

702

Челябинский политехнический институт имени
Ленинского комсомола

На правах рукописи

ЕРЕМИН Юрий Алексеевич

УДК 539.376

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ
РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Специальность 01.02.04 - механика деформируемого
твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск 1987

Работа выполнена в Куйбышевском ордена Трудового
Красного Знамени политехническом институте им. В.В.Куйбышева

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	С.А.Шестериков,
доктор технических наук, профессор	И.А.Биргер,
доктор технических наук	О.С.Садаков


Ведущее предприятие указано в решении ученого Совета

Защита состоится "26" ноября 1967 г., в 15 часов,
на заседании специализированного совета Д.Ф.З.13.01 при
Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола
по адресу: 454044, Челябинск-44, проспект им.Ленина, 76,
в ауд. 244.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан "15" сентября 1967 г.

Ученый секретарь

специализированного совета  В.М.Кононов

Решениями XXVII съезда КПСС и "Основными направлениями экономического и социального развития СССР с 1986 по 1990 год и на период до 2000 года" определено дальнейшее увеличение ресурса и снижение материалоемкости конструкций при одновременном росте их единичных мощностей. Последнее связано с увеличением рабочих параметров и, соответственно, нагруженности деталей машин, работающих в режиме ползучести при нестационарных температурно-силовых воздействиях. Повышение нагруженности требует наиболее полного использования прочностных и деформационных свойств конструкций, что делает необходимым дальнейшее совершенствование расчетных и экспериментальных методов в направлении учета в них реальных условий работы деталей. Одним из эффективных путей решения указанной проблемы является разработка методов прогнозирования поведения реономной конструкции, основанных на синтезе эксперимента и расчета. Успех такого подхода во многом определяется наличием адекватной модели конструкции, структурные параметры которой должны допускать как расчетное, так и экспериментальное определение.

Существенным резервом повышения долговечности и надежности ответственных агрегатов является эксплуатация их по техническому состоянию, для чего необходима разработка эффективных методов прогнозирования индивидуального остаточного ресурса.

Важным звеном в решении указанных проблем является разработка феноменологического метода построения реологических моделей конструкций. Здесь под реологической моделью конструкции (РМК) понимаются определяющие соотношения, связывающие внешние нагрузки (обобщенные силы) в температуру непосредственно с характерными (обобщенными) перемещениями или деформациями в элементе конструкции, вызванными ползучестью.

Актуальность проблемы построения реологических моделей конструкций обусловлена следующими причинами:

1. Для многих ответственных элементов машин, работающих в условиях высоких температур и нагрузок (диафрагмы паровых турбин, детали газотурбинных двигателей, оболочки, резьбовые соединения и др.), одним из критериев работоспособности являются характерные перемещения или деформации в опасной области (точке),

вызванные ползучестью. При традиционном подходе определение необходимых перемещений осуществляется путем решения соответствующей краевой задачи. При нестационарных внешних воздействиях краевая задача должна решаться с учетом истории нагружения. Такой путь трудоемок и дает информацию о напряженно-деформированном состоянии (НДС) в каждой точке детали, которая часто является избыточной, поскольку лишь небольшая ее часть используется в дальнейшем. Если же иметь непосредственную связь между внешними нагрузками и интересующими нас перемещениями (деформациями), то прогноз деформационных свойств конструкции при нестационарных внешних воздействиях существенно упростится и в некоторых случаях повысится его надежность.

2. Общеизвестны трудности, которые встречаются при расчете НДС элементов конструкций, работающих в условиях нелинейной ползучести. Здесь большие размерности задач усугубляются необходимостью громоздких вычислений по временным слоям, что в ряде случаев вызывает существенные затруднения даже при использовании современных ЭВМ. В силу нелинейности в задачах ползучести отсутствуют в настоящее время эффективные приемы понижения размерности, аналогичные методам суперэлементов и многоуровневой схематизации, известных в задачах упругости.

В то же время реологическая модель конструкции может служить физической гипотезой, на основе которой упомянутые методы рационального счета могут быть распространены на задачи нелинейной ползучести.

3. Следует ожидать, что при формировании непосредственных связей между обобщенными силами, температурой и обобщенными перемещениями, число структурных параметров будет сравнительно небольшим. Тогда открываются новые возможности в формулировании стохастических уравнений для конструкции как целого с последующим переходом к детерминированным соотношениям, описывающим индивидуальные деформационные свойства конкретного изделия. Последнее может являться основой для эксплуатации по техническому состоянию конструкций, критериями работоспособности которых являются характерные перемещения, накопленные в результате ползучести.

Перечисленные пункты соответствуют общей структуре данной диссертационной работы, тема которой соответствует проблемам, сформулированным в Plane научных исследований по естественным

и общественным наукам АН СССР на 1981-85 годы от 25.12.80 (тема I.10.2.4 "Ползучесть и длительная прочность") и в Плане стандартизации по надежности, прочности и износостойкости на 1981-85 годы и на период до 1990 г. 450-I.09.82, утвержденном постановлением Госстандарта от 1 октября 1981 года, № 139 (раздел I.09.06.01 "Исследование, оптимизация и разработка методов расчета долговечности элементов машин, эксплуатирующихся при переменных температурно-силовых режимах").

Диссертация выполнена в соответствии с тематическим планом НИР Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. В.В.Куйбышева на 1981-1985 и 1985-1990 годы; ее разделы входят составной частью в научно-техническую программу Минвуза РСФСР "Надежность конструкций" и являются основой для разработки заданий на текущую пятилетку по планам некоторых отраслевых министерств, Госстандарта, АН СССР, а также общесоюзной научно-технической программы ГКНТ и АН СССР "Надежность" на 1986-1990 г.г. и координационного плана НИР вузов в области механики на 1985-1990 г.г. (Минвуз СССР).

Целью работы является:

- разработка метода построения определяющих соотношений для реономных конструкций, связывающих обобщенные нагрузки и температуру с обобщенными перемещениями; при этом необходимая информация может быть получена из небольшого числа специально организованных либо натуральных, либо численных экспериментов над конструкцией;
- разработка основ применения известного в теории упругости приема рациональных численных вычислений (многоуровневой схематизации) для расчета НДС сложных конструкций, работающих в условиях нелинейной ползучести при нестационарном температурно-силовом нагружении; применение идей многоуровневой схематизации для ряда практически важных задач, решение которых в традиционной постановке встречает значительные трудности;
- разработка метода прогнозирования индивидуальных деформационных свойств, являющегося основой для эксплуатации по техническому состоянию конструкций, критерием работоспособности которых служат характерные перемещения, накопленные в результате ползучести; применение метода прогнозирования для решения практически важных задач.

Научная новизна заключается в следующем:

- впервые с использованием некоторых универсальных положений теории управления и рассмотрения конструкций на разных иерархических уровнях как единого целого разработан феноменологический метод построения реологических моделей конструкций, позволяющий формулировать определяющие соотношения, в которых обобщенная нагрузка и температура связываются с обобщенными перемещениями;

- получены новые определяющие соотношения для описания неадиабатической ползучести материалов и конструкций, которые отличаются от существующих большей разрешающей способностью при описании сложных эффектов, возникающих при нестационарном температурно-силовом нагружении; это достигается за счет разделения наследственности материала по напряжениям и температуре;

- с позиций разрабатываемого подхода систематизированы реологические уравнения для широкого круга материалов и на этой основе разработан план идентифицирующих экспериментов; выполненная схематизация может служить базой для унификации определяющих соотношений и построения карт-схем деформирования материала в различных температурно-силовых областях;

- разработан метод вычисления обобщенных перемещений для нестационарно нагруженных конструкций, который позволяет существенно сократить количество вычислений за счет того, что решение краевой задачи для произвольно меняющихся обобщенных нагрузок и температуры заменяется решением той же задачи при простейших нагружениях в режиме определяющего эксперимента;

- показано, что реологическая модель конструкции является физической гипотезой, которая позволяет известным в теории упругости прием рациональных численных вычислений (многоуровневую схематизацию) впервые применить при расчете НДС сложной конструкции, работающей в условиях нелинейной ползучести при нестационарном температурно-силовом нагружении;

- показано, что реологическая модель конструкции позволяет существенно расширить круг решаемых задач за счет синтеза эксперимента и расчета, поскольку на любом уровне декомпозиции сложной конструкции появляется возможность впервые вводить в рассмотрение труднообсчитываемый элемент, определяющие соотношения для которого могут быть построены по результатам специально

организованного натурального эксперимента;

- впервые эффективно решена задача о прогнозировании индивидуальных деформационных свойств единичного изделия.

Достоверность основных научных положений подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчета по предлагаемым методам с многочисленными экспериментальными данными, полученными как автором, так и другими исследователями. Эксперименты были выполнены как на моделях конструкций различного уровня сложности, так и на натуральных конструкциях в условиях стендовых испытаний и эксплуатации. Каждый раз использовались режимы нагружения, включающие в себя ступенчатое изменение нагрузки и температуры, при которых наиболее ярко проявлялись возможные несовершенства предлагаемых методов расчета. Кроме натурального эксперимента, для проверки адекватности предлагаемых методов были выполнены многочисленные численные эксперименты, основанные на решении соответствующих краевых задач с помощью МКЭ в традиционной постановке.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- полученные новые определяющие соотношения для материала и конструкций позволили с единых позиций описать качественно, а в приведенных примерах и количественно, известные эффекты, сопровождающие нестационарное температурно-силовое нагружение, включая и необратимое формоизменение без нагрузки; такое описание в ряде случаев (ниобиевый сплав с покрытием) выполнено впервые;

- систематизация достаточно общего класса реологических уравнений и разработка на этой основе плана идентифицирующих экспериментов позволяет более рационально планировать экспериментальные затраты и приведет, хотя бы частично, в соответствие информативность и количество экспериментов, выполняемых различными исследователями;

- разработанный метод расчета нестационарно нагруженных конструкций, позволяющий сократить количество вычислений, применен для решения ряда практически важных задач: балка при чистом изгибе, плоский концентратор напряжений (на примере растягиваемой полосы с выточками), вращающийся диск, силовая проушина;

- идеи многоуровневой схематизации применяются для практически важных задач, решение которых в традиционной постановке

встречает значительные трудности (статически неопределимые балки, резьбовые соединения);

- разработана схема расчета елочного замка турбинной лопатки, на примере которой показано, что применение многоуровневой схематизации позволяет использовать в задачах ползучести известные в теории упругости приемы анализа конструкций на отдельных уровнях декомпозиции; это существенно сокращает сроки конструкторской проработки сложных узлов;

- в зависимости от технических возможностей замера необходимых перемещений и способа получения стохастических определяющих соотношений разработаны методы прогнозирования индивидуальных деформационных свойств;

- показано, что разработанные методы могут быть применены для индивидуального прогнозирования накопления остаточных прогибов в процессе эксплуатации сварных диафрагм паровых турбин; это позволяет повысить точность прогноза и, следовательно, более полно использовать ресурс диафрагм;

- показано, что метод индивидуального прогнозирования механических свойств может служить научной основой для разработки систем управления, направленных на повышение точности процессов формоизменения в режиме ползучести по различным параметрам: получаемым размерам, повреждаемости, величинам остаточных напряжений и т.д.

Результаты работы внедрены в виде:

- двух отраслевых нормативных документов (ОСТ и методические рекомендации);

- методических рекомендаций (МР) (Госстандарт. ВНИИНМАШ)

"Расчетно-экспериментальный метод определения параметров ползучести и длительной прочности при одноосном нагружении в условиях нестационарного нагружения". (1-я редакция). 1982 г.

- МР (Госстандарт. ВНИИНМАШ). "Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования индивидуальных деформационных свойств конструктивных элементов в условиях ползучести при нестационарном силовом нагружении. (1-я редакция). 1983 г.

- МР (Госстандарт. ВНИИНМАШ). "Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования индивидуальных деформационных свойств элементов конструкций в условиях нестационарного нагружения". 1984 г.

- результатов многочисленных хозяйственных договоров с ведущими предприятиями Куйбышевской области, а также работ по договорам на передачу результатов НИР; суммарный годовой экономический эффект согласно актам внедрения и с учетом долевого участия автора составляет 897 тыс.руб.

Основные научные положения, защищаемые автором:

- феноменологический метод построения реологических моделей конструкций, позволяющий формулировать определяющие соотношения, в которых обобщенная нагрузка и температура связываются с обобщенными перемещениями;

- определяющие соотношения, описывающие реологическое поведение материала и конструкции при нестационарных температурно-силовых нагружениях, принципы построения и классификация этих соотношений, а также схема идентифицирующих экспериментов;

- метод вычисления обобщенных перемещений (деформаций) для нестационарно нагруженных конструкций;

- метод применения многоуровневой схематизации при расчете НДС сложной конструкции, работающей в условиях нелинейной ползучести при нестационарном температурно-силовом нагружении;

- результаты решения ряда практически важных задач на основе разработанных методов;

- метод прогнозирования индивидуальных деформационных свойств единичного изделия;

- метод повышения точности получаемых размеров деталей при технологическом формоизменении в режиме ползучести;

- результаты прогнозирования индивидуальных деформационных свойств некоторых практически важных объектов.

Совокупность основных научных положений, выносимых на защиту, свидетельствует о том, что автором развито новое научное направление, в основу которого положено представление конструкции как единого целого на разных иерархических уровнях и использование некоторых универсальных положений теории управления для формулировки определяющих соотношений, связывающих обобщенные силы и температуру с обобщенными перемещениями. Определяющие соотношения формируются в виде системы конечных и обыкновенных дифференциальных уравнений, отдельные группы которых являются

ответственными за описание различных особенностей деформирования конструкций, возникающих при нестационарном температурно-силовом нагружении, а необходимая информация при этом черпается из небольшого числа специально организованных либо натуральных экспериментов над конструкцией, либо численных экспериментов, заключающихся в решении соответствующей краевой задачи.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались: на III, VIII, IX, X Всесоюзных конференциях по конструкционной прочности двигателей (Куйбышев, 1974, 1981, 1983, 1985); Всесоюзном семинаре "Геометрические методы исследования деформаций и напряжений" (Челябинск, 1985); VIII Всесоюзной конференции по методу фотоупругости (Таллин, 1979); семинаре кафедры механической технологии Будапештского технического университета под руководством профессора И.Артингера (Будапешт, 1979); Всесоюзной конференции "Деформация и разрушение теплостойких сталей" (Москва, 1981); семинарах в НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова (Ленинград, 1981, 1984); семинарах по прочности материалов и конструкций ИМАШ им. А.А.Благонравова АН СССР под руководством профессора Н.А.Махутова (Москва, 1981-1983); II, III Всесоюзных научных конференциях "Смешанные задачи механики деформируемого тела" (Днепропетровск, 1981, 1985); I и II Всесоюзных научно-технических конференциях "Повышение долговечности и надежности машин и приборов" (Куйбышев, 1981, 1984); Всесоюзной научно-технической конференции "Снижение металлоемкости и повышение ресурса машин на основе совершенствования стандартов по расчетам и испытаниям на прочность" (Москва, 1982); Куйбышевских областных научно-технических конференциях, а также конференциях и заседаниях НТС механического факультета Куйбышевского политехнического института им. Б.В.Куйбышева (Куйбышев, 1977, 1980, 1982, 1983, 1985, 1986); Всесоюзной конференции "Численная реализация физико-механических задач прочности" (Горький, 1983); I-II Всесоюзных конференциях "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" (Москва, 1983; Куйбышев, 1986); семинаре ИПМ АН СССР по механике сплошной среды под руководством академика АН Арм. ССР Н.Х. Арутюняна (Москва, 1983); на семинарах МВТУ им. Н.Э. Баумана по прикладной теории пластичности и ползучести под руководством профессора Н.Н. Маднина (Москва,

1984, 1986); семинаре отдела расчетов паровых турбин ЛМЗ им. XXII съезда КПСС (Ленинград, 1984); на совместных заседаниях научно-методических комиссий по стандартизации методов испытаний (председатель д.т.н. А.А.Чижик) и аналитических расчетов (председатель д.ф.-м.н.С.А.Шестериков) на долговечность материалов и элементов конструкций секции "Расчеты и испытания на прочность" НТС Госстандарта (Москва, 1982; Куйбышев, 1984); II Всесоюзной конференции "Ползучесть в конструкциях" (Новосибирск, 1984); Республиканской научно-технической конференции "Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автоматизированного проектирования (Готвальд, 1985); УШ, IX Конгрессах по испытанию материалов (Будапешт, 1982, 1986); VI Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 1985); V Национальном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Варна, 1985); Всесоюзном семинаре "Технологические задачи ползучести и сверхпластичности", (Новосибирск, 1986); VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (Ташкент, 1986).

В окончательном виде работа докладывалась: на семинаре по прикладной теории пластичности и ползучести в МВТУ им. Н.Э.Баумана под руководством профессора Н.Н.Малинина (Москва, 1986); на семинаре кафедры сопротивления материалов ЛПИ им. С.М.Кирова под руководством профессора П.А.Павлова (Ленинград, 1986); на семинаре по современным проблемам прикладной математики и механики в Куйбышевском политехническом институте им. В.В.Куйбышева под руководством заслуженного деятеля науки и техники РСФСР профессора Ю.П.Самарина (Куйбышев, 1986).

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 40 печатных работах, а также в тезисах докладов и в научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, и заключения, включающих 183 страницы машинописного текста, 83 рисунка, 7 таблиц; и списка литературы из 309 наименований. В приложения помещены акты, подтверждающие внедрение результатов работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе приводится обзор работ по рассматриваемой в диссертации проблеме, обосновывается цель и формулируются задачи исследования.

Если проанализировать этапы построения, например, модели материала с позиций механики неоднородных сред и релогической модели конструкции с помощью решения соответствующей краевой задачи, то легко обнаружить, что логика построения моделей на рассмотренных иерархических уровнях имеет много общего и переход от модели к модели фактически означает понижение размерности задачи за счет рассмотрения как единого целого все более сложных агрегатов. Естественно такой подход продолжить и дальше, рассматривая как единое целое конструктивный элемент (подконструкцию) и агрегаты из таких элементов. Тогда конструкции на разных иерархических уровнях можно трактовать как некоторый объект, подвергающийся воздействию одного или нескольких внешних факторов. Совокупность этих факторов задается с помощью входной m - мерной вектор-функции $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))$, координатами которой могут быть нагрузки, напряжения, температура и т.п. Реакция конструкции на воздействие $x(t)$ регистрируется путем измерения нескольких параметров, совокупность которых можно рассматривать как некоторую выходную n - мерную вектор-функцию $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$, структура которой зависит от целей выполняемого исследования, а ее координатами могут быть деформации, перемещения, параметры повреждаемости и т.п.

Поскольку рассматриваемая эволюция объекта является физически определенной, то существует оператор, преобразующий вход в выход

$$y(t) = Ax(t). \quad (1)$$

Подобный подход в терминах "вход-выход" или "возбуждение-отклик" использовался в работах Н.И.Малинина, С.И.Мешкова, Ю.П.Самарина, Г.П.Черепанова.

Существуют два пути исследования вида оператора A . Один из путей состоит в представлении изучаемого объекта как некоторой системы, поведение каждого из элементов которой известно. При этом для построения оператора A необходимо решение задачи о взаимодействии составляющих элементов.

В известной степени аналогом такого подхода является представление материала на основе структурной модели, выполненное в работах В.С.Зарубина, К.Н.Русинко, С.Б.Батдорфа, Д.А.Гохфельда, О.С.Садакова, Ю.И.Кадашевича, В.В.Новожилова, Ю.Н.Шевченко, Д.Ф.Бесселинга и др., а также традиционный путь построения РМК с помощью решения соответствующей краевой задачи. Этот путь для определенного круга задач ползучести реализован в работах Ю.Н.Работнова, С.А.Шестерикова, Н.Н.Малинина, О.В.Соснина, Ю.П.Самарина, Д.А.Гохфельда, О.С.Садакова, В.И.Розенблюма и др., а также в работах ряда зарубежных ученых: Р.Г.Сима, Р.К.Пенни, Ф.А.Лекки, А.Ц.Маккензи, Д.И.Мариотта, А.Р.С.Понтера и др.

Второй путь построения оператора A — чисто феноменологический. При этом исследуемый объект рассматривается как единое целое и отыскивается сразу связь входа с выходом путем активных экспериментов. Это означает, что нас не интересуют процессы, протекающие в объекте, так что он представляет собой так называемый черный ящик. Вид же оператора A конкретизируется в результате испытаний объекта при подаче на его вход специальным образом подобранных (тестовых) воздействий и измерений соответствующих выходных вектор-функций.

Такой подход реализуется во многих работах, в которых строятся определяющие соотношения для материала. Однако применительно к конструктивному элементу в подобной постановке имеются лишь единичные работы, например, Н.Н.Малинина, С.С.Вялова, В.П.Савачева, Н.И.Малинина.

Следует отметить, что в настоящее время для задач упругости, в том числе и нелинейной, развиваются методы исследования конструкций, основанные на синтезе рассмотренных выше путей построения оператора A . При этом поведение конструкции качественно анализируется теоретически, а затем изучается экспериментально при различных законах нагружения, в результате чего строятся формулы для расчета напряженно-деформированного состояния. Предпосылки такого подхода содержатся в работах Л.И.Седова, а его реализация для исследования пластин и оболочек выполнена А.В.Саченковым, Ю.Г.Коноплевым и др. Аналогичный подход использовался П.А.Павловым при разработке методов расчета некоторых конструкций по предельным нагрузкам.

Результаты, полученные во всех отмеченных выше работах, яв-

ляется важной предпосылкой и обосновывает необходимость разработки методов экспериментального и теоретического исследования, в которых конструкция анализируется как единое целое. В результате формируются непосредственные связи между обобщенными нагрузками $Q(t)$, температурой $T(t)$ и обобщенными перемещениями (деформациями) $P_p(t)$. Тогда зависимость (1) записывается в виде

$$P_p(t) = A(Q(t), T(t)). \quad (2)$$

По сравнению с традиционными методами решения краевой задачи ползучести, зависимость (2) существенно упрощает расчет $P_p(t)$ при нестационарных температурно-силовых режимах нагружения. Это особенно важно для многих ответственных узлов и деталей объектов авиации и энергетики, критерием работоспособности которых является недопустимое накопление остаточных перемещений, вызванных деформациями ползучести (увеличение радиуса вращающегося турбинного диска, искажение конфигураций летательных аппаратов, релаксация усилия затяжки резьбовых соединений, осевые перемещения диафрагм и направляющих аппаратов турбин, деформирование трубопроводов и т.п.).

Известно, что реологические свойства материалов и, тем более, конструкций характеризуются большим разбросом. В связи с этим для более полного использования деформационных ресурсов конкретной конструкции необходима разработка методов индивидуального прогнозирования деформационных свойств.

Кроме того, согласно работам Н.А.Махутова, А.Н.Романова, О.В.Соснина, Л.Б.Гецова и др. деформация ползучести в наиболее нагруженных точках конструкции во многих случаях входит в критерии накопления повреждений. Тогда задача индивидуального прогнозирования деформационных свойств конкретной конструкции становится неотъемлемой частью задачи индивидуального прогнозирования ресурса при эксплуатации изделий по техническому состоянию.

Постановка и схема решения последней задачи в общем виде выполнена В.В.Болотиным, а применительно к определенной группе объектов эта задача решалась И.А.Биргером и С.А.Тимашевым.

В данной работе анализировалась концепция В.В.Болотина, где прогнозирование предлагается вести в пространстве состояний объекта $\bar{U}(t)$. Показано, что предложенные В.В.Болотиним зависимости, если их применить к описанию деформирования,

например, реономного стержня, соответствуют сформулированным в стохастической постановке известным кинетическим уравнениям Ю.Н.Работнова. Последние обычно конкретизируются так, что все их параметры определяются по замеренным величинам деформаций ползучести или их скоростей. В этом случае задачи индивидуального прогнозирования деформационных свойств и долговечности могут быть решены. Такая возможность реализована в работах В.И.Ковпака, В.В.Осасюка, В.Н.Геминова, А.А.Чижика, а применительно к усталостным характеристикам материала - в работах В.Т.Трощенко.

Ситуация существенно усложняется для конструкции, состоящей, например, из ℓ стержней. При решении задачи в традиционной постановке возникает очевидное противоречие между возможностями измерений на реальных изделиях (они всегда ограничены) и размерностью вектора состояния $\bar{u}(t)$, которая, по сравнению с отдельным стержнем, увеличится в ℓ раз. Если формулировать определяющие соотношения для конструкции в виде (2), то следует ожидать, что размерность $\bar{u}(t)$ в этом случае существенно уменьшится и, следовательно, открывается возможность для решения задачи индивидуального прогнозирования ресурса.

Результаты обзора литературных данных позволили сформулировать три основные задачи исследования, приведенные выше в пункте "Цель работы".

Во втором разделе разрабатывается метод построения РМК с помощью специально организованного натурального эксперимента.

Для решения поставленных задач целесообразно воспользоваться универсальными идеями и методами теории управления, в частности, известной в кибернетике концепцией черного ящика, которая развита в работах Ю.П.Самарина применительно к исследованию изотермического деформирования реономных материалов. Согласно этой концепции оператор A в (1) представляется в виде

$$y(t) = \varphi(\eta(t), x(t)), \quad (3)$$

$$\dot{\eta}(t) = f(\eta(t), x(t)), \quad (4)$$

где $\eta(t) = (\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_s(t))$ - вектор-функция состояния, с помощью которой фиксируется вся предыстория процесса.

Конкретизация соотношений (3) и (4) применительно к зада-

чам механики деформируемого твердого тела осуществляется с помощью введения так называемой гипотезы отделимости, согласно которой часть координат $y(t)$ зависят только от $\eta(t)$, т.е. являются реономными и описание их эволюции существенно связано с фактором времени, а другая часть координат вектор-функции $y(t)$ всецело определяется текущим значением $x(t)$, и они будут склеономными. Введение гипотезы отделимости не является слишком обременительным и означает лишь независимость реономных и склеономных координат, т.е. материал конструкции должен быть структурно стабильным, а конструкция как целое - линейно-упругой.

Введение гипотезы отделимости позволяет доказать очень важную теорему, согласно которой определяется структура наблюдаемой вектор-функции в виде

$$y = \begin{vmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \eta^* \\ x^* \end{vmatrix}, \quad \dot{\eta}^* = f(\eta^*, x^*), \quad (5)$$

где $\eta^* = \eta^*(\eta)$ и $x^* = x^*(x)$ - столбцовые $s \times 1$ и $m \times 1$ матрицы; A_1 и A_2 - постоянные $n_1 \times s$ и $n_2 \times m$ матрицы $n_1 + n_2 = n$.

Существенной особенностью соотношений (5) является линейная связь между координатами наблюдаемой вектор-функции и координатами вектор-функции пространства состояний. Это позволяет строить пространство состояний исходя из анализа особенностей поведения наблюдаемой вектор-функции $y(t)$, которые выявляются с помощью специально организованного тестового эксперимента.

Конкретизацию соотношений (5) естественно было начать применительно к простейшему конструктивному элементу - растягиваемому (сжимаемому) стержню, что соответствует материалу при основном напряженном состоянии. Для стержня в качестве координат $y(t)$ рассматривалась упругая и реологическая P деформации, координатами $x(t)$ являлись напряжение σ и температура T , а основным тестовым экспериментом являлись испытания в режиме "нагрузка-разгрузка по σ " при $T = const$. При этом сразу выявляются три слагаемых деформации ползучести P : вязкая W , соответствующая установившейся стадии ползучести; возвращающаяся U , наблюдаемая при разгрузке; невозвращающаяся V , соответствующая неустойчивой стадии ползучести. Тогда соот-

ношения (5) для деформации ползучести ρ запишутся в виде

$$\begin{aligned} \rho &= u + v + w, \\ u &= \sum_k u_k, \quad \dot{u}_k = \lambda_k [a_k(\sigma, T) - u_k], \\ v &= \sum_k v_k, \quad \dot{v}_k = \begin{cases} \lambda_k [b_k(\sigma, T) - v_k], & b_k(\sigma, T) > v_k, \\ 0, & b_k(\sigma, T) \leq v_k, \end{cases} \\ \dot{w} &= q(\sigma, T), \\ \eta^* &= (u_1, u_2, \dots; v_1, v_2, \dots; w). \end{aligned} \quad (6)$$

Соотношения (6) дают хорошие результаты при описании поведения многих конструкционных материалов.

Однако ряд материалов проявляет аномальное поведение, которое заключается в том, что при повторных приложениях σ или T результирующая кривая проходит выше соответствующей кривой при максимальных, но постоянных значениях изменяемого параметра. Для описания этого явления структура η^* усложняется и, согласно (4), вводится дополнительное слагаемое \dot{v}^* , снабженное свойством затухающей памяти.

$$\begin{aligned} \rho &= u + v + w + \dot{v}^*, \\ \dot{v}^* &= \sum_k \dot{v}_k^*, \quad \dot{v}_k^* = \begin{cases} \lambda_k [c_k(\sigma, T) + \dot{v}_k^* - \dot{v}_k^*], & c_k(\sigma, T) + \dot{v}_k^* > \dot{v}_k^*, \\ 0, & c_k(\sigma, T) + \dot{v}_k^* \leq \dot{v}_k^*; \\ \dot{v}_k^* & = \begin{cases} 0, & c_k(\sigma, T) + \dot{v}_k^* > \dot{v}_k^*, \\ \lambda_k [\dot{v}_k^* - c_k(\sigma, T) - \dot{v}_k^*], & c_k(\sigma, T) + \dot{v}_k^* \leq \dot{v}_k^*. \end{cases} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения для \dot{v}_k^* и \dot{v}_k^* "срабатывают" поочередно.

На этом трудности с описанием не заканчиваются, поскольку поведение материалов при циклических теплосменах отличается большим разнообразием. Известные варианты схем такого поведения систематизированы в диссертации. Оказалось, что результирующие кривые у различных материалов могут проходить как выше, так и ниже прогноза в предположении наличия только установившейся стадии ползучести. Кроме того, наблюдаются не очевидные, на первый взгляд, эффекты, когда при понижении T деформация возрастает,

а при повышении T - наоборот убывает. Отдельные материалы демонстрируют формоизменение без нагрузки под действием только теплосмен.

Ни одна из известных теорий ползучести не в состоянии описать с единых позиций все представленное многообразие схем поведения материалов при теплосменах. Однако с помощью разрабатываемых методов проблема легко решается, если, в соответствии с (5), разделить в слагаемых u и v свойства материала по напряжениям σ и температуре T , представив соответствующими суммами функции в (6), (7).

$$a_k(\sigma, T) = \int_0^t \frac{\partial A_k(\sigma, T)}{\partial \sigma} d\sigma + \int_0^t \frac{\partial D_k(\sigma, T)}{\partial T} dT.$$

$$c_k(\sigma, T) = \int_0^t \frac{\partial M_k(\sigma, T)}{\partial \sigma} d\sigma + \int_0^t \frac{\partial N_k(\sigma, T)}{\partial T} dT.$$

Тогда $u = u_T + u_\sigma$, $v = v_T + v_\sigma$, а соотношения (7) запишутся в виде

$$\rho = u_T + u_\sigma + v + w + v_T + v_\sigma \quad (8)$$

Поскольку решениями дифференциальных уравнений для v , v_T , u в (7) являются наследственные уравнения с ядрами в виде суммы экспонент, то u_σ и v_σ являются наследственными по σ а T в них входит как параметр. Для u_T и v_T - все наоборот: они наследственны по T , а σ - параметр.

Сам по себе факт качественного описания с помощью зависимости (8) всего многообразия схем температурного последствия свидетельствует о широких возможностях предлагаемого метода построения РМК.

Высокая степень общности разрабатываемого подхода позволяет на начальном этапе формализовать построение определяющих соотношений, а определенность в структуре дает возможность систематизировать реологические уравнения и разработать на этой основе план идентифицирующих экспериментов. При этом был использован метод планирования полного факторного эксперимента. Тогда, например, для формулировки (6) достаточно провести испытания в режиме "нагрузка-разгрузка по σ " в четырех точках пол-

ного факторного пространства. Для зависимостей (7) необходимо, усложнив программу испытаний, дополнительно выполнить хотя бы одну перегрузку по σ или T . Для (8) перегрузки необходимы и по σ , и по T .

Адекватность предложенных соотношений проверялась по экспериментальным результатам, полученным как автором на сплаве ЭИ698 и стали 45, так и другими исследователями (ниобиевый сплав с покрытием, сплав ЭИ607А, стали ОХ16Н15МЗБ, Х13МВФ, SS 41, SM50A, SM58Q (три последних стали по данным японских исследователей), цинк, алюминий. Все материалы обследовались в режиме ступенчатого изменения напряжения и температуры, при которых, как известно, наиболее контрастно проявляются все возможные несовершенства предлагаемых соотношений. Во всех случаях расчет удовлетворительно совпадал с экспериментом.

Таким образом, на этом этапе исследования получены новые определяющие соотношения для описания неизотермической ползучести простейшего конструктивного элемента - растягиваемого (сжимаемого) стержня.

Далее с позиций разрабатываемого подхода, как единое целое, был рассмотрен конструктивный элемент с неоднородным напряженным состоянием. Ставилась задача отыскания непосредственных связей между обобщенными нагрузками Q температурами T и обобщенными перемещениями P_p . Как показано в диссертации, если разрабатываемый конструктивный элемент испытать в режиме определяющего эксперимента, аналогично стержню, то при соответствующем выборе P_p в нем могут быть выделены компоненты $P_{u,T}; P_{u,Q}; P_{v,T}; P_{v,Q}$, аналогичные компонентам u_T, u_Q, v_T, v_Q в соотношениях (8).

Тогда интересующие нас зависимости (2) можно конкретизировать в виде

$$P_p = P_{u,T} + P_{u,Q} + P_{v,T} + P_{v,Q}, \quad (9)$$

аналогичном (6), и наметить основные этапы исследования конструкции:

- 1) испытания конструкции в режиме определяющего эксперимента;
- 2) выбор вида оператора A в соотношении (2);
- 3) вычисление параметров, входящих в A ;

4) проверка адекватности (λ) при $Q(t) \neq const$, $T(t) \neq const$.

Естественно, что отмеченный переход от стержня к конструкции возможен лишь в случае выполнения следующих ограничений:

1) система внешних нагрузок и температурное поле в конструкции являются однопараметрическими, т.е.

$$\begin{aligned} Q_i(x, y, z, t) &= \alpha_i(x, y, z) \cdot Q(t), \\ T(x, y, z, t) &= \beta(x, y, z) \cdot T(t), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\alpha_i(x, y, z)$ и $\beta(x, y, z)$ - фиксированные функции пространственных координат, а $Q(t)$ и $T(t)$ - единственные независимые о изменяемые параметры;

- 2) материал изделия является стабильным (нестареющим);
- 3) для конструкции как целого выполняется гипотеза отделности;
- 4) третья стадия ползучести в элементах конструкции отсутствует;
- 5) элементы конструкции не теряют устойчивости и не разрушаются.

В соответствии с разработанными этапами были исследованы конструкции в методическом отношении отличающиеся друг от друга различным уровнем сложности как по геометрической форме, так и по характеру внешних воздействий.

Для алюминиевых балок при чистом изгибе связывалась кривизна с изгибающим моментом, а для скручиваемых стержней из стали 45 - угол закручивания с крутящим моментом. Этап проверки адекватности включал в себя испытания со сменой знака внешней нагрузки при $T = const$. Для описания этого процесса зависимости типа (6) соответствующим образом модифицировались. Для резьбовых соединений из стали 45 и сплава ДИ690 соотношениями типа (6) связывались относительные перемещения характерных сечений болта и гайки непосредственно с растягивающей нагрузкой и температурой. Исследовалась также конструкция из алюминия, представляющая собой шесть раз статически неопределимую раму с встроенными резьбовыми соединениями. Для нее формулировались аналогичные по структуре выражения (6) зависимости, связывающие перемещения выбранных точек с нагрузкой и температурой.

Во всех случаях проверка адекватности предложенных соотношений при ступенчатом изменении внешних воздействий подтвердила правомерность разработанного метода.

На этом этапе исследования впервые показана и обоснована принципиальная возможность построения РМК с помощью специально организованного натурального эксперимента. Это позволит более осмысленно подходить к планированию и трактовке результатов стендовых испытаний ответственных конструкций.

В третьем разделе разработаны численные методы построения РМК и процедура применения многоуровневой схематизации при расчете сложных конструкций, работающих в условиях нелинейной ползучести при нестационарном температурно-силовом нагружении.

Очевидно, что разработанный метод построения соотношений (2), (9) можно также реализовать, если исходные кривые ползучести в режиме определяющего эксперимента (первый этап исследования) получить не экспериментальным, а расчетным путем с помощью решения соответствующей краевой задачи. Тогда все сказанное выше можно трактовать как метод вычисления обобщенных перемещений для нестационарно нагруженных конструкций, согласно которому решение краевой задачи при произвольно меняющихся $Q(t)$ и $T(t)$ фактически заменяется решением той же задачи при простейших режимах нагружения, соответствующих определяющему эксперименту. Естественно, что такой подход существенно снижает трудоемкость расчетов, а соотношения (2), (9) становятся своеобразным компактным представлением результатов решения краевой задачи.

Правомерность предложенного метода подтверждается примерами решения некоторых задач, которые наряду с практической важностью представляют интерес и в методическом плане, поскольку отличаются друг от друга различным уровнем сложности как по геометрической форме, так и по характеру внешних воздействий.

Для алюминиевой балки при чистом изгибе проверялась возможность построения с помощью расчета соотношений типа (6), связывающих кривизну с изгибающим моментом ($T = \text{const}$).

Для пластины с двухсторонней глубокой гиперболической выточкой связывалась деформация в наиболее нагруженной точке с растягивающей внешней нагрузкой и температурой. Материал пластины - сплав ДИ698.

Был рассмотрен вращающийся диск из сплава ЭИ698, у которого температура была распределена вдоль радиуса по линейному закону. Связывались радиальные перемещения характерных точек с угловой скоростью и обобщенной температурой (в смысле (10)) диска.

Исследовались также силовые проушины из сплавов ЭИ698 и ВТЗ-1. От предыдущих примеров эти объекты отличались необходимостью решения контактной задачи, результатом которой является определение давлений в зоне контакта проушины с пальцем шарнира.

Во всех рассмотренных примерах краевые задачи в режиме нагружения, соответствующем определяемому эксперименту, решались традиционным способом с помощью метода конечного элемента (МКЭ) с использованием определяющих соотношений для материала в виде (6). По полученным данным, согласно разработанной процедуре, строились зависимости (2), (9), по которым далее рассчитывалось $P_p(t)$ при ступенчатом режиме изменения $Q(t)$ и $T(t)$. Сравнение прогноза с результатами решений той же задачи традиционным способом с помощью МКЭ шагами по времени с учетом истории нагружения свидетельствовало об адекватности предлагаемого метода расчета. Такой же вывод следовал из результатов натурного эксперимента, выполненного для балки и силовой проушины.

Деформации на поверхности плоской проушины из сплава ВТЗ-1 замерялись при комнатной температуре с помощью фотоупругих покрытий, для чего был подобран специальный компаунд и разработан метод разделения деформаций на нагруженном контуре проушины, новизна которого подтверждена авторским свидетельством. Методика экспериментального исследования силовых проушин и полученные с ее помощью результаты представляют самостоятельный научный и практический интерес.

В рассмотренных задачах от прогнозирования деформаций в наиболее нагруженных точках легко перейти к расчету долговечности, если воспользоваться деформационными или энергетическими критериями разрушения.

На этом завершилось решение первой из поставленных задач.

Вторая задача является, фактически, развитием первой задачи по линии расчетного построения РМК, но теперь уже для более сложных конструкций.

Поскольку все предыдущие рассуждения остаются в силе для конструкции любого уровня сложности, становится возможным использование соотношения (2) и его конкретизации в виде (9) в качестве физической гипотезы, на основе которой можно применить идеи агрегирования, развитые в кибернетике, которые при расчетах конструкций на прочность получили название "концепции многоуровневой схематизации", разрабатываемой научной школой под руководством И.Ф.Образцова.

По предлагаемой методике расчет на каждом уровне декомпозиции завершается формированием соотношений (2), (9) с соответствующими P_p и Q, T , которые, в свою очередь, являются исходными для расчета на следующем более низком уровне декомпозиции. В результате численное решение задачи большой размерности заменяется серией последовательных численных решений задач значительно меньших размерностей, что для сложных конструкций уменьшает трудоемкость расчетов, а в некоторых случаях делает возможным решение весьма сложных задач нелинейной ползучести, которые в настоящее время вызывают затруднения даже при использовании современной вычислительной техники.

Заметим, что круг решаемых задач может быть еще расширен, поскольку разработанный метод построения РМК дает возможность на любом уровне декомпозиции конструкции вводить в рассмотрение труднообсчитываемый элемент, определяющие соотношения для которого построены по результатам натурального эксперимента.

Предложенный подход был применен для разработки методики расчета ползучести статически определяемых и неопределяемых балок, подверженных нестационарному температурно-силовому нагружению. Зависимости, связывающие прогиб балки с внешней нагрузкой, формулировались в два этапа. На первом этапе исследовался чистый изгиб балки на основе агрегирования ее из системы последовательно расположенных элементов. В результате формировалась связь кривизны с изгибающим моментом. Далее, используя это соотношение, балка агрегировалась из элементов, расположенных вдоль продольной координаты. Адекватность решения проверялась с помощью численного и натурального эксперимента.

С использованием многоуровневой схематизации была решена важная в практическом отношении задача релаксации усилия затяжки ($T = const$) колеса компрессора газотурбинного двигателя. Основная трудоемкость здесь возникает при расчете податливости $\delta_p(t)$

резьбового соединения как целого под действием изменяющегося растягивающего усилия $Q(t)$, которое является результатом действующих на детали соединения рабочих нагрузок и релаксирующего усилия затяжки.

Использовалась схема декомпозиции резьбового соединения, предложенная И.А.Биргером для решения задачи упругости. При этом отдельно рассмотрели: 1) с помощью МКЭ изгиб витка; 2) радиальное и осевое перемещения гайки, как толстостенной трубы, нагруженной внутренним давлением и сжимающей осевой силой; 3) радиальные и осевые перемещения тела болта, нагруженного наружным давлением и осевой растягивающей силой.

Результаты решения на отмеченных уровнях декомпозиции объединялись уравнением совместности осевых перемещений, решение которого формировало связь между $\delta_r(t)$ и $Q(t)$. Последняя использовалась для расчета релаксации усилия затяжки, когда внешние нагрузки на детали пакета изменялись в режиме полетного цикла.

Была рассмотрена также схема расчета елочного замка турбинной лопатки, на примере которой показано, что использование многоуровневой схематизации и РМК, позволяет существенно сократить сроки конструкторской проработки елочных соединений лопаток турбин, поскольку значительный объем вычислительных работ на отдельных уровнях декомпозиции соединения может быть выполнен заранее и результаты сведены в удобные для использования формы.

На этом решение второй из поставленных задач заканчивается, и в результате мы впервые имеем в своем арсенале процедуру применения для задач ползучести известного в теории упругости приема рациональных численных вычислений (многоуровневой схематизации), которая использована для решения качественно новой и важной в практическом отношении задачи ползучести резьбовых соединений.

В четвертом разделе решалась третья важная в практическом отношении задача, которая заключается в разработке методов индивидуального прогнозирования остаточного ресурса при эксплуатации изделий по техническому состоянию. Последнее открывает дополнительные возможности для получения экономического эффекта за счет увеличения среднего ресурса машин и обоснованного выбора оптимального срока эксплуатации.

Действительно, если провести испытания ансамбля идентичных

реомонных конструкций до появления в каждой из них заданного перемещения (деформации) P^* то получим некоторый доверительный интервал, характеризующий разброс реологических свойств этих объектов. Если теперь эксплуатацию вести по назначенному ресурсу, то приходится ориентироваться на нижнюю границу времени безопасной эксплуатации. Следовательно, значительная часть конструкций будет сниматься с эксплуатации задолго до исчерпания своего ресурса, что, конечно, экономически негодно.

Суть индивидуального прогнозирования заключается в том, что на конкретном изделии в моменты времени t_1, \dots, t_k на начальном этапе эксплуатации производятся замеры перемещения и эти результаты используются для прогнозирования времени t_{k+1} достижения перемещением величины P^* . Естественно, при этом доверительный интервал существенно сужается и появляется возможность более полного использования ресурса конкретного изделия.

Если для простоты функцию $\alpha(t)$ в зависимостях (3) и (4) считать детерминированной, то функции $Y(t)$ и $\eta(t)$ останутся случайными при описании поведения ансамбля идентичных конструкций за счет разброса механических свойств. Для них можно воспользоваться каноническим разложением с конечным множеством базисных функций. Если в качестве базисных функций использовать координаты вектор-функции $\eta(t)$, а соотношения (2) конкретизировать в виде, например, (6) с соответствующей заменой P на P_u и θ на Q , то придем к зависимостям

$$\begin{aligned}
 P_p &= P_u + P_v + P_w, \\
 P_u &= \sum_i P_{u,i}, \quad P_{u,i} = \lambda_i [A_i a_i(Q, T) - P_{u,i}], \\
 P_v &= \sum_i P_{v,i}, \quad P_{v,i} = \begin{cases} \lambda_i [B_i b_i(Q, T) - P_{v,i}], & B_i b_i(Q, T) > P_{v,i}, \\ 0, & B_i b_i(Q, T) \leq P_{v,i}, \end{cases} \\
 P_w &= Fg(Q, T),
 \end{aligned} \tag{II}$$

которые представляют собой стохастическую модель конструкции, поскольку в них входят случайные величины A_i, B_i, F .

Если в (II) подставить оценки этих случайных величин (например, математическое ожидание), то (II) становится детермини-

рованной моделью, описывающей поведение некоторой осредненной конструкции. Если подставить набор величин, характеризующих конкретную конструкцию, то (II) будет представлять собой уже индивидуальную модель.

Процедура перехода от стохастической модели конструкции к индивидуальной детерминированной соответствует задаче идентификации и заключается в определении для конкретного изделия случайных величин $A_i = a_i^{(k)}$, $B_i = b_i^{(k)}$, $F = f^{(k)}$ по замеренным $P_p^{(k)}$.

В зависимости от возможностей замера и условий последующего прогноза разработано несколько способов корректировки уравнений (II).

При простейшем способе предлагается подобие перемещений в осредненной и индивидуальной моделях. Точнее коррекция осуществляется, если принять подобие между отдельными компонентами перемещений P_u , P_v и P_w . Еще точнее способ динамического прогнозирования, когда каждый последующий замер уточняет прогноз, используя всю предыдущую информацию. Вместо осредненной кривой может быть использовано изделие - лидер. Тогда, если условия работы прогнозируемого изделия не отличаются от условий работы лидера, то можно воспользоваться первым или вторым способами; если отличаются, то необходима конкретизация неслучайных функций $a_i(Q, T)$, $b_i(Q, T)$, $f(Q, T)$, для чего изделие-лидер необходимо испытать в условиях перегрузок, что можно выполнить при стендовых испытаниях.

Разработанные методы были применены для прогнозирования деформационных свойств отдельных реализаций отмеченных выше материалов (сталь 45, сплав ЭИ698, ниобиевый сплав с жаростойким покрытием) и конструкций различного уровня сложности (изгибаемые балки, скручиваемые валы, резьбовые соединения, рама с встроенными резьбовыми соединениями).

Во всех случаях расчет по скорректированным на начальном участке формирования соотношениям (II) давал значительно меньшие погрешности при нестационарных внешних воздействиях, чем прогноз по осредненным данным.

Кроме проверки на модельных конструкциях, разработанный метод был применен для прогнозирования остаточных прогибов сварных диафрагм паровых турбин. Причем соотношение (II) строилось как по результатам стендовых испытаний, так и по данным эксплуа-

тации, полученным на различных ГРЭС страны. И в этом случае результаты оказались хорошими.

Идеи индивидуального прогнозирования могут быть с успехом использованы для повышения точности размеров при технологическом формоизменении в режиме ползучести. В частности, был разработан способ управления процессом правки роторов турбин в режиме ползучести, новизна которого подтверждена положительным решением о выдаче авторского свидетельства. Суть метода заключается в том, что один из выправляемых роторов используется в качестве лидера, а полученная модель применяется для выправления прогиба других аналогичных роторов. Корректировка модели для каждого конкретного ротора позволяет индивидуализировать и рационально построить технологический процесс правки. За счет этого увеличивается точность правки и получается существенный выигрыш во времени, что увеличивает производительность.

Аналогично можно повысить точность процессов формоизменения в режиме ползучести по другим параметрам: повреждаемости, величинам остаточных напряжений и т.д.

Таким образом, разработанные на основе РМК методы прогнозирования индивидуальных деформационных свойств конструкций имеют важное практическое значение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе представления конструкции как единого целого и использования некоторых положений теории управления, выявления общих закономерностей в поведении конструкций на разных иерархических уровнях и непосредственных связей обобщенных сил и температуры с обобщенными перемещениями разработан феноменологический метод построения реологических моделей конструкций, заключающийся в том, что определяющие соотношения формируются в виде системы конечных и обыкновенных дифференциальных уравнений, отдельные группы которых являются ответственными за описание различных особенностей деформирования конструкций, возникающих при нестационарном температурно-силовом нагружении, а необходимая информация при этом черпается из небольшого числа специально организованных либо натурных экспериментов над конструкцией, либо численных экспериментов, заключающихся в решении соответствующей краевой задачи.

Это позволяет заключить, что в диссертации развито новое научное направление, связанное с изучением реологического поведения конструкций.

В рамках этого научного направления получены следующие результаты:

1. Адекватность разработанного метода подтверждена обстоятельной экспериментальной проверкой на конструкциях различной сложности как по геометрической форме, так и по характеру внешних воздействий. Эксперименты над некоторыми конструкциями (резьбовые соединения, комбинированная рамная конструкция, силовые проушины) имеют самостоятельное значение.

2. Выявлена принципиальная возможность построения реологических моделей конструкций с помощью специально организованного натурального эксперимента, что позволяет более осмысленно подходить к планированию и трактовке результатов стендовых испытаний ответственных конструкций.

3. Получены новые определяющие соотношения для описания неизометрической ползучести конструкций, позволяющие качественно, а в приведенных примерах и количественно, описать с единых позиций практически все эффекты, сопровождающие нестационарное температурно-силовое нагружение, включая и необратимое формоизменение без нагрузки; такое описание для некоторых случаев выполнено впервые и поэтому представляет самостоятельный интерес. Адекватность соотношений подтверждена на большом экспериментальном материале, полученном как автором, так и другими исследователями.

4. Систематизированы реологические уравнения для широкого круга материалов и на этой основе с использованием метода планирования полного факторного эксперимента разработан план идентифицирующих экспериментов; выполненная систематизация может служить основой для унификации определяющих соотношений и построения карт-схем деформирования материала в различных температурно-силовых областях.

5. Разработан метод вычисления обобщенных перемещений для нестационарно нагруженных конструкций, который позволяет существенно сократить количество вычислений за счет того, что решение краевой задачи для произвольно меняющихся обобщенных нагрузок и температуры заменяется решением той же задачи при простейших нагружениях в режиме определяющего эксперимента; метод применен

для решения ряда практически важных задач: балка при чистом изгибе, плоский концентратор напряжений (на примере растягиваемой полосы с выточками), вращающийся диск, силовая проушина.

6. Показано, что реологическая модель конструкции является физической гипотезой, которая позволяет известный в теории упругости прием рациональных численных вычислений (многоуровневую схематизацию) впервые применить при расчете НДС сложной конструкции, работающей в условиях нелинейной ползучести при нестационарном температурно-силовом нагружении;

7. Показано, что реологическая модель конструкции позволяет существенно расширить круг решаемых задач за счет синтеза эксперимента и расчета, поскольку на любом уровне декомпозиции сложной конструкции появляется возможность вводить в рассмотрение труднообсчитываемый элемент, определяющие соотношения для которого могут быть построены по результатам специально организованного натурального эксперимента;

8. Идеи многоуровневой схематизации применены для практически важных задач, решение которых в традиционной постановке встречает значительные трудности: статически неопределимые балки, резьбовые соединения, елочные замки турбинных лопаток.

9. Впервые на основе реологической модели конструкции эффективно решена задача о прогнозировании индивидуальных деформационных свойств единичного изделия, что является основой для эксплуатации по техническому состоянию конструкций, критериями работоспособности которых служат характерные перемещения (деформация) накопленные в результате ползучести.

10. С помощью стохастических определяющих соотношений для конструкции разработаны методы прогнозирования индивидуальных деформационных свойств, отличающиеся достаточно высокой разрешающей способностью; разработанные методы применены для индивидуального прогнозирования накопления остаточных прогибов в процессе эксплуатации сварных диафрагм паровых турбин, что позволяет более полно использовать ресурс диафрагм;

11. Показано, что метод индивидуального прогнозирования свойств может служить научной основой для разработки систем управления, направленных на повышение точности процессов формирования в режиме ползучести по различным параметрам: получаемым размерам, повреждаемости, величинам остаточных напряжений и т.д.

Автор приносит искреннюю благодарность д.т.н., профессору Ю.П.Самарину за постоянное внимание и ценные советы, высказанные им в процессе выполнения работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Еремин Ю.А., Сорокин О.В. О плоской задаче концентрации напряжений в условиях ползучести// Конструкционная прочность двигателей: Тез.докл. III Всес.науч.-техн.конф. (15-18 окт. 1974). - Куйбышев, 1974. - С.56-57.

2. Еремин Ю.А. Экспериментальное исследование плоского концентратора напряжений в условиях ползучести// Механика. Прочность материалов и деталей машин: Межвуз.сб.науч.тр.- Куйбышев: Куйб. политехн.ин-т, 1974.- С.61-65.

3. Еремин Ю.А., Смирнов М.Д. Об уменьшении погрешности при определении поляризации-оптических данных методом фотоэлектрической регистрации// Геометрические методы исследования деформаций и напряжений: Тез.докл.Всес.семина. Ч.1. - Челябинск, 1975. - С.93-94.

4. Еремин Ю.А., Сорокин О.В. Методика решения плоской задачи о концентрации напряжений в условиях ползучести// Проблемы прочности. - 1976.- № 5.- С.41-44.

5. Еремин Ю.А., Тимофеев М.И. Оптически чувствительное покрытие для исследования больших деформаций деталей из титановых сплавов// Проектирование приводов металлорежущих станков и элементов машиностроительных конструкций: Межвуз.сб.науч.тр. - Куйбышев: Куйб.политехн.ин-т, 1978. - С.129-133.

6. Еремин Ю.А., Тимофеев М.И. Применение метода фотоупругих покрытий для исследования напряженно-деформированного состояния шарнирных узлов при упругопластическом циклическом нагружении// Материалы VIII Всесоюзной конференции по методу фотоупругости. Т.2. - Таллин, 1979. - С.156-158.

7. Еремин Ю.А., Клебанов Я.М., Матвеев В.Е., Тимофеев М.И. Малоцикловая усталость титановых сплавов В13-1 и ВТ22 при повторном растяжении// Проблемы прочности.- 1979.-№ 6.- С.13-16.

8. Еремин Ю.А., Тимофеев М.И. Способ определения напряженно-деформированного состояния в зоне контакта плоских деталей

// *Periodica polytechnica. Mechanical Engineering. Budapest.*

- 1980. - V.24, №1-2. - P.119-123.

9. Еремин Ю.А., Клебанов Я.М., Кокорев И.А. Исследование деформирования сплава ВТЗ-1 при малоцикловом знакопостоянном нагружении // *Periodica polytechnica. Mechanical Engineering. Budapest*, 1980. - V. 24, № 1-2. - с. 109-118.

10. Еремин Ю.А. Применение теории управления к исследованию долговечности конструкций при ползучести // Тр. У науч.-техн. конф. КШТИ. Ч.1 - Куйбышев, 1980. - С.139-144. - Деп. в ВНИИТИ 3.03.82. № 895-82 ДЕП.

11. Еремин Ю.А., Клебанов Я.М., Тимофеев М.И., Федосеев А.К. Установка для испытаний материалов на малоцикловую усталость при повышенных температурах // Заводская лаборатория. - 1980. - Т.46, № 4. - С.356-358.

12. Самарин Ю.П., Еремин Ю.А. Об одном подходе к исследованию ползучести конструкций // Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей: Тез. докл. УШ Всес. науч. конф. (24-26 июня, 1981 г.). - Куйбышев, 1981. - С.14.

13. Еремин Ю.А. Об одном подходе к исследованию податливости резьбовых соединений при ползучести // Повышение долговечности и надежности машин и приборов: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. (22-24 сент. 1981). - Куйбышев, 1981. - С.128.

14. Еремин Ю.А., Тимофеев М.И. Определение напряженно-деформированного состояния в плоской задаче контактного взаимодействия методом фотоупругих покрытий // Смешанные задачи механики деформируемого тела: Тез. докл. II Всес. науч. конф. (15-18 сент. 1981). - Днепропетровск, 1981. - С.145-146.

15. Еремин Ю.А., Кайдалова Л.В. Применение теории управления к исследованию ползучести при кручении толстостенных цилиндров // Прочность и надежность конструкций: Межвуз. сб. науч. тр. - Куйбышев: Куйб. авиац. ин.-т. 1981. - С.89-95.

16. Еремин Ю.А., Тимофеев М.И. Установка для исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций методом оптически активных покрытий // Проблемы прочности. - 1981. - № 3. - С.102-105.

17. Еремин Ю.А., Самарин Ю.П. Применение теории управления к исследованию ползучести конструкций // Деформация и разрушение теплостойких сталей и сплавов: Материалы конф. (20-22 янв. 1981). - М.: Общество "Знание" РСФСР, 1981. - С.118-122.

18. Еремин Ю.А., Самарин Ю.П. Новый теоретико-экспериментальный метод исследования ползучести конструкций// 8th Congress on material testing: Lectures. V. I. (28 sept. - 1 oct 1982). - Budapest, 1982. - P. 153-156.

19. А.С. 913061 (СССР) МКИ 01.В. 11/18. Способ определения механических напряжений/ Ю.А.Еремин, М.И.Тимофеев (СССР). - № 2735054; Заяв. 11.03.79; Оpubл. 1982, Бюл. № 10. - 2 с.

20. Методические рекомендации (Госстандарт). Расчетные и расчетно-экспериментальные методы определения несущей способности и долговечности элементов машин и конструкций. Расчетно-экспериментальный метод определения параметров ползучести и длительной прочности при одноосном нагружении в условиях нестационарного нагружения. (I-я редакция)/ Ю.А.Еремин, Л.Г.Аухина, В.П.Радченко, Ю.П.Самарин - М.: ВНИИМАШ, 1982. - С.39-46.

21. Методические рекомендации (Госстандарт). Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования индивидуальных деформационных свойств конструктивных элементов в условиях ползучести при нестационарном силовом нагружении (I-я редакция)/ Ю.А.Еремин, В.П.Радченко, Ю.П.Самарин - Куйбышев: Куйб.политехн.ин-т, 1982. - 12 с.

22. Еремин Ю.А. Об одном подходе к исследованию податливости резьбовых соединений при ползучести// Проблемы прочности.- 1983. - № 3. - С.14-16.

23. Еремин Ю.А., Кайдалова Л.В., Радченко В.П. Исследование ползучести балок на основе аналогии структуры уравнения состояния материалов и элементов конструкций// Машиноведение.- 1983. - № 2. - С.67-74.

24. Еремин Ю.А., Радченко В.П. Метод расчета ползучести балок при нестационарном изменении изгибающего момента с учетом индивидуальных деформационных свойств// Прочность и долговечность элементов конструкций: Межуз. сб. науч. тр. - Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т, 1983, - С.149-155.

25. Еремин Ю.А., Самарин Ю.П. Метод вычисления обобщенных перемещений при ползучести нестационарно нагруженных конструкций// Численная реализация физико-механических задач прочности: Тез. докл. Всес. конф. (31 мая - 2 июня 1983 г.). - Горький, 1983. - С.66-67.

26. Еремин Ю.А., Самарин Ю.П. Метод решения задач нелинейной ползучести для нестационарно нагруженных конструкций// Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. IX Всес. науч.-техн. конф. (13-15 сент. 1983). - Куйбышев, 1983. - С.83-84.

27. Еремин Ю.А., Радченко В.П., Самарин Ю.П. Реализация концепции многоуровневой схематизации в задачах нелинейной ползучести// Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов: Тез. докл. Всес. конф. (19-21 окт. 1983). - М.: Моск. авиац. ин-т, - 1983. - С. 103.

28. Еремин Ю.А., Радченко В.П., Самарин Ю.П. Прогнозирование деформаций и перемещений в единичном изделии по результатам стендовых испытаний// Теоретико-экспериментальный метод исследования ползучести в конструкциях: Межвуз. сб. науч. тр. - Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т, 1984. - С.57-75.

29. Еремин Ю.А., Радченко В.П., Самарин Ю.П. Расчет индивидуальных деформационных свойств элементов конструкций в условиях ползучести// Машиноведение. - 1984. - № 1. - С.67-72.

30. Методические рекомендации. (Госстандарт). Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования индивидуальных деформационных свойств элементов конструкций в условиях ползучести при нестационарном нагружении/ От КЛТИ: Ю.А.Еремин, Г.А.Павлова, В.П.Радченко, Ю.П.Самарин. - Куйбышев: Куйб. политехн. ин-т, 1984. - 23 с.

31. Еремин Ю.А. Применение концепции черного ящика для прогнозирования деформаций при неизотермической ползучести// Надежность и долговечность машин и приборов: Тез. докл. II Всес. науч.-техн. конф. (19-21 сент. 1984). - Куйбышев, 1984. - С.78.

32. Еремин Ю.А. Исследование неизотермической ползучести материалов и элементов конструкций методом разделения деформаций// Ползучесть в конструкциях: Тез. докл. II Всес. конф. (21-23 нояб. 1984). - Новосибирск, 1984. - С.21-22.

33. Еремин Ю.А. Дискретное и континуальное агрегирование в конструкциях при ползучести// Теоретико-экспериментальный метод исследования ползучести в конструкциях: Межвуз. сб. науч. тр. - Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т, 1984. - С.41-56.

34. Еремин Ю.А., Кайдалова Л.В. Индивидуальное прогнозирование осевых перемещений сварных диафрагм турбин в условиях ползучести// Матем. модели процессов и констр. энерг. турбомашин в системах их автомат. проектир. Ч. II.: Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф. (11-13 сент. 1985). - Харьков, 1985. - С.68-69.

35. Еремин Ю.А., Кайдалова Л.В. Индивидуальное прогнозирование ползучести конструкций по результатам стендовых испытаний// Известия вузов. Машиностроение.- 1985. - № 7.- С.10-14.

36. Исследование ползучести ниобиевого сплава с покрытием при нестационарном температурно-силовом нагружении/ Ю.А.Еремин, Л.В.Кайдалова, П.Б.Кузнецов и др.// Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. X Всес. науч.-техн. конф. (1-3 окт. 1985 г.). - Куйбышев, 1985 . - С.58-59.

37. Еремин Ю.А., Горбатенко В.В. Исследование неизотермической ползучести материалов и конструкций методами теории управления// У Национальный конгресс по теоретической и прикладной механике: Доклады: Кн.2. - София: БАН, 1985. - С.322-327.

38. Самарин Ю.А., Еремин Ю.А., Радченко В.П. Индивидуальное прогнозирование перемещений в конструкциях при ползучести// У Национальный конгресс по теоретической и прикладной механике: Доклады. Кн.2. - София: БАН, 1985. - С.457-462.

39. Самарин Ю.П., Еремин Ю.А. Агрегирование в задачах нелинейной ползучести с помощью концепции черного ящика// Теоретическая и прикладная механика. - 1985. - Т.16. - № 2. - С.45-54.

40. Самарин Ю.П., Еремин Ю.А. Исследование ползучести в конструкциях на основе концепции черного ящика// Теоретическая и прикладная механика. - 1985. - Т.16. № 3. - С. 30-42.

41. Самарин Ю.П., Еремин Ю.А., Радченко В.П. Индивидуальное прогнозирование ползучести конструкций с помощью концепции черного ящика// Теоретическая и прикладная механика. - 1985. - Т.16. № 4. - С.25-35.

42. Самарин Ю.П., Еремин Ю.А. Метод исследования ползучести конструкций// Проблемы прочности. - 1985. - № 4. - С.40-45.

43. Еремин Ю.А., Кайдалова Л.В. Индивидуальное прогнозирование осевых перемещений сварных диафрагм турбин в условиях ползучести// Математ. модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автом. проектирования: Тез. докл. Респ. науч. техн. конф. ч.1. (11-13 сент. 1985 г.). - Харьков, 1985. - С.196.

44. Еремин Ю.А. Ползучесть некоторых жаропрочных материалов при нестационарном температурно-силовом нагружении// Конструкционная прочность двигателей: Тез. докл. X Всес. науч.-техн. конф. (1-3 окт. 1985 г.). - Куйбышев, 1985. - С.58.

45. Еремин Ю.А. Применение многоуровневой схематизации к расчету ползучести елочных замков лопаток турбин// Ползучесть и длительная прочность конструкций: Межвуз. (межведом) сб. науч. тр. - Куйбышев: Куйб. авиац. ин-т., 1986. - С.99-108.

46. Еремин Ю.А. Ползучесть растягиваемых образцов и резьбовых соединений из стали 45 при ступенчатом изменении нагрузки и температуры// Машиноведение. - 1986. - № 1. - С.71-77.

47. Еремин Ю.А., Радченко В.П. Феноменологический метод построения определяющих уравнений для материалов со сложными реологическими свойствами// VI Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докл. (24-30 сент. 1986). - Ташкент, 1986. - С.268.

48. Еремин Ю.А., Кичаев Е.К. Описание ползучести конструкционных материалов при ступенчатом изменении температуры// Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всес. межвуз. сб. науч. тр. - Горький: Горьк. гос. ун-т, 1986. - С.138-143.

49. *Yeremin Y.A. Defining relations for materials with complicated rheologic properties // 9th Congress on Material Testing. 3rd Danubia - Adria Symposium: proceedings, VI. - Budapest, 1986, - P. 304-305.*

50. Еремин Ю.А. Применение метода разделения деформаций для описания ползучести материалов при нестационарном температурно-силовом нагружении// Унифицированные методы определения ползучести и длительной прочности: Стандартизация расчетов и испытаний на прочность: Вып. 7. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - С.84-89.

51. Еремин Ю.А., Калмыкова Э.Б. Расчет реологических деформаций в зонах концентрации при нестационарном температурно-силовом нагружении некоторых конструктивных элементов// Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов: Тез. докл. II Всес. конф. (1-3 июля 1986 г.). - Куйбышев, 1986. - С.118-119.

52. Еремин Ю.А., Горбатенко В.В. Построение определяющих соотношений для сложных реономных конструкций с помощью натурального эксперимента// Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - № 2. - С.3-6.

53. Способ управления процессом правки деталей/ Ю.А.Еремин, К.П.Самарин (СССР). - (По заявке № 3992322/31 решение о выдаче А.С. от 23.12.86).