов решения задач приспособляемости и обобщение их применительно к расчету предельных параметров внешних воздействий и стабилизированных циклов деформирования за пределами приспособляемости;

исследование влияния различных факторов на условия реализации прогрессирующего с числом циклов накопления односторонних деформаций и остаточных перемещений;

разработка (на основе полученных теоретических положений и общих методов расчета) методик определения условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций применительно к ряду типовых элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах, газотурбинных двигателях, металлургического оборудования.

Вторая глава посвящена общим вариационным формулировкам задач расчета стабилизированных циклов деформирования конструкций. Для получения таких формулировок в рамках теории течения рассматривается вначале задача о расчете напряжений и скоростей деформаций в произвольный момент времени  $T_x$  заданного (не обязательно

циклического) процесса нагружения. Предполагается, что процесс деформирования - квазистатический, а деформации малы. Напряжения, действующие в точке тела, представляются в виде суммы остаточных  $\rho_{ij}$  и "упругих" напряжений от внешних воздействий  $\sigma_{ij}^{(e)}$ , вычисленных в предположении идеальной упругости материала. Скорости деформаций представляются в виде сумм скоростей ползучести  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(c)}$ , пластической  $\dot{\epsilon}_{ij}''$ , упругой  $\dot{\epsilon}_{ij}'$  и тепловой деформаций. Показано, что при устойчивом пластическом деформировании материала (при выполнении постулата Друккера) условия, связывающие в каждой точке тела и в каждый момент времени процесса скорости пластических деформаций с величинами действующих напряжений, могут быть заменены требованием минимизации неотрицательного функционала

$$\int_0^{\tau_*} d\tau \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)} - \rho_{ij}^0 - \int_0^{\tau} \dot{\rho}_{ij} d\zeta) \dot{\epsilon}_{ij}'' dV. \quad (I)$$

Здесь  $\sigma_{ij}$  - напряжения на поверхности текучести  $f(\sigma_{ij}) = 0$ , связанные со скоростями пластических деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}''$  ассоциированным законом течения;  $\rho_{ij}^0$  - остаточные напряжения в момент времени  $\tau = 0$ , характеризующие начальное состояние конструкции;  $\dot{\rho}_{ij}$  - скорости остаточных напряжений;  $V$  - объем тела.

Скорости деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}''$  и остаточные напряжения  $\rho_{ij}^0$ , доставляющие функционалу (I) минимальное (нулевое) значение, реализуются в действительном процессе деформирования, если они обеспечивают выполнение следующих ограничений:

1) условий равновесия для остаточных напряжений в объеме тела и на той части поверхности  $S_D$ , где заданы статические ограничения:

$$\rho_{i,j,j}^0 = 0, \quad \rho_{ij}^0 n_j = 0 \quad \text{на } S_D, \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_{i,j,j} = 0, \quad \dot{\rho}_{ij} n_j = 0 \quad \text{на } S_D; \quad (3)$$

2) условий совместности для скоростей остаточных перемещений  $u_i$  и деформаций (тензор упругих коэффициентов  $A_{ijhk}$  принят здесь для простоты не изменяющимся во времени):

$$\dot{\epsilon}_{ij}'' + \dot{\epsilon}_{ij}^{(c)} + A_{ijhk} \dot{\rho}_{hk} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}); \quad (4)$$

3) ограничений на величины напряжений

$$f(\sigma_{ij}^{(e)} + \rho_{ij}^0 + \int_0^{\tau} \dot{\rho}_{ij} d\zeta) \leq 0 \quad (5)$$

и соотношений, устанавливающих закон ползучести.

Применительно к расчету стабилизированных циклов деформирования с периодом цикла  $T$  система ограничений (2)-(5) дополняется условиями замкнутости цикла по напряжениям

$$\int_0^T \dot{\rho}_{ij} d\tau = 0, \quad (6)$$

принимающими в кинематических терминах вид

$$\Delta \varepsilon_{ij}'' + \Delta \varepsilon_{ij}^{(c)} = \frac{1}{2} (\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}), \quad \Delta \varepsilon_{ij} = \int_0^T \dot{\varepsilon}_{ij} d\tau, \quad \Delta u_i = \int_0^T \dot{u}_i d\tau. \quad (7)$$

Функционал (1) в этом случае упрощается. При отсутствии ползучести он совпадает с известным в теории приспособляемости функционалом Койтера-Гохфельда:

$$\int_0^T d\tau \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)}) \dot{\varepsilon}_{ij}'' dV. \quad (8)$$

При наличии не зависящих от времени массовых и поверхностных нагрузок  $\chi_i^0$ ,  $\rho_i^0$  функционал (8) может быть представлен в виде

$$\int_0^T d\tau \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij\tau}^{(e)}) \dot{\varepsilon}_{ij}'' dV - \int_V \chi_i^0 \Delta u_i dV - \int_{S_p} \rho_i^0 \Delta u_i dS, \quad (9)$$

где  $\sigma_{ij\tau}^{(e)}$  - "упругие" напряжения от переменных составляющих механических и тепловых внешних воздействий.

Данные формулировки задач расчета кинетики деформирования и непосредственного расчета стабилизированных циклов деформирования отличаются от известных инкрементальных формулировок проблем теории пластичности тем, что в рамках одной вариационной задачи рассматривается весь процесс деформирования. Возможность практической реализации такого подхода при расчетах конструкций обеспечивается значительным развитием, которое получили за последнее время методы решения неклассических вариационных задач.

В стабилизированных циклах неупругого деформирования может иметь место знакопеременное течение, при котором размах неупругих деформаций за цикл отличен от нуля, а приращения  $\Delta \varepsilon_{ij}'' + \Delta \varepsilon_{ij}^{(c)}$  равны нулю; либо прогрессирующее накопление односторонних деформаций, при котором ширина петли пластического гистерезиса равна нулю, либо их комбинация. Дано доказательство независимости ха-

рактических характеристик стационарного знакопеременного течения от неизменяющихся во времени составляющих внешних воздействий.

Определение предельных параметров внешних воздействий при ограниченной (сверху или снизу) долговечности сводится в рамках анализа стабилизированных циклов деформирования к вычислению максимальных или минимальных параметров нагрузок и температурных полей, при которых приращения и размахи деформаций за цикл ограничены сверху или снизу в соответствии с деформационно-кинетическим критерием малоциклового разрушения. Система ограничений такой вариационной задачи включает (наряду с ограничениями на приращения и размахи деформаций за цикл) условия (2)-(6) и условие равенства нулю функционала (1) или его частных форм (8), (9).

Проведен анализ возможностей использования различных способов описания реальных свойств материалов при расчетах стабилизированных циклов деформирования конструкций в рамках предложенных вариационных формулировок. При получении этих формулировок на способ описания свойств материала не накладывалось по существу иных ограничений, кроме постулата Друккера и предположения о независимости стабилизированных характеристик материала от истории деформирования, предшествующей стабилизации. Это обеспечивает возможность использования ряда различных вариантов теорий циклической ползучести и пластичности, с различной степенью точности отражающих реальные эффекты циклического неизотермического неупругого деформирования. Выбор того или иного варианта определяется не только условиями работы и требованиями к точности описания поведения конструкции, но и характером ожидаемой деформации (знакопеременное течение, прогрессирующее накопление деформаций, их комбинация). Отмечается, что наиболее простой по форме и универсальный по описываемым свойствам материала подход к решению рассматриваемых задач может быть основан на применении структурных моделей среды, разработанных в исследованиях В.В. Новожилова и Ю.И.Кадашевича, Д.А.Гохфельда и О.С.Садакова, В.С.Зарубина и М.А.Кузьмина, Ю.Н.Шевченко. Дается обобщение ограничений (2)-(6) и функционала (1) применительно к использованию структурной модели среды.

В третьей главе диссертации в рамках теории идеальной пластичности рассматривается частный случай проблемы определения предельных внешних воздействий при заданной долговечности: определение условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций (прогрессирующего формоизменения). Решение этой задачи

позволяет выделить такую область значений параметров внешних воздействий, в которой при циклических изменениях нагрузок и температур имеет место накопление существенных остаточных перемещений, а разрушение является квазистатическим или смешанным. Эта область может граничить с областями приспособляемости или знакопеременного течения. Наибольшее развитие анализ прогрессирующего формоизменения получал до сих пор в рамках теории приспособляемости идеально упругопластических тел. Накопление односторонних деформаций рассматривалось при этом как одно из предельных состояний, лимитирующих область приспособляемости.

В данной главе показано, что основные теоремы теории приспособляемости идеально упругопластических тел (теоремы Мелана и Койтера) являются частными случаями приведенной в главе II вариационной формулировки задачи об определении предельных внешних воздействий при ограниченной долговечности. Для получения теоремы Мелана достаточно положить в общей вариационной формулировке задачи скорости пластических деформаций в стабилизированном цикле деформирования равными нулю, а для получения теоремы Койтера - любыми отличными от нуля. Скорости ползучести  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(c)}$  считаются при этом равными нулю. Аналогичным путем получено обобщение теорем Мелана и Койтера с учетом ползучести (в этом случае скорости ползучести в стабилизированном цикле деформирования могут быть отличны от нуля и определяются соответствующими соотношениями, входящими в систему ограничений задачи).

Отмечается, что частными случаями рассмотренной вариационной формулировки задачи расчета предельных параметров внешних воздействий (отвечающими ограниченным и неограниченным скоростям деформаций) являются также статическая и кинематическая теоремы теории предельного равновесия, полученные А.А.Гвоздевым.

Задачи определения условий реализации прогрессирующего формоизменения при развитии знакопеременном течении сводятся к максимизации параметров внешних воздействий при равных нулю приращениях неупругих деформаций за один стабилизированный цикл, либо к минимизации этих параметров - при отличных от нуля приращениях деформаций. Соответствующие системы ограничений вытекают из общей вариационной формулировки задачи расчета предельных параметров внешних воздействий, рассмотренной в главе II. В случаях, когда неизвестными являются параметры не зависящих от времени нагрузок, полученные формулировки задач оказываются аналогичными теоремам

Мелана и Койтера, отличаясь от последних лишь тем, что вместо "упругих" напряжений в них используются напряжения, полученные из расчета стационарного знакопеременного течения.

Теоремы Мелана и Койтера, а также их аналоги, предназначенные для определения условий прогрессирующего формоизменения при развитом знакопеременном течении, преобразованы в данной главе к удобному для приложений виду, позволяющему отделить анализ напряжений и скоростей деформаций в различные моменты времени от решения вариационной задачи и выполнить эти два этапа последовательно. С этой целью введено понятие фиктивной поверхности текучести

$$\varphi(\sigma_{ij}^0) = \max_{\tau} f(\sigma_{ij}^{\tau(e)} + \sigma_{ij}^0) = 0,$$

ограничивающей область допустимых значений не зависящих от времени составляющих напряжений  $\sigma_{ij}^0$ , включающих остаточные напряжения и напряжения от постоянных внешних нагрузок. Показано, что эта поверхность выпукла, сингулярна и связана с приращениями пластических деформаций за цикл соотношением, аналогичным ассоциированному закону течения. Приведены примеры построения фиктивных поверхностей текучести. В случае знакопеременного течения фиктивная поверхность текучести вырождается в линию или точку.

Использование фиктивных поверхностей текучести, параметрически зависящих от характеристик переменных внешних воздействий, позволило свести проблему определения условий прогрессирующего формоизменения к задаче предельного равновесия фиктивно неоднородного и анизотропного тела.

На этой основе получен общий метод определения обобщенных переменных при расчетах условий реализации прогрессирующего формоизменения пластин и оболочек. Он аналогичен соответствующему методу теории предельного равновесия, разработанному А.А.Ильиным, Г.С.Шапиро, Ph. Hodge'ем и другими, и отличается от него использованием фиктивных поверхностей текучести (отражающих влияние переменных составляющих напряжений от тепловых и механических воздействий) вместо действительных поверхностей текучести.

Разработан упрощенный приближенный метод построения фиктивных поверхностей взаимодействия в пространстве усилий, не учитывающий возможности реализации в точке тела в предельном цикле нескольких различных режимов течения. Приведены примеры построения фиктивных поверхностей взаимодействия с помощью точного и приближенного методов и даны формулировки теорем о прогрессирующем формоизменении в обобщенных переменных.

В связи с практическими приложениями теорем о прогрессирующем формоизменении показано, что схематизация реальных диаграмм деформирования должна проводиться с учетом требуемой долговечности, температур, программ нагружения и характера деформирования (знакопеременное течение, прогрессирующее формоизменение, их комбинация). Предложен приближенный метод учета влияния ползучести на условия прогрессирующего формоизменения при наличии в цикле длительного стационарного режима. Он базируется на схематизации изохронных кривых деформирования и является обобщением (применительно к задачам приспособляемости) известного в теории предельного равновесия метода расчета по характеристикам длительной прочности. Возможности применения этого метода ограничены случаями, когда вследствие большой длительности стационарного режима влиянием цикличности нагружения на накопленные в процессе ползучести деформации можно пренебречь.

На примере стержня дан качественный анализ влияния геометрической нелинейности на условия реализации прогрессирующего формоизменения. Рассмотрены различные подходы к учету геометрической нелинейности в задачах предельного анализа при циклических нагружениях. На основе общей вариационной формулировки задачи расчета стабилизированных циклов деформирования показано, что прогрессирующее коробление конструкций в условиях развитого знакопеременного течения обязательно будет иметь место, если существует кинематически возможное распределение ненулевых приращений деформаций за цикл, направления которых совпадают с направлениями скоростей деформаций (для каких-либо точек тела и моментов времени цикла) при стационарном знакопеременном течении.

Четвертая глава посвящена развитию методов расчета стабилизированных циклов деформирования конструкций.

Проблемы расчета стабилизированных циклов при заданных внешних воздействиях и определения предельных внешних воздействий при ограниченной долговечности, сформулированные в предыдущих главах, являются в общей континуальной постановке задачами математической теории оптимальных процессов с ограниченными фазовыми координатами. В дискретной форме, получающейся при замене дифференциальных уравнений равновесия и (или) совместности деформаций системами



алгебраических уравнений и наложении ограничений-неравенств лишь для конечного числа точек, эти проблемы сводятся к задачам математического программирования.

На примере круглых пластинок в данной главе иллюстрируется применение принципа максимума Л.С.Понтрягина к задачам определения условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций при повторных тепловых и механических воздействиях. Показано, что методы математической теории оптимальных процессов соответствуют естественной постановке задач расчета предельных параметров внешних воздействий. Широкое практическое применение этих методов при расчетах стабилизированных циклов деформирования ограничивается пока прежде всего недостаточным универсальным математическим обеспечением ЭВМ.

Применение методов линейного программирования для определения условий прогрессирующего формоизменения иллюстрируется на примере вращающегося плоского диска при циклических изменениях температуры, неравномерно распределенной по радиусу. Даны решения этой задачи в статической и кинематической формулировках. В ходе решения обнаружены не отмечавшиеся ранее механизмы прогрессирующего формоизменения, характерные для повторных тепловых воздействий высокой интенсивности.

Разработаны два новых варианта приближенного статического метода, базирующихся на использовании преобразованных формулировок теорем о прогрессирующем формоизменении и обеспечивающих получение нижних оценок параметров предельного цикла при относительно малой трудоемкости расчета. В первом из них для задания допустимого (но в общем случае не оптимального) распределения остаточных напряжений используются предположения (кинематического характера) о возможных механизмах разрушения. Второй вариант, предназначенный для расчета пластин и оболочек, позволяет получить нижнюю оценку параметров предельного цикла без учета перераспределения усилий в процессе неупругого деформирования (но с учетом перераспределения напряжений по толщине).

Показано, что проблема определения напряжений и скоростей деформаций в стабилизированном цикле деформирования идеально упруго-пластических тел сводится при использовании кусочно-линейных поверхностей текучести к задаче линейного программирования. Дан пример расчета стержневой системы с использованием симплекс-метода. Отмечена высокая устойчивость получаемых размахов и приращений дефор-

маций за цикл по отношению к способу дискретизации задачи по времени.

Разработан приближенный метод расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования при заданных воздействиях, базирующийся, как и приближенные методы теорий предельного равновесия и приспособляемости, на априорном задании допустимых (с точки зрения системы ограничений) полей перемещений и соответствующих им деформаций. Возможности применения этого метода ограничены сравнительно простыми задачами. В качестве примера рассмотрен расчет длинной цилиндрической оболочки при теплосменах при линейном распределении температуры по толщине в каждый момент времени.

В пятой главе разработанные методы расчета условий реализации прогрессирующего накопления односторонних деформаций применяются к анализу поведения круглых пластинок и дисков, испытывающих повторные тепловые и механические воздействия.

На примерах круглой пластинки ступенчатого профиля, нагруженной осевой силой при переменной по радиусу температуре, и заземленной пластинки, нагруженной давлением при неравномерном распределении температуры по толщине, иллюстрируются основные особенности применения принципа максимума Л.С.Понtryгина и аппарата линейного программирования в расчетах условий прогрессирующего формоизменения пластинок. Обсуждаются приемы рациональной организации вычислений при использовании симплекс-метода в рамках статической и кинематической формулировок задачи.

Развита методика расчета условий реализации прогрессирующего накопления деформаций в дисках осевых газовых турбин, учитывающая влияние длительности эксплуатации, сложных реальных программ изменения температур и скоростей вращения, а также возможность реализации ряда необнаруженных ранее механизмов прогрессирующего разрушения дисков при достаточно больших температурных напряжениях.

Расчет дисков с учетом длительности эксплуатации базируется на приближенном подходе, использующем схематизацию изохронных кривых деформирования. Приведены примеры, показывающие, что при наличии в цикле изменения внешних воздействий длительного стационарного режима реализуются смешанные вязко-пластические механизмы прогрессирующего разрушения. В частности, при достаточно быстрых запусках турбины в центральной части диска накопление деформаций обусловлено пластическим деформированием при пуске; в периферий-

ной части - ползучестью на стационарных режимах. Частным случаем разработанной методики оказывается известный расчет дисков по разрушающим оборотам. Он отвечает такой ситуации, когда скорости вращения и перепады температур диска на нестационарных режимах невелики и не приводят к повторному пластическому деформированию.

Возможность учета сложных реальных программ нагружения дисков, а также не учитывавшихся ранее механизмов прогрессирующего разрушения (связанных с реализацией в стабилизированном цикле различных режимов течения в одной и той же точке диска) достигнута в данной методике вследствие применения преобразованных формулировок теорем Мелана и Койтера, использующих понятие фиктивной поверхности течучести.

Приведены примеры расчета дисков турбин транспортных и судовых ГТД, в которых реализация указанных выше механизмов прогрессирующего разрушения существенно снижает несущую способность диска.

Разработана методика расчета дисков осевых газовых турбин с учетом влияния замковых впадин диска на распределение напряжений. На примере расчета диска турбины ГТУ-15А, разработанной НПО "Пролетарский завод", показано, что наличие множественных зон концентрации напряжений существенно влияет на условия частичного прогрессирующего разрушения диска и приводит к снижению несущей способности. При этом накопление деформаций происходит в узкой периферийной части диска, прилегающей к замковым выступам. Для этой части характерно повышение общей напряженности вследствие влияния замковых выступов (по сравнению с расчетом, выполненным в предположении полной круговой симметрии). Необходимым условием накопления деформаций является, как и во всех случаях прогрессирующего разрушения, неизохронность неупругого деформирования в рассматриваемой части диска.

Разработанные методики расчета условий прогрессирующего разрушения дисков осевых газовых турбин внедрены в научно-производственном объединении "Пролетарский завод". Их применение обеспечивает снижение затрат времени на проектирование и повышение надежности дисков турбин.

Шестая глава диссертации посвящена анализу стабилизированных циклов деформирования оболочек вращения при повторных тепловых и механических воздействиях.

Рассмотрены примеры расчета условий прогрессирующего разрушения цилиндрических оболочек с применением принципа максимума Л.С.Понтрягина и симплекс-метода. Разработанные приближенные методы расчета условий прогрессирующего разрушения с учетом ползучести применены для анализа предельных состояний цилиндрических оболочек, нагруженных внутренним давлением при циклических изменениях температуры по толщине стенки (типа оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах и труб теплообменников и парогенераторов). Получены диаграммы приспособляемости таких оболочек, показывающие, что при малой интенсивности теплообмена и большой механической нагрузке несущая способность может лимитироваться только накоплением деформаций ползучести на стационарных режимах работы. При увеличении перепадов температуры становится возможной реализация смешанных вязко-пластических механизмов накопления деформаций, и нестационарные повторные тепловые воздействия приводят к снижению несущей способности оболочки.

Исследована зависимость условий прогрессирующего накопления деформаций в цилиндрических оболочках от характера распределения температур при квазистационарных относительно подвижной системы координат температурных полей при несущественных механических нагрузках. Расчетным путем показано, что в зависимости от характера температурного поля может быть получено прогрессирующее с числом циклов увеличение или уменьшение диаметра оболочки, равномерное вдали от краев и неравномерное (раструб или сужение) у торцев. Сопоставление расчетных температур начала формоизменения и ожидаемых механизмов накопления деформаций с экспериментальными данными показало их хорошее соответствие.

С помощью аппарата линейного программирования при условии текучести Треска проведен расчет стабилизированных циклов неупругого деформирования длинной цилиндрической оболочки при воздействиях заданного (квазистационарного относительно подвижной системы координат) поля температур. Получена зависимость приращений деформаций за цикл от максимальной температуры цикла. Показано, что при достаточно больших градиентах температур, когда знакопеременное течение в окружном направлении охватывает все поперечное сечение оболочки, расчет приращений деформаций за цикл становится неустойчивым. Неустойчивость счета соответствует здесь неустойчивости процесса пластического деформирования и согласуется с предложенным критерием для определения верхней оценки условий прогрес-

сирующего коробления. Данный результат качественно соответствует результатам испытаний цилиндрических оболочек.

На основе разработанных общих приближенных методов расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения получены методики расчета основных внутрикорпусных элементов высокотемпературных ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Проведены расчеты условий прогрессирующего формоизменения ряда внутрикорпусных элементов реактора БН-600 (третьей очереди Белоярской АЭС): обечайки центральной колонны реактора, опоры теплообменника, труб систем управления и защиты и др. На основе этих расчетов установлено, что предельные (по условиям прогрессирующего формоизменения) параметры нагрузок и температурных полей для деталей, расположенных ниже уровня теплоносителя (натрия) превышают эксплуатационные значения этих параметров. Однако в деталях, расположенных в зоне уровня теплоносителя (циклически изменяющегося в процессе эксплуатации) прогрессирующее формоизменение может иметь место, если не принимать специальных мер для снижения градиентов температуры при срабатывании аварийной защиты. Результаты расчетов позволили работникам проектной организации разработать мероприятия, исключающие возможность прогрессирующего формоизменения элементов реактора БН-600.

Накопленный опыт расчетов элементов реакторов обобщен в разработанном кафедрой СМ и ДПМ ЧПИ проекте посвященного прогрессирующему формоизменению раздела "Норм расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок". В проект включены, в частности, разработанные в данном исследовании строгие (основанные на использовании аппарата линейного программирования) и приближенные статические методы расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения. Проект прошел первоначальную апробацию на предприятиях отрасли и находится в стадии утверждения соответствующими министерствами.

Дан анализ условий реализации прогрессирующего формоизменения перфорированных цилиндрических оболочек и приведены экспериментальные данные по формоизменению таких оболочек в условиях теплообмена, подтверждающие вывод о существенном влиянии множественных концентраторов напряжений на накопление односторонних деформаций.

На основе кинематической теоремы о прогрессирующем формоизменении, представленной в форме, использующей понятие фиктивной поверхности текучести, разработаны методики и проведены расчеты элементов металлургического оборудования: цилиндрической оболочки кристаллизатора для полунепрерывной отливки труб и конической оболочки чаши шлаковоза, испытывающих повторные тепловые воздействия (в связи с изменением уровня теплоносителя - жидкого чугуна, шлака) при незначительных механических нагрузках. Полученные в результате расчетов предельные параметры тепловых воздействий и механизмы разрушения (распределения приращений деформаций в стабилизированном цикле) удовлетворительно согласуются с данными по формоизменению этих объектов в условиях эксплуатации.

Разработаны статические методы расчета условий прогрессирующего формоизменения сферических и конических оболочек при повторных тепловых и механических воздействиях. Приведены примеры расчета сферического купола, нагруженного внутренним давлением при изменениях перепадов температуры по толщине (расчет выполнен с помощью статического и кинематического приближенных методов) и конической оболочки ротора двухступенчатой газовой турбины (предельные параметры центробежных сил и температурных полей получены с помощью симплекс-метода).

Разработанные методики расчета условий прогрессирующего формоизменения оболочек и пластинок (точные - использующие аппарат линейного программирования - и приближенные статические) включены в разработанные кафедрой СМ и ДПМ ЧПИ межотраслевые методические указания "Методы и алгоритмы расчета на приспособляемость и формоизменение". Данная работа выполнена в соответствии с заданием № 08.04 утвержденной Госстандартом СССР "Программы работ по реализации задания 6.1.01.04 Государственного пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы".

Разработанные вариационные методы расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования полностью применимы для решения задач оптимального управления процессами нагружения конструкций при ограниченных размахах и приращениях деформаций за цикл. В качестве примера с помощью симплекс-метода решена задача оптимального по быстрдействию подъема температуры теплоносителя в цилиндрической оболочке, нагруженной внутренним давлением, при выполнении условий приспособляемости. Показано, что трудоемкость решения

этой задачи близка к трудоемкости расчета стабилизированного цикла неупругого деформирования оболочки при заданных внешних воздействиях.

В заключении кратко подводятся итоги работы и намечаются некоторые задачи для дальнейших исследований в изучаемой области.

## В В О Д Ы

В диссертации сформулированы основные теоретические положения и развиты расчетные методы нового направления исследования несущей способности и долговечности конструкций: анализа предельных циклических состояний в условиях непрекращающегося неупругого деформирования при циклических тепловых и механических воздействиях. Полученные результаты обеспечивают возможность определения предельных внешних воздействий, отвечающих заданной долговечности при стационарном циклическом деформировании, а также непосредственного расчета стационарных циклов деформирования при заданных внешних воздействиях. Они являются обобщением и развитием теорий предельного равновесия и приспособляемости. Основные итоги работы сводятся к следующему.

1. Проблема расчета кинетики неупругого деформирования сформулирована в виде неклассической вариационной задачи, отличающейся от известных инкрементальных формулировок проблем теории пластичности тем, что в рамках одной вариационной задачи рассматривается весь процесс деформирования. С этой целью соотношения, связывающие действующие напряжения со скоростями пластических деформаций, заменены эквивалентным требованием минимизации специального функционала, учитывающего всю историю деформирования конструкции, предшествующую данному моменту времени.

На этой основе получена вариационная формулировка задачи непосредственного расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования конструкций (без исследования первых, нестабильных циклов), позволяющая учесть кратковременные пластические деформации, ползучесть и их взаимодействие.

2. В качестве следствий вариационной формулировки задачи расчета кинетики деформирования получены необходимые и достаточные условия существования стационарных циклов, в которых скорости,

приращения и размахи за цикл неупругих деформаций ограничены сверху или снизу заданными значениями, т.е. получены соотношения для решения задачи предельного анализа стационарных циклов в ее наиболее общей форме.

Показано, что частными случаями этих условий (отвечающими соответственно нулевым и произвольным ненулевым скоростям пластических деформаций в стабильном цикле) являются известные основные теоремы теории приспособляемости - Мелана и Койтера. Дано обобщение последних с учетом ползучести.

Получены общие вариационные формулировки задач определения предельных параметров внешних воздействий, отвечающих только знакопеременному течению, либо только накоплению односторонних деформаций в стабилизированных циклах деформирования. Дано доказательство независимости изменения напряжений и деформаций в условиях стабильного знакопеременного течения от напряжений, вызванных постоянными во времени внешними воздействиями. Формулировки задач определения предельных - по условиям накопления односторонних деформаций при развитом знакопеременном течении - параметров постоянных нагрузок преобразованы (применительно к идеально упруго-пластическим телам) к виду, аналогичному теоремам Мелана и Койтера.

3. Рассмотрена роль геометрической нелинейности в развитии процесса прогрессирующего накопления деформаций и получен критерий, позволяющий найти верхнюю оценку параметров внешних воздействий, отвечающих появлению прогрессирующего коробления конструкций при повторных тепловых и механических воздействиях в случаях, когда изменения геометрических характеристик в пределах каждого цикла нагружения незначительны.

4. Предложен приближенный метод учета ползучести в задачах приспособляемости, являющийся обобщением соответствующего метода теории предельного равновесия применительно к циклическим внешним воздействиям, включающим в каждом цикле длительный этап работы конструкции при неизменных нагрузках и температурах. Данный метод позволяет при определении предельных внешних воздействий учесть возможность реализации смешанных вязко-пластических механизмов прогрессирующего формоизменения, которые связаны с накоплением пластических деформаций на переходных режимах в одной части конструкции и деформаций ползучести на стационарных режимах в другой ее части. Возможности применения предложенного метода



ограничены случаями, когда вследствие большой длительности стационарного режима работы влиянием цикличности нагружения на накопленные в процессе ползучести деформации можно пренебречь.

Предложены приближенные методы учета зависимостей деформационных характеристик материала от истории деформирования при определении условий упругой приспособляемости.

5. В связи с расчетом условий реализации прогрессирующего формоизменения теоремы Мелана и Коитера и их аналоги, определяющие условия накопления односторонних деформаций при развитом накоперенном течении, преобразованы к виду, позволяющему отделить анализ напряженно-деформированного состояния в различные моменты времени от решения вариационной задачи. Проблема расчета условий прогрессирующего формоизменения сводится при этом к задаче предельного равновесия фиктивно неоднородного анизотропного тела.

На этой основе разработаны точный и приближенный методы определения обобщенных переменных при расчетах условий реализации прогрессирующего формоизменения пластин и оболочек, учитывающие возможность одновременного неупругого деформирования в различных точках, лежащих на одной нормали к срединной поверхности оболочки (пластинки). Использование обобщенных переменных значительно снижает трудоемкость расчетных методов определения условий реализации прогрессирующего формоизменения.

6. Проблемы определения предельных параметров внешних воздействий и расчета стабилизированных циклов деформирования при заданных воздействиях сформулированы на основе полученных общих соотношений как задачи математической теории оптимальных процессов. В дискретной форме они сводятся к задачам математического программирования - линейного или выпуклого.

На основе общих методов решения задач математической теории оптимальных процессов и математического программирования в данном исследовании разработан ряд точных и приближенных методов расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения при циклических тепловых и механических воздействиях как при отсутствии накоперенного течения, так и при существенных размахах неупругих деформаций за цикл. Он включает различные варианты приближенного статического метода, дающего оценку снизу для параметров предельного цикла; численные методы (в статической и кинематической формулировках), использующие аппарат линейного программирования и

соответствующие стандартные подпрограммы для ЭВМ, и аналитические методы, использующие принцип максимума Л.С.Понтрягина.

Показано, что методы расчета условий реализации прогрессирующего накопления деформаций полностью применимы и для расчета стабилизированных циклов деформирования при заданных внешних воздействиях. Однако трудоемкость расчетов в последнем случае повышается, поскольку не удастся отделить анализ напряженно-деформированного состояния конструкции от решения вариационной задачи.

7. Разработанные общие методы анализа предельных (стабилизированных) состояний конструкций при циклических тепловых и механических воздействиях иллюстрируются многочисленными примерами расчета осесимметричных круглых пластинок, цилиндрических, конических и сферических оболочек.

Решение этих примеров позволило выявить приемы рациональной организации вычислений, возможности различных методов, границы их применимости и перспективы дальнейшего развития. Вместе с тем, на примерах изучено влияние различных факторов на прогрессирующее накопление односторонних деформаций и дана экспериментальная проверка разработанных методов расчета.

Расчетным путем показана возможность управления процессом прогрессирующего формоизменения при теплосменах. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями прогрессирующего формоизменения цилиндрических оболочек.

Показано, что в зонах нарушения геометрической однородности конструкций наряду со знакопеременным течением возможно накопление существенных односторонних деформаций, если распределение максимальных значений напряжений неизохронно. Накопление односторонних деформаций в зонах концентрации напряжений воспроизведено при испытаниях тонкостенных перфорированных цилиндрических образцов (с различными характеристиками перфорации) в условиях теплосмен при несущественных механических нагрузках.

Сопоставление результатов расчетов условий реализации прогрессирующего накопления деформаций с данными эксплуатации металлургического оборудования и результатами лабораторных исследований цилиндрических оболочек в условиях теплосмен показало, что разработанные методы расчета позволяют достаточно достоверно отразить реальное поведение элементов конструкций. Эти методы обеспечивают

возможность существенного расширения области приложений анализа предельных циклических состояний при неизотермических нагружениях и возможность изучения ряда эффектов, исследование которых с помощью других методов оказывалось до сих пор невозможным или затруднительным.

8. Разработанные вариационные методы расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования могут быть использованы для решения задач оптимального управления процессами циклического нагружения конструкций при ограниченных размахах и приращениях пластических деформаций за цикл. В качестве примера решена задача оптимального по быстрдействию подъема температуры теплоносителя в цилиндрической оболочке, нагруженной внутренним давлением.

9. Полученная система общих теорем и методов расчета стабилизированных циклов неупругого деформирования позволила разработать методики расчета условий реализации прогрессирующего формоизменения основных внутрикорпусных элементов высокотемпературных ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Эти методики внедрены в практику работы конструкторских организаций; по ним выполнены расчеты ряда ответственных элементов реактора БН-600 (III очередь Белоярской АЭС). Результаты расчетов использованы работниками проектной организации для разработки мероприятий, исключающих возможность прогрессирующего формоизменения и повышающих надежность и долговечность реактора. Накопленный при этом опыт расчетов элементов реакторов обобщен в проекте "Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок". Проект прошел первоначальную апробацию на предприятиях отрасли и находится в стадии утверждения соответствующими министерствами.

Применительно к дискам осевых газовых турбин методика расчета условий прогрессирующего накопления деформаций развита с учетом сложных реальных программ нагружения, длительности эксплуатации, концентрации напряжений вблизи замковых выступов диска, возможности реализации ряда не обнаруженных ранее механизмов прогрессирующего накопления деформаций. Методика внедрена в проектной организации.

Разработанные общие методы анализа стабилизированных циклов деформирования конструкций, полученные в данной работе, используются (вместе с методами решения задач приспособляемости, полученными

ми Д.А.Гохфельдом) при разработке методических указаний "Методы и алгоритмы расчета на приспособляемость и формоизменение", подготовленных в соответствии с заданием 08.04 утвержденной Госстандартом СССР "Программы работ по реализации задания 6.1.01.04 Государственного пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР на 1976-1980 годы в части создания комплекса межотраслевых нормативно-технических документов по методам расчетов и испытаний на прочность в машиностроении".

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях. М., Машиностроение, 1979, 263 с.

2. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. *Limit analysis of structures at thermal cycling. Amsterdam, Sijthoff and Noordhoff Internat. Publ., 1980, 576 pp.*

3. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Приспособляемость упруго-пластических конструкций (обзор). В сб.: Проблемы теории пластичности и ползучести. М., Мир, 1979, с.7-53.

4. Гохфельд Д.А., Кононов К.М., Садаков О.С., Чернявский О.Ф. Проблемы прочности термонапряженных конструкций. В кн.: Итоги науки и техники. Механика деформируемого твердого тела. Т.12, М., ВИНТИ, 1978, с.91-194.

5. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Некоторые математические методы решения задач предельного равновесия и приспособляемости. III Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. М., Изд.АН СССР, 1978, с.103.

6. Чернявский О.Ф. О решении задач предельного равновесия и приспособляемости с помощью принципа максимума Л.С.Понтрягина. Известия АН СССР, Механика твердого тела, № 4, 1970, с.99-106.

7. Чернявский О.Ф. Несущая способность идеально пластической конической оболочки при теплосменах. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып.10. Киев, Наукова думка, 1970, с.166-172.

8. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Обобщенные переменные в задачах приспособляемости пластинок и оболочек. В кн.: Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок. М., Наука, 1970, с.194-200.

9. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Применение методов линейного программирования к задачам приспособляемости в кинематической формулировке. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып.9. Киев, Наукова думка, 1970, с.273-282.

10. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Об определении условий прогрессирующего разрушения в осесимметричных задачах приспособляемости методами линейного программирования. Известия АН СССР, Механика твердого тела, № 3, 1970, с.96-104.

11. Гохфельд Д.А., Лаптевский А.Г., Чернявский С.Ф. Прогрессирующее формоизменение цилиндрических оболочек при теплосменах. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. II. Киев, Наукова думка, 1971, с.164-167.

12. Гохфельд Д.А., Лаптевский А.Г., Чернявский О.Ф. Прогрессирующее формоизменение оболочек при теплосменах. В кн.: Теория оболочек и пластин. Труды УШ Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. М., Наука, 1973, с.114-118.

13. Чернявский О.Ф., Шалыганова В.В. О некоторых особенностях решения задач приспособляемости методами линейного программирования. В сб.: Вопросы прочности и динамики конструкций. Сб.научн. трудов ЧПИ, № 92. Челябинск, 1971, с.44-48.

14. Беляков А.Р., Чернявский О.Ф. Об одном механизме накопления односторонней пластической деформации в условиях циклического сложного нагружения. В сб.: Вопросы прочности в машиностроении. Сб.научн.трудов ЧПИ, № 151, Челябинск, 1974, с.56-66.

15. Беляков А.Р., Чернявский О.Ф. Анализ приспособляемости круглой пластинки при многопараметрическом нагружении. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 14. Киев, Наукова думка, 1974, с.48-51.

16. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. *Methods of solving problems in the shakedown theory of continua*. In: *Proc. Internat. Symposium on Foundation of Plasticity, Warsaw, 1972. Leyden, Noordhoff Internat. Publ., 1973, p.p. 435-450.*

17. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Теория приспособляемости, ее современное состояние, прикладное значение и направления развития. В сб.: Вопросы прочности в машиностроении. Сб.научных трудов ЧПИ, № 151, Челябинск, 1974, с.3-32.

18. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Теория приспособляемости и накопление деформаций при теплосменах. В сб.: Материалы Всесоюзного симпозиума по малоцикловой усталости при повышенных температурах. Вып. 3, Челябинск, 1974, с.3-31.

19. Плагов И.М., Чернявский О.Ф. Прогрессирующая деформация элементов металлургического оборудования в условиях теплосмен. В сб.: Вопросы прочности в машиностроении. Сб. научн. трудов ЧПИ, № 151, Челябинск, 1974, с.33-45.

20. Чернявский О.Ф. О прогрессирующем выпучивании в условиях теплосмен. В сб.: Материалы Всесоюзного симпозиума по малоцикловой усталости при повышенных температурах. Вып. 3. Челябинск, 1974, с.127-129.

21. Чернявский О.Ф., Черняев Э.Ф. Приспособляемость цилиндрических оболочек при повторных механических и тепловых воздействиях. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 14. Киев, Наукова думка, 1974, с.52-64.

22. Чернявский О.Ф., Черняев Э.Ф., Амелькович Ю.П. Влияние некоторых факторов на прогрессирующее формоизменение цилиндрической оболочки при циклических изменениях уровня теплоносителя. В сб.: Материалы Всесоюзного симпозиума по малоцикловой усталости при повышенных температурах. Вып. 4. Челябинск, 1974, с.127-131.

23. Гохфельд Д.А., Кононов В.М., Чернявский О.Ф. Приспособляемость перфорированных пластин. В кн.: Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Тбилиси, Мецниереба, 1975, с.356-363.

24. Гохфельд Д.А., Плагов И.М., Чернявский О.Ф. Накопление деформаций в оболочке в условиях теплосмен при несущественной механической нагрузке. В кн.: Теория оболочек и пластин. Труды X Всесоюзной конференции. Ленинград, Судостроение, 1975, с.312-315.

25. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф., Прогрессирующее разрушение оболочек. В сб.: Пространственные конструкции зданий и сооружений. Вып. 2, М., Стройиздат, 1975, с.15-19.

26. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф., Черняев Э.Ф. Прогрессирующее формоизменение цилиндрических оболочек при циклических изменениях уровня теплоносителя. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 16. Киев, Наукова думка, 1976, с.94-97.

27. Амелькович Ю.П., Чернявский О.Ф., Черняев Э.Ф. Прогрессирующее пластическое разрушение цилиндрических оболочек при различных скоростях погружения в жидкий теплоноситель. В сб.: Динамика

и прочность машин. Сб. научн. трудов ЧПИ, № 201, Челябинск, 1977, с. 15-21.

28. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. *On the steady cyclic stress analysis for elastic-plastic structures subjected to repeated actions of load and temperature. In: Trans. of the 4th Internat. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, San-Francisco, Calif., 1977. Vol. L. Amsterdam e.a., 1977, L 3/6.*

29. Кононов В.М., Чернявский О.Ф. Определение условий приспособляемости круглых перфорированных пластин при циклических механических и тепловых воздействиях. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 17. Киев, Наукова думка, 1977, с. 53-57.

30. Чернявский О.Ф. Анализ стабилизированных циклов напряжений в идеально упругопластических конструкциях. В сб.: Динамика и прочность конструкций. Сб. научных трудов ЧПИ, № 201, Челябинск, 1977, с. 3-9.

31. Чернявский О.Ф. Приспособляемость сферических оболочек при циклических воздействиях внутреннего давления и неравномерного нагрева. В сб.: Тепловые напряжения в элементах конструкций. Вып. 18. Киев, Наукова думка, 1978, с. 29-33.

32. Чернявский О.Ф. Неупругая приспособляемость при циклических тепловых и механических воздействиях. УП Всесоюзная конференция по прочности и пластичности. Тезисы докладов. Горький, 1978, с. 132-133.

33. Амелькович Ю.П., Чернявский О.Ф. Расчет стабильных циклов напряжений и скоростей деформаций в цилиндрических оболочках. В сб.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузениях. Сб. научн. трудов ЧПИ, № 236, Челябинск, 1979, с. 26-33.

34. Амелькович Ю.П., Беляков А.Р., Чернявский О.Ф., Черняев Э.Ф. Оптимальное управление нестационарными тепловыми процессами в условиях приспособляемости. В сб.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных напряжениях. Сб. научн. трудов ЧПИ, № 236, Челябинск, 1979, с. 16-25.

35. Чернявский О.Ф. Расчет стабилизированных циклов напряжений с использованием структурной модели среды. В сб.: Прочность машиностроительных конструкций при переменных нагрузениях. Сб. научн. трудов ЧПИ, № 236, Челябинск, 1979, с. 34-39.

36. Чернявский О.Ф. Неупругая приспособляемость конструкций при стационарном циклическом нагружении. В сб.: Малоцикловая усталость элементов конструкций. Вып. I. Вильнюс, 1979, с.106-108.

37. Гохфельд Д.А., Кононов В.М., Чернявский О.Ф. Накопление деформаций в перфорированных оболочках при повторных тепловых воздействиях. В кн.: Труды XII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Том II. Ереван, изд. Ереванского университета, 1980, с.76-81.