

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.3

ШИРВЕЛЬ
Павел Иванович

**НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ
ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Минск, 2013

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Чигарев Анатолий Власович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Теоретическая механика»,
Белорусский национальный технический университет

Официальные оппоненты: **Мелешко Иван Николаевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Высшая математика»,
Белорусский национальный технический университет;

Хвисевич Виталий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Сопротивление материалов
и теоретическая механика»,
Брестский государственный технический университет

Оппонирующая организация **Белорусский государственный университет**

Защита состоится 28 июня 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: г. Минск, проспект Независимости, 65, 1-й корпус, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 27 мая 2013 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07,
кандидат физико-математических наук,
доцент

_____ Акимов В.А.

© Ширвель П.И., 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях современной техники широко используются конструктивные элементы, выполненные в виде тел цилиндрической формы. В процессе эксплуатации они могут подвергаться воздействию как силовых, так и немеханических нагрузок (термических, радиационных). Длительное нахождение тел в физических и механических полях приводит к возникновению деформаций тепловой и радиационной ползучести. Необходимость создания механико-математических моделей, методов расчета и исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических тел в условиях экстремальной эксплуатации требует разработки соответствующих моделей и методов. Тематика диссертационной работы, посвященной моделированию процессов деформирования твердых тел в условиях термосилового и радиационного нагружения, представляет интерес, как в теоретическом, так и в практическом плане. Предмет исследования является необходимой составляющей проектирования, анализа НДС и расчета на прочность, выполняемых при создании компонентов оборудования авиационной, ракетной и космической техники, транспортного машиностроения, тепловой и атомной энергетики, а также других современных высокотехнологических отраслей. Разработка и развитие теории и методов расчета НДС цилиндрических тел, находящихся в условиях неоднородного термического и радиационного нагружений, в настоящее время актуальная проблема механики деформируемого твердого тела (МДТТ), решение которой позволит корректно определять НДС, а также продлить ресурс компонентов оборудования и других конструкций в условиях сложных немеханических воздействий. Научные результаты исследования нелинейных процессов деформирования развивающихся во времени и пространстве, имеют важное значение при создании новых технологических процессов и аппаратов для использования на транспорте, в энергетике, авиации и атомной промышленности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научно-техническими проектами и темами

Тема диссертации соответствует подпунктам 1.2, 5.1 и 7.1 «Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011-2015 годы», утвержденного постановлением Советом Министров № 585 от 19.04.2010 г., а также приоритетным направлениям 06.34.16, 06.34.00, 01.04.00 и 03.00.00 научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011-2015 годы, утвержденных Указом Президента № 378 от 22.07.2010 г.

Результаты выполненных исследований использовались при выполнении следующих прикладных научно-исследовательских работ: НИР «Моделирование процессов деформирования и разрушения элементов конструкций ЯЭУ под действием импульсных и нестационарных термических нагрузок» (заказчики БРФФИ и Министерство образования, № ГР 20123143 от 09.10.2012), НИР «Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при неравномерном нагреве и нейтронном облучении» (заказчик БРФФИ, № ГР 20091888 от 31.07.2009), НИР

«Напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических и призматических оболочек в условиях ядерных реакторов» (заказчик Министерство образования, № ГР 2009487 от 16.03.2009).

Цель и задачи исследования

Цель работы: создание механико-математических моделей физически нелинейного деформирования твердых тел, учитывающих облучение потоками частиц с большой энергией, неоднородное термосиловое воздействие и изменение свойств материалов; разработка общих методов решения соответствующих краевых задач на основе классических положений МДТТ и современных компьютерных технологий; алгоритмическая и программная реализация разработанных моделей при механическом и немеханическом воздействии с учетом возникающих необратимых деформаций.

Для достижения цели исследований *решены следующие задачи:*

- Выполнены анализ и оценка основных закономерностей поведения твердых тел в условиях интенсивных терморadiационных воздействий. С позиций МДТТ рассмотрены особенности деформирования конструкционных и тепловыделяющих делящихся материалов с учетом зависимости их механических и теплофизических характеристик от уровней действующих температур и высокоэнергетического облучения, эффектов радиационного формоизменения и терморadiационной ползучести.

- Дана общая постановка краевых задач физически нелинейного деформирования цилиндрических тел, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения в сложных силовых, а также немеханических (температурных и радиационных) режимах.

- Модифицированы механико-математические модели осесимметричного деформирования тел цилиндрической формы в условиях термосиловых и радиационных воздействий с учетом ползучести материала и различных условий нагружения.

- Впервые разработана механико-математическая модель неосесимметричного НДС, учитывающая изменение напряжений и деформаций в зависимости от радиальной и окружной координат с учетом ползучести и влияния тепловых и радиационных эффектов.

- На основе разработанной и модифицированных моделей созданы эффективные методики, алгоритмы и программные средства, позволяющие проводить численное исследование кинетики деформирования элементов оборудования, работающих в условиях сложных квазистатических терморadiационных воздействий. Получен ряд решений модельных и тестовых задач.

- С помощью разработанных механико-математической модели, методик, алгоритмов и программ впервые изучено радиационное НДС цилиндрических тел при равномерном нагреве по периметру, а также исследовано влияние неосесимметричности терморadiационного нагружения на физически нелинейное деформирование длинных цилиндрических тел.

Объект исследования: цилиндрические тела в условиях ползучести при воздействии неоднородных температурных и интенсивных радиационных полей.

Предмет исследования: НДС длинных цилиндрических тел при квазистатическом воздействии механической нагрузки, неравномерных высоких температур и потока заряженных частиц с большой энергией.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- Механико-математическая модель неосесимметричного НДС с учетом ползучести, неравномерного нагрева и нейтронного облучения. Модификация модели, описывающей изменения свойств сплошной среды при силовом нагружении и немеханических воздействиях. Методы численного решения краевых задач с учетом неоднородного нагрева, ползучести и облучения.

- Численное решение задачи о неосесимметричном НДС длинных цилиндрических тел, находящихся под действием неосесимметричного постоянного по высоте квазистационарного температурного поля и механических нагрузок, в условиях радиационного распухания и ползучести материала.

- Методика решения терморadiационной задачи определения НДС в сплошном, полом и многослойном цилиндрах в предположении обобщенной плоской деформации с учетом механического нагружения, неравномерного нагрева, нейтронного облучения, термической и радиационной ползучести.

- Алгоритм численной реализации и компьютерная программа определения квазистатического НДС цилиндрических тел с учетом термомеханических нагрузок, ползучести и облучения, позволяющая проводить имитационное моделирование и исследование НДС тепловыделяющих цилиндрических тел.

- Исследование совместного влияния неосесимметричных температурных и радиационных полей на квазистатическое НДС используемых в энергетике и машиностроении цилиндрических элементов конструкций в условиях ползучести.

Личный вклад соискателя. Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. Научный руководитель А.В. Чигарев принимал участие в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Другим соавторам научных публикаций принадлежат результаты, не вошедшие в работу.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались на 39, 41–44 Республиканском научно-методическом семинаре «Применение методов компьютерной механики в инженерии, науке, образовании» (Минск, БНТУ, 2008, 2010–2013), Международной конференции «Инновации в машиностроении» (Минск, 2008), Международной научной конференции «Молодежь в науке – 2009» (Минск, 2009), региональном семинаре Международного агентства по атомной энергии «Regional IAEA's Workshop on the Quality Assurance/Management in Maintenance Activities at Nuclear Power Plants» (Курте де Аржес, Румыния, 2010), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи – 2010» (Самара, РФ, 2010), Международной научной конференции «NuMat 2010: The Nuclear Materials Congress» (Карлсруэ, ФРГ, 2010), Международной конференции «Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future (SSF-2010). Nuclear power plant erection in

Belarus» (Минск, 2010), V Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика – 2011» (Минск, 2011), а также на научных семинарах кафедры «Теоретическая механика», БНТУ.

Опубликованность результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 30 работах, в том числе 10 статьях в научных журналах (из них 7 общим размером 3,57 а.л. соответствуют п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь), 15 статьях в сборниках и трудах материалов конференций и семинаров, 5 тезисах докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем рукописи диссертации составляет 143 страницы машинописного текста, включая 22 страницы с 34 иллюстрациями, 4 таблицы на 1 листе, список использованных источников из 160 наименований на 11с., список публикаций автора из 30 наименований на 3 с. и 3 приложения на 5 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором систематизированы теоретические и экспериментальные результаты определения НДС при неосесимметричных термосиловых и радиационных воздействиях, подробно рассмотрены основные методы и соответствующие им и расчетные модели вместе с допущениями, которые закладывались исследователями, как на стадии постановки задач, так и в процессе их решения. Наиболее распространенные и популярные подходы условно разделены на две группы: аналитическое определение напряжений и деформаций (*Д.Д. Ивлев, А.В. Чигарев, Г.П. Черепанов, Л.А. Галин, Н.И. Мухелишвили, Н.Н. Лебедев, Дж. Гудьер, В. Новацкий, Э. Мелан, А.Д. Коваленко, К.В. Соляник-Красса, М.А. Колтунов, С.П. Тимошенко, И.А. Прусов, Ю.В. Василевич, П.Е. Товстик, Г.И. Михасев, М.Д. Мартыненко, М.А. Журавков, В.М. Хвисевич* и другие ученые-механики); численное моделирование и полуаналитические методы построения решений (*Р. Галлагер, Дж. Оден, В.Н. Кукуджанов, А.А. Самарский, В.С. Рябенкий, Н.Н. Яненко, С.К. Годунов, З.Г. Алпаидзе, А.С. Сахаров, Ю.Н. Шевченко, В.Г. Савченко, Д.Н. Шнейдерман, Л.Г. Макаренкова, В.И. Бобырь, Е.К. Руденко, С.Д. Светличная, Н.Г. Абрашина, И.Н. Мелешко* и другие специалисты вычислительной механики).

В результате детального анализа по тематике исследований установлено, что в научной литературе отсутствуют работы, посвященные определению неосесимметричного НДС цилиндрических тел в условиях неравномерного нагрева и облучения. Также отсутствуют работы, посвященные анализу тел, находящихся под воздействием нелинейных терморadiационных полей с учетом ползучести. Адекватное моделирование таких нелинейных процессов требует привлечения теории радиационного НДС, связывающей термическое расширение, радиационное распухание, а также температурную и радиационную ползучесть. Существенный вклад в развитие теории радиационного НДС и методов расчета в условиях облучения внесли: *А.А. Ильюшин,*

В.С. Ленский, Д.Р. Оландер, Ю.И. Лихачев, И.С. Куликов, В.Н. Киселевский, В.Я. Пупко, Г.С. Писаренко, Л.В. Забудько, В.Б. Богуш, М.П. Леончук, К.М. Манукян, В.Б. Малыгин, В.М. Рябов, А.В. Яровая, Д.В. Леоненко и другие исследователи. Выполненный анализ результатов научных исследований по осесимметричному и неосесимметричному деформированию твердых тел в условиях интенсивных термосиловых и радиационных воздействий позволил сформулировать цели и задачи исследования, в рамках их выполнить общую постановку краевых задач и выбор метода исследования.

Во второй главе проводится определение степени влияния облучения потоком быстрых нейтронов на изменение НДС твердого тела. Оценочные решения получены для случая осесимметричного НДС, когда искомые функции зависят от одной координаты ($\partial/\partial\theta=0$), а определяющие уравнения в частных производных становятся обыкновенными дифференциальными уравнениями. Основное определяющее тождество осесимметричного деформирования представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d(ru)}{dr} \right] = \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \frac{d}{dr} (\varepsilon^{th} + \varepsilon^s) + \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \left(\frac{d\varepsilon_{rr}^c}{dr} + \frac{\varepsilon_{rr}^c - \varepsilon_{\theta\theta}^c}{r} \right). \quad (1)$$

Правая часть уравнения (1) нелинейная относительно искомых величин: перемещения зависят от деформаций ползучести, нелинейно связанных с напряжениями, а значит и с перемещениями (в соответствии с формулами Коши). Таким образом, деформации терморadiационной ползучести нелинейно зависят от перемещений, которые в свою очередь изначально определяются с учетом ползучести. Это говорит о нелинейности и связности решаемой задачи определения напряженного состояния цилиндрических тел в условиях облучения и задачи терморadiационной ползучести. Показано, что подобные уравнения не имеют точного аналитического решения, но могут быть решены численными и численно-аналитическими методами.

Предложен численно-аналитический метод определения терморadiационного влияния на НДС цилиндрических тел. Рассмотрена задача о сжатом однослойном цилиндре с учетом терморadiационных эффектов. Тело подвергается внутреннему P_{int} и внешнему P_{ext} статическому давлению. Поверхности толстостенного цилиндра облучаются равномерным нейтронным потоком суммарным флюенсом $\Phi(t)$ и стационарно нагреваются до различных температур T_{ext} и T_{int} (рисунок 1). Общее решение (1) получено в виде интегрального соотношения

$$u(r) = \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \frac{1}{r} \int_{R_{int}}^r (\varepsilon^{th} + \varepsilon^s) r dr + \frac{1}{2} \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \left(r \int_{R_{int}}^r \frac{(\varepsilon_{rr}^c - \varepsilon_{\theta\theta}^c)}{r} dr - \frac{1}{r} \int_{R_{int}}^r \varepsilon_{zz}^c r dr \right) + \frac{Ar}{2} + \frac{B}{r} - \frac{C\mu r}{E}, \quad (2)$$

где A, B, C – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий с учетом обобщенной осевой деформации на основе баланса продольных усилий

$$P_z = \int_0^{2\pi} \int_{R_{int}}^{R_{ext}} \sigma_{zz} r dr d\theta = 2\pi \int_{R_{int}}^{R_{ext}} \sigma_{zz} r dr, \quad (3)$$

P_z – суммарное продольное усилие (осевая сила). Обобщенное плоскодеформированное состояние представлено в диссертации несколькими частными слу-

чаями: случай свободных торцов (усилий не приложено, но имеет место температурная деформация, распухание и ползучесть); случай нагруженных торцов: модельное тело с открытыми концами и закрытый толстостенный цилиндр (труба с днищами).

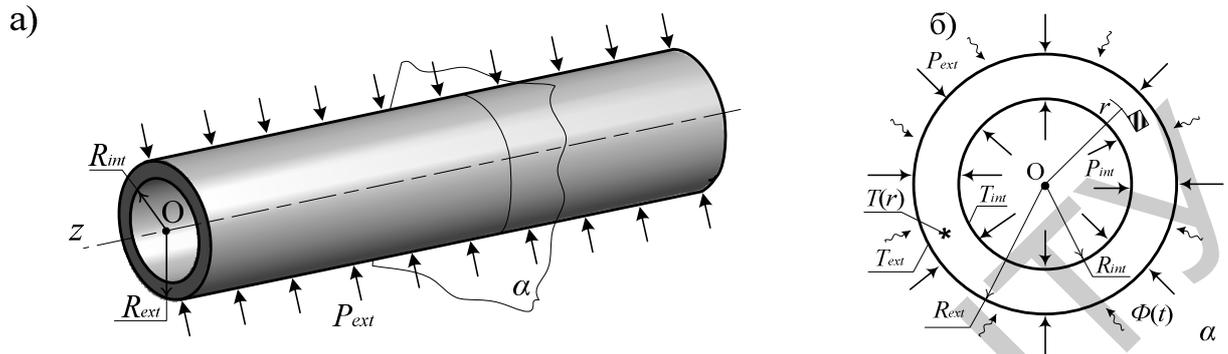


Рисунок 1 – Схема нагружения длинного тела двусвязной цилиндрической геометрии

Для аппроксимации подынтегральных функций (2) сечение цилиндрического тела разбивается на конечное множество участков по радиусу – кольцевые зоны (рисунок 2). Учитывая нелинейность (1), получить решение удастся в предположении, что неупругие деформации постоянны для каждой интегрируемой зоны. Радиальные перемещения для жесткого закрепления торцов внутри k -того кольцевого участка в каждый момент времени определяются соотношением

$$u(r) = \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \right) \frac{r_k^2 - R_{int(k)}^2}{2r} (\epsilon_k^{th} + \epsilon_k^s) + \frac{1}{2} \left(\frac{1-2\mu}{1-\mu} \right) \left(\frac{R_{int(k)}^2 - r_k^2}{2r} \epsilon_{zz(k)}^c + (\epsilon_{rr(k)}^c - \epsilon_{\theta\theta(k)}^c) r \ln \frac{r_k}{R_{int(k)}} \right) + \frac{A_k r_k}{2} + \frac{B_k}{r_k}. \quad (4)$$

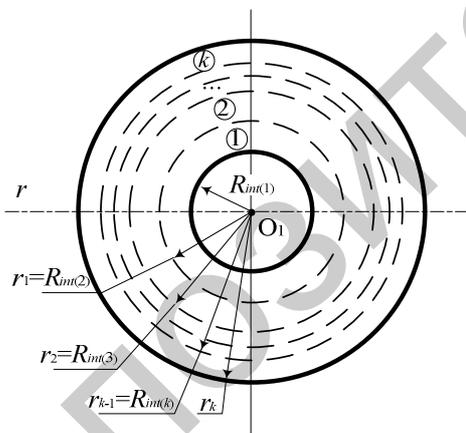


Рисунок 2 – Разбиение цилиндра на кольцевые зоны при численно-аналитическом решении

Для случая отсутствия эффектов вязкого деформирования среды ($\epsilon_{ij}^c = 0; i, j = r, \theta, z$) определение терморadiационноупругого НДС в условиях обобщенной плоской деформации для полого и сплошного цилиндра возможно стандартными методами в замкнутой форме. В качестве примера применения численно-аналитического подхода был решен ряд одномерных задач определения осесимметричного НДС под действием различных термосиловых и радиационных нагрузок (интегралы от неупругих деформаций брались численно в квадратурах). Рассматривался

Условия непрерывности на границах кольцевых зон задавались равенством радиальных напряжений и перемещений на стыке областей. Помимо жесткого закрепления, рассмотрен случай свободных и нагруженных торцов. Показано, что для сплошной цилиндрической области ($0 \leq r \leq R_{ext}$) характерен частный случай: соотношения обобщенного плоскодеформированного состояния для сплошного цилиндра можно получить из решений для толстостенного, устремив нижний предел к нулю, обеспечив в центре сечения регулярность решения и подчинив его соответствующим краевым условиям.

полюй и сплошной цилиндр из конструкционной стали (0X16H15M3Б, AISI 316, 316L) и тепловыделяющего композиционного материала (керметное топливо).

В результате проведения серии виртуальных экспериментов для нескольких видов материалов, установлено, что решение одномерной по пространству терморadiационной задачи с учетом ползучести численно-аналитическим методом неэффективно: перемещения от одной кольцевой зоны к другой меняются скачкообразно, а связность задачи напряженного состояния и ползучести выдержать сложно. Кроме этого экономичность вычислительного процесса неудовлетворительна: скорость сходимости невысокая при большой трудоемкости выполняемых операций. Полученные результаты дали основание отдать предпочтение численным методам.

Численное решение задачи ползучести в условиях неоднородного термосилового и радиационного воздействия построено для многослойного массивного цилиндрического тела, состоящее из J слоев. Соседние слои не имеют свободы перемещения относительно друг друга в радиальном направлении и сечения, перпендикулярные

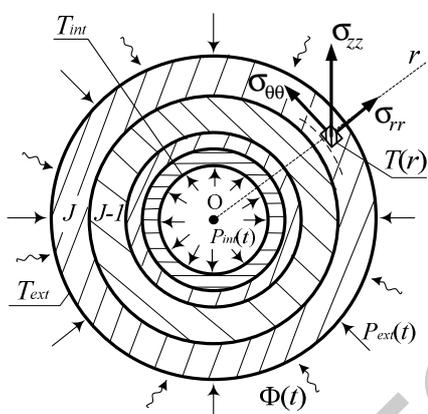


Рисунок 3 – Осесимметричная схема нагружения модели

оси, остаются в процессе деформирования плоскими. Нагружение определяют: неоднородное температурное поле, радиационное распухание и действие на боковые поверхности и торцы равномерного квазистатического давления $P(t)$. Схема нагружения представлена на рисунке 3. Решение строится на основе конечно-разностной аппроксимации, метода сеток и неявных разностных схем. В процессе расчета исходная нелинейная задача сводится к ряду линейных задач для конкретного момента времени, к решению

которых применяются стандартные методы, развитые для линейных систем. Осесимметричная краевая задача (1) для каждого шага по времени t_n представлена замкнутой системой неоднородных алгебраических уравнений с матрицей трехдиагональной структуры. Для решения используется метод матричной прогонки (для сплошного цилиндра применяется метод правой прогонки, а для полого – левой). Схема разбиения и сеточный шаблон квазистатического деформирования показаны на рисунке 4.

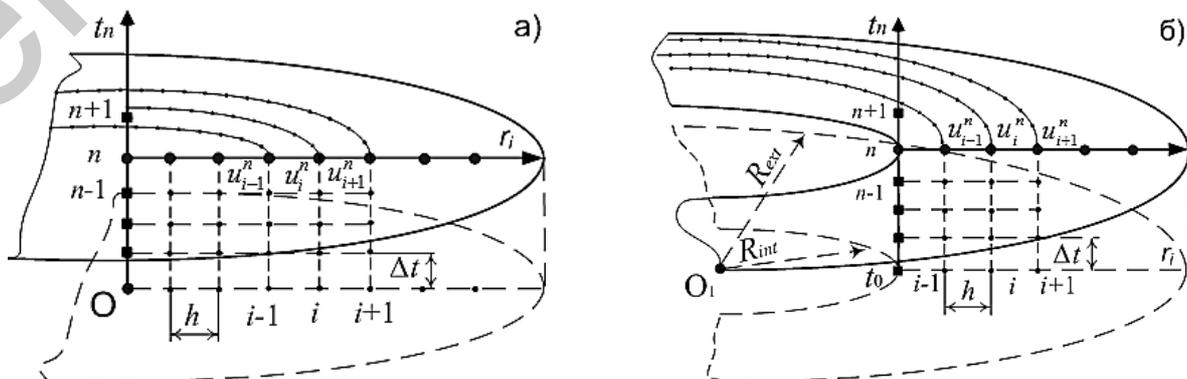


Рисунок 4 – Численная схема и конечно-разностный шаблон пространственно-временного разбиения сечения сплошного (а) и полого (б) цилиндров

На основании математических моделей, алгоритмов и вычислительных процедур, разработан пакет вычислительных компьютерных программ. Все программы являются оригинальными и использующими расчетные соотношения и схемы, представленные в диссертации. Результаты расчета представлены в виде поверхностей напряжений, деформаций и перемещений. Цвет поверхности показывает качественное изменение характеристик НДС. Числовые результаты получены для длинного полого и сплошного цилиндров в условиях обобщенной плоской деформации.

Первой рассмотрена модельная задача определения НДС толстостенной стальной трубы, облучаемой изнутри равномерным по

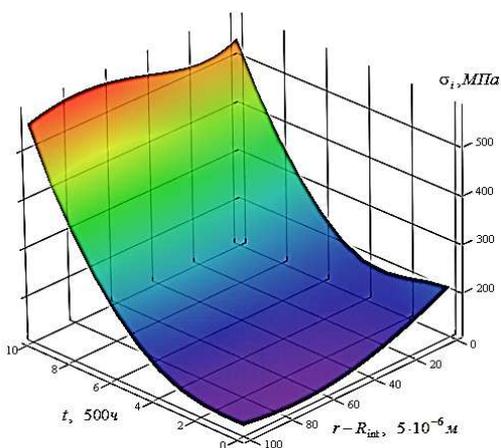


Рисунок 5 – Изменение интенсивности напряжений со временем

плого цилиндра, охлаждаемого с наружной поверхности, задается в соответствии с решением стационарного уравнения теплопроводности Лапласа. Закон терморadiационной ползучести на установившейся стадии задавался в соответствии с испытаниями на ползучесть облученной и необлученной стальной трубы под давлением инертного газа. На рисунке 5 представлены результаты моделирования кинетики напряженного состояния при термосиловом нагружении и нейтронном облучении с учетом тепловой и радиационной ползучести. Зависимость окружной компоненты тензора деформаций ползучести по сечению толстостенного цилиндра во времени показана на рисунке 6.

Вторая модельная задача посвящена деформированию цилиндрических тепловыделяющих тел. Геометрические характеристики модельных тел приняты следующими: радиус сплошного цилиндра $R=0.003\text{ м}$, а внутренний и наружный радиусы полого цилиндра равны $R_{int}=0.004\text{ м}$ и $R_{ext}=0.005\text{ м}$. В цилиндрах действуют равномерно распределенные источники тепла. Тела подвергаются равномерному давлению со стороны внешней поверхности $P_{ext}=8\text{ МПа}$ при одновременном воздействии неоднородного температурного поля $T(r)$, которое задавалось в аналитическом виде на основании решения уравнения Пуассона, как для тел, охлаждаемых с внешней поверхности ($T_{ext}=873\text{ К}$). Тепловыделяющий материал обла-

трубы, облучаемой изнутри равномерным по толщине и вдоль оси потоком быстрых нейтронов ($\bar{E}>0.1\text{ МэВ}$) при термомеханических воздействиях в условиях ползучести. Поток быстрых нейтронов плотностью $\phi=7.8\cdot 10^{19}\text{ нейтрон}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ происходит по нормали к внутренней поверхности цилиндра, $R_{int}=0.003\text{ м}$, $R_{ext}=0.0035\text{ м}$, $T_{int}=773\text{ К}$, $T_{ext}=723\text{ К}$, $P_{int}=8\text{ МПа}$, $P_{ext}=16\text{ МПа}$. Физико-механические свойства материала соответствуют нержавеющей аустенитной стали: $E=2.1\cdot 10^5\text{ МПа}$; $\mu=0.3$; $\alpha=12.6\cdot 10^{-6}\text{ 1/К}$; $\lambda=14.6\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Неравномерное распределение температур по радиусу полого цилиндра, охлаждаемого с наружной поверхности, задается в соответствии с решением стационарного уравнения теплопроводности Лапласа. Закон терморadiационной ползучести на установившейся стадии задавался в соответствии с испытаниями на ползучесть облученной и необлученной стальной трубы под давлением инертного газа. На рисунке 5 представлены результаты моделирования кинетики напряженного состояния при термосиловом нагружении и нейтронном облучении с учетом тепловой и радиационной ползучести. Зависимость окружной компоненты тензора деформаций ползучести по сечению толстостенного цилиндра во времени показана на рисунке 6.

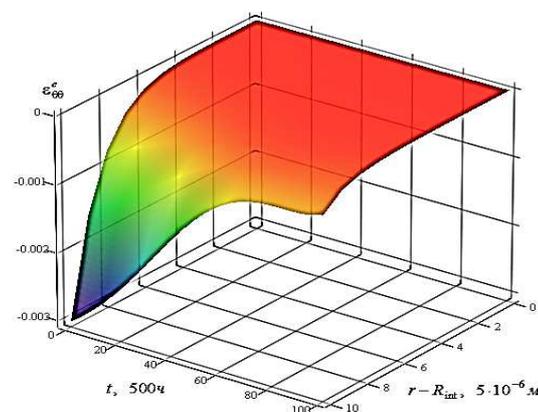


Рисунок 6 – Окружная компонента тензора деформаций ползучести

дает следующими осредненными по сечению физико-механическими постоянными:

$E=1.85 \cdot 10^5$ МПа; $\mu=0.29$; $\alpha=11.3 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $\lambda=18$ Вт/(м·К); $Q=2.234 \cdot 10^9$ Вт/м³. Распухание материала подчиняется эмпирическим зависимостям, в соответствии с решениями интегро-дифференциальных уравнений распухания керметного топлива. Закон ползучести на установившейся стадии принят в виде суммы линейного радиационного и нелинейного термического членов. Проведен сравнительный анализ характеристик НДС полого и сплошного тепловыделяющих тел в условиях ползучести и облучения (рисунок 8).

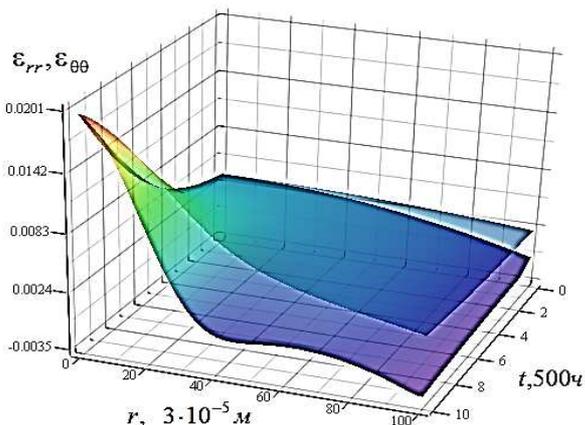


Рисунок 7 – Распределение деформаций в сплошном цилиндре

Хар-ка НДС	Геометрическая форма тепловыделяющего тела	
	сплошной цилиндр	полый цилиндр
Интенсивность напряжений		
Перемещения		

Рисунок 8 – Фрагмент таблицы сравнительного анализа характеристик НДС полого и сплошного тепловыделяющих цилиндров

Анализ кинетики деформирования модельных тел позволил отметить ряд особенностей их поведения в терморadiационных потоках. Показано, что для экстремальных условий нагружения, наряду с радиационными и силовыми составляющими, со временем, определяющими становятся деформации ползучести, причем в первую

очередь термической. Представленные результаты виртуальных экспериментов показывают, что для данного уровня температур и облучения термическая ползучесть является доминирующей в общем процессе необратимого деформирования.

Для верификации разработанной математической модели был решен ряд тестовых и прикладных задач. Результаты тестовых расчетов показали хорошее согласие с точными аналитическими решениями, полученными С.П. Тимошенко и Дж. Гудьером (расхождение составило 0.6%) для термоупругой задачи ($P=0, t=0$) и решением задачи Ламе (погрешность 0.3%) с учетом чисто механического нагружения ($T(r)=0, t=0$). Результаты сравнивались при разбиении расчетной области цилиндров на 100 узлов. Представлена оценка влияния шага счета по времени на результаты расчетов и исследована сходимость конечноразностных аппроксимаций с уменьшением шага разбиения расчетной области. Проведенные оценки показывают, что процесс численного решения задачи устойчив и сходится (причем приближения для сплошного цилиндра в 2-2.5 раза сходятся быстрее, чем для полого). Выбран оптимальный вариант разбиения расчетной области. Таким образом, разработанную осесимметричную механико-математическую модель НДС можно в дальнейшем использовать для тестирования общей модели неосесимметричного деформирования.

В третьей главе представлена механико-математическая модель определения полей перемещений, напряжений и деформаций для случая неосесимметричного НДС объекта исследования. Сформулирован вариант механико-математической модели, учитывающий изменение напряжений и деформаций по периметру цилиндрических тел с учетом влияния тепловых и радиационных эффектов в условиях плоской и обобщенной плоской деформации. Рассматривается деформирование сплошной цилиндрической области (рисунок 9) под действием внешнего равномерного механического давления $P_{ext}(t)$, находящейся в стационарном неосесимметричном поле температур $T(r, \theta)$ и подверженной облучению потоком быстрых нейтронов ($\bar{E} > 0.1$ МэВ) суммарным флюенсом $\Phi(t)$ с учетом терморadiационной ползучести. В каждый момент времени скорость ползучести при данном структурном состоянии определяется действующим напряжением, неосесимметричным полем температур и флюенсом нейтронов. В соответствии с общей постановкой задачи, представленной в первой главе диссертации, получены дифференциальные уравнения, описывающие неосесимметричное НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении.

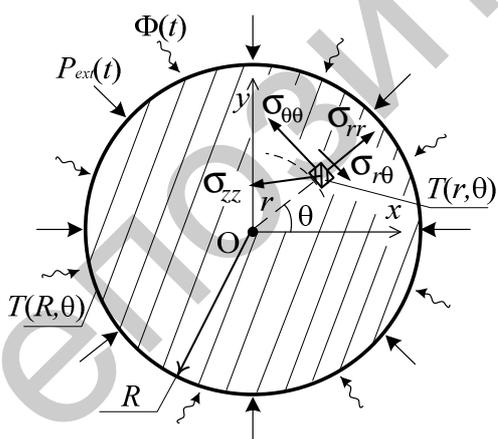


Рисунок 9 – Общая схема неосесимметричного НДС

В соответствии с общей постановкой задачи, представленной в первой главе диссертации, получены дифференциальные уравнения, описывающие неосесимметричное НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении.

Принимая за искомые функции перемещения $u(r, \theta)$ и $v(r, \theta)$, решение задачи сводится к интегрированию системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно перемещений. Разрешающая система дифференциальных уравнений, описывающая неосесимметричное НДС при ползучести и облучении получена в следующем виде:

$$\begin{cases}
\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{2r^2(1-\mu)} \left((1-2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r \partial \theta} - (3-4\mu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right) = \\
= \frac{1-2\mu}{(1-\mu)r} \left(\varepsilon_{rr}^c - \varepsilon_{\theta\theta}^c + \frac{\partial \varepsilon_{r\theta}^c}{\partial \theta} \right) + \frac{\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}^c}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon_{zz}^c}{\partial r} \right) + \frac{\partial \varepsilon_{rr}^c}{\partial r} + \frac{1+\mu}{1-\mu} \left(\frac{\partial \varepsilon^{th}}{\partial r} + \frac{\partial \varepsilon^s}{\partial r} \right); \\
\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \frac{\vartheta}{r^2} + \frac{1}{r^2(1-2\mu)} \left(2(1-\mu) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + (3-4\mu) \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) = \\
= \frac{4}{r} \varepsilon_{r\theta}^c + 2 \frac{\partial \varepsilon_{r\theta}^c}{\partial r} - \frac{2}{r(1-2\mu)} \left(\frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}^c}{\partial \theta} (\mu-1) - \mu \left(\frac{\partial \varepsilon_{rr}^c}{\partial \theta} + \frac{\partial \varepsilon_{zz}^c}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{2(1+\mu)}{r(1-2\mu)} \left(\frac{\partial \varepsilon^{th}}{\partial \theta} + \frac{\partial \varepsilon^s}{\partial \theta} \right).
\end{cases} \quad (5)$$

Исходя из общей схемы нагружения для сплошного цилиндра, система уравнений (5) дополняется граничными условиями:

$$u(0, \theta) = \vartheta(0, \theta) = 0. \quad (6)$$

$$\sigma_{rr}(R, \theta) = -P_{ext}(t); \quad \sigma_{r\theta}(R, \theta) = 0. \quad (7)$$

Замыкают систему (5) условия, обусловленные особенностями решения в перемещениях с точностью до поступательного перемещения тела в целом

$$\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \vartheta(r, \theta)}{\partial \theta} = 0, \quad \theta = 0, \theta^0, \quad (8)$$

где θ^0 может принимать различные значения в зависимости от закона распределения заданной функции температур $T(r, \theta)$ по периметру сечения; $0 \leq \theta \leq \theta^0$ – условие периодичности решения, определяемое периодом функции распределения температур. Граничные условия на торцах не рассматриваются, так как цилиндр считается длинным, и анализируются сечения, достаточно удаленные от торцов, в соответствии с принципом Сен-Венана. Расчетная область интегрирования для механико-математической модели квазистатического неосесимметричного деформирования длинного сплошного цилиндра может быть представлена в виде, показанном на рисунке 10, а. Без ограничения общности построения механико-математической модели неосесимметричного НДС цилиндрических тел, рассмотренный случай дополнен моделями деформирования полого (рисунок 10, б) и многослойного цилиндров.

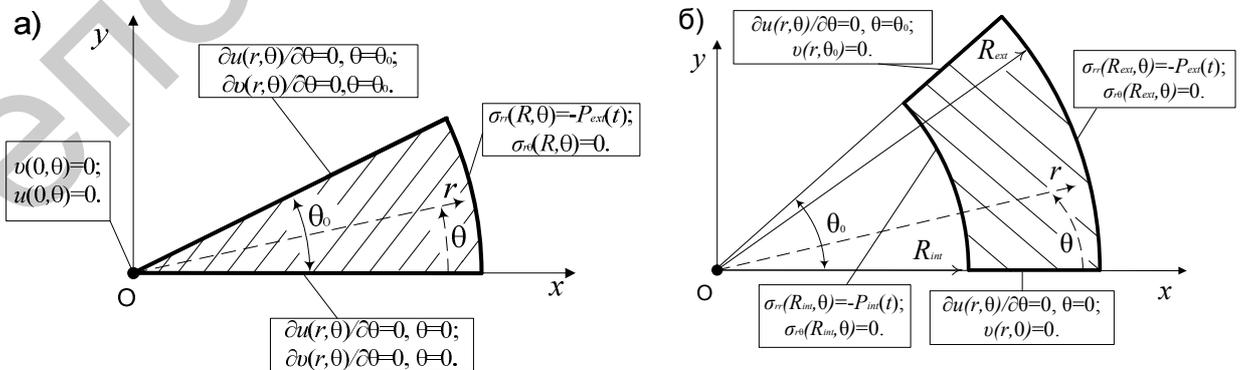


Рисунок 10 – Расчетная область и условия на границе длинного тела односвязной (а) и двусвязной (б) цилиндрической геометрии

В общем случае многослойного цилиндрического тела, полагая, что соседние слои не имеют свободы перемещений относительно друг друга, задавалось:

$$\sigma_{rr}^I(R_{ext}^I) = \sigma_{rr}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \sigma_{r\theta}^I(R_{ext}^I) = \sigma_{r\theta}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); u^I(R_{ext}^I) = u^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \vartheta^I(R_{ext}^I) = \vartheta^{I+1}(R_{int}^{I+1}). \quad (9)$$

Здесь $I=1,2,\dots,J$ – номер слоя, J – количество слоев; R_{int}^I, R_{ext}^I – радиусы I -го слоя.

Для реализации численного подхода, в области изменения независимых переменных ($0 \leq \theta \leq \theta^0, 0 \leq r \leq R$) строилась криволинейная структурированная сетка, связанная с границами интегрируемой области (рисунок 11). Регулярная структура такой сетки в дальнейшем позволила организовать эффективную работу с разреженными матрицами при решении систем уравнений, причем матрицы коэффициентов системы были полнозаполненные. Использовались неявные разностные схемы с весовыми коэффициентами. В основу предлагаемого численного метода решения полученной разностной системы уравнений на основе (5)-(8) заложены метод конечных разностей, метод матричной прогонки, идеи метода дробных шагов Н.Н. Яненко, теория аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функции, а также итерационные методы. Окончательно, дискретная система, описывающая общий случай неосесимметричного НДС в условиях терморadiационного нагружения представлена в виде:

$$\begin{cases} \chi_{li} u_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\chi_{li}) u_{i,j+1}^n + \chi_{1,i} u_{i-1,j+1}^n = d_{i,j}^n; \\ \xi_{li} \vartheta_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\xi_{li}) \vartheta_{i,j+1}^n + \xi_{li} \vartheta_{i-1,j+1}^n = k_{i,j}^n. \end{cases} \quad (10)$$

$$\chi_{li} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \alpha; \chi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \beta; \xi_{li} = \frac{r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2}{2(\mu-1)h_r^2} \alpha; \xi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \beta.$$

Здесь $d_{i,j}^n, k_{i,j}^n$ – функции от перемещений на предыдущих слоях по окружной координате ($j, j-1$): $d_{i,j}^n = -2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n(1 - \chi_{2i}\Lambda_2) - F_{1i,j}(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})H_i, H_i = 2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2/(2\mu-1);$
 $k_{i,j}^n = -2\vartheta_{i,j}^n + \vartheta_{i,j-1}^n(1 - \xi_{2i}\Lambda_2) - F_{2i,j}(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})M_i, M_i = r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2/(2\mu-2); \alpha + \beta = 1.$

Где нелинейные члены F_1 и F_2 определяются по выражениям, представленным в конечно-разностной форме, включающим частные производные от искомым функций и неупругие слагаемые в правой части (10): термическое расширение, радиационное распухание, деформации ползучести.

Граничные условия (6)-(8) в общем виде для n -го временного этапа деформирования переписываются в дискретной форме по формулам численного дифференцирования. Причем условия (7) в напряжениях первоначально конвертируются относительно перемещений через физические уравнения и формулы Коши.

Для определения неизвестных функций $u_{i,j+1}, \vartheta_{i,j+1}$ на каждом шаге по окружной координате имеем систему уравнений (10) с граничными условиями (6)-(8), представленными в разностном виде относительно перемещений. Системы разностных уравнений имеют полнозаполненные матрицы трехдиагональной структуры и могут быть решены по методу матричной прогонки, на основе модификации разработанной во 2-ой главе численной схемы. Система (10) расщепляется на две системы, которые решаются прогонками с учетом параметра времени t : первая по радиальному перемещению, а вторая по окружному. Прогонка осуществляется по радиусам, которые для каждого луча начинаются в центре сечения и оканчиваются на границах исследуемой области. Показано, что такие прогонки имеют свои особенности, вызванные характе-

ром сетки, расчетной областью и видом рассматриваемых физически нелинейных эффектов. По окончании текущего шага расчета в алгоритме, реализующем механико-математическую модель с учетом необратимых деформаций, фиксируются величины, характеризующие НДС каждой точки по периметру модельного тела в конце n -го этапа нагружения, и начинается расчет $(n+1)$ -го этапа. В результате, для получения решения на следующем $n+1$ временном слое решается новая система неоднородных линейных уравнений по изложенной выше численной методике. Таким образом, для любого текущего момента времени t_n имеем полную замкнутую систему из $2km$ неоднородных алгебраических уравнений с $2km$ неизвестными. Общая схема численного решения представлена на рисунке 11. Необходимая точность в процессе решения достигается, с одной стороны, измельчением шага криволинейной структурированной сетки в радиальном и окружном направлениях, с другой стороны повышением степени порядка аппроксимации выражений частных производных в конечных разностях (на основе дифференцирования интерполяционного полинома Лагранжа или более удобных для численного использования интерполяционных формул Ньютона).

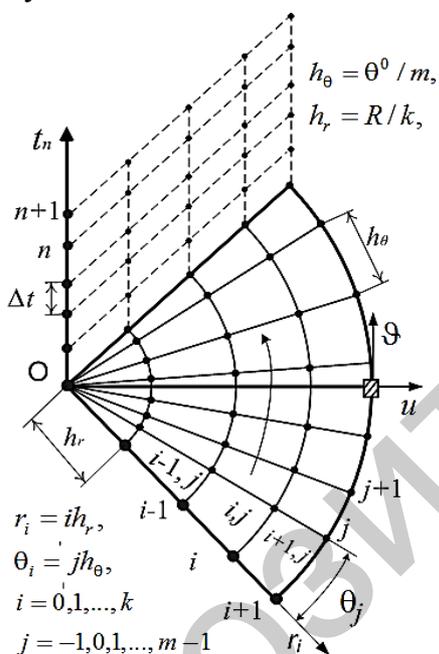


Рисунок 11 – Численная схема разбиения сечения модели

В диссертации подробно рассмотрены особенности реализации разработанной механико-математической модели, которая включала моделирование обобщенного плоского квазистатического деформированного состояния ($\varepsilon_{zz} = C(t) \neq 0$) и отдельную процедуру вычисления необратимых деформаций. При определении деформаций ползучести на каждом временном шаге используется теория течения с учетом радиационной составляющей. Деформации радиационного распухания на каждом этапе нагружения определяются с помощью эмпирических зависимостей, полученных на основе внутриреакторных испытаний тепловыделяющих и конструкционных материалов. Для проведения исследований на разработанной общей механико-математической модели деформирования длинных цилиндров в условиях сложных немеханических воздействий реализован оригинальный алгоритм расчета неосесимметричного НДС и компьютерная программа решения $2D(r, \theta)$ задачи ползучести в условиях облучения. Программная модель реализована на C# в среде Microsoft Visual Studio 2010 и позволяет обрабатывать и визуализировать результаты расчетов. Программа соответствует основным стандартам к приложениям для операционных систем Windows (XP, Vista, 7).

В четвертой главе на основе созданных методов, алгоритмов и комплекса программ для численного исследования предложенных новых механико-математических моделей, используя разработанную специальную методику, выполнено компьютерное моделирование $2D(r, \theta)$ деформирования односвязного цилиндрического тела в условиях терморadiационных воздействий и рассмотрено влияние окружной неравномерности на неосесимметричное НДС для различных значений амплитуд температур. В

качестве модельных тел, рассматриваются сплошные цилиндры, выполненные как из конструкционного, так и из тепловыделяющего материала.

Неравномерно нагретый цилиндр с внутренними источниками тепла. Неосесимметричное температурное поле задается с учетом равномерного внутреннего тепловыделения в виде

$$T(r, \theta) = Q(R^2 - r^2)/4\lambda + A(r/R)^4 \sin(4\theta) + T_s \quad (11)$$

Здесь $R=0.003\text{м}$; A – амплитудное значение окружной неравномерности; $T_s=873$. Тепловыделяющий материал обладает осредненными по сечению характеристиками (соответствующими керметному топливу), а скорость распухания тела задается на основании модели сферических газовых пор в соответствии с решениями интегродифференциальных уравнений распухания, при неравномерном по периметру нагреве (11). Для удобства анализа получаемых результатов сечение модельного тела условно разделено на три участка (рисунок 12). Посредством компьютерного моделирования, получена картина изменения характеристик напряженного и деформированного состояния тепловыделяющего цилиндрического тела со временем для различных амплитудных значений окружной температурной неравномерности. Поверхности напряжений показаны на рисунке 13. Эпюры изменения полной окружной деформации по периметру сплошного цилиндра при для 3000ч и 5000ч терморadiационного нагружения представлены на рисунке 14.

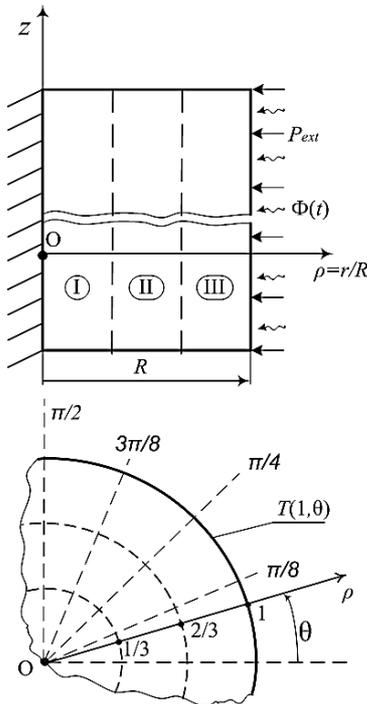


Рисунок 12 – Схема анализа неосесимметричного НДС

температурной неравномерности. Поверхности напряжений показаны на рисунке 13. Эпюры изменения полной окружной деформации по периметру сплошного цилиндра при для 3000ч и 5000ч терморadiационного нагружения представлены на рисунке 14.

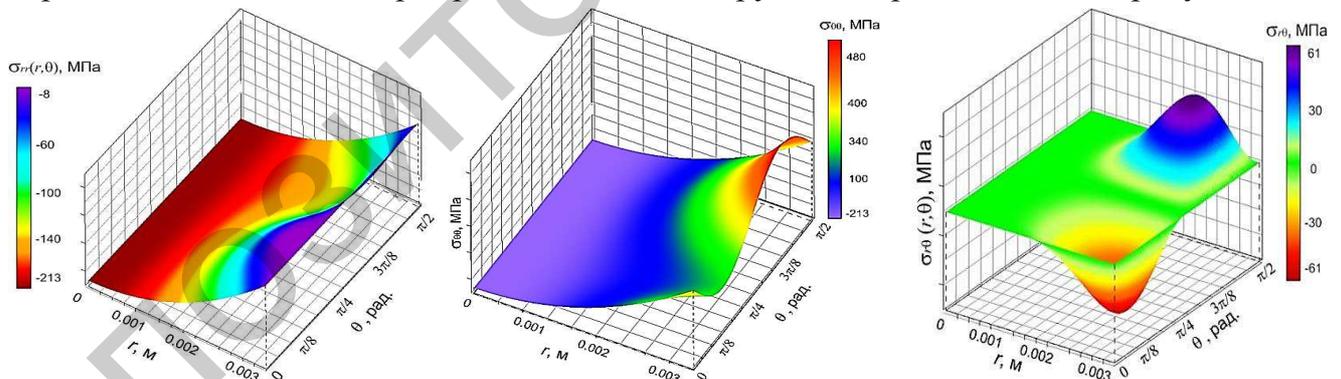


Рисунок 13 – Поверхности радиальных, окружных и касательных напряжений за 1000ч

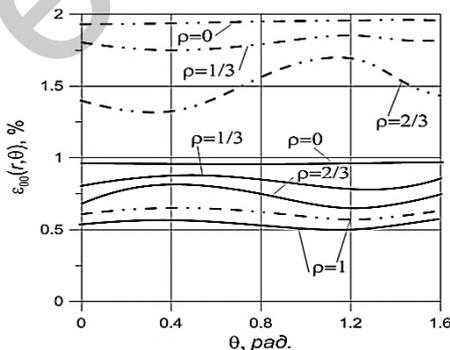


Рисунок 14 – Изменение деформаций:
— — 3000ч; - - - - - 5000ч

В качестве другой модельной задачи рассмотрено неосесимметричное *НДС неравномерно нагретого по периметру длинного сплошного цилиндра без внутренних источников тепловыделения*, облучаемого потоком быстрых нейтронов ($\bar{E} > 0.1$ МэВ) плотностью $\phi = 7.8 \cdot 10^{19}$ нейтрон/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Стационарный температурный нагрев осуществляется по закону (11) при $Q=0$, $A=50$, $R=0.003\text{м}$, $T_s=823$ К.

Упругие и теплофизические характеристики физико-механических свойств конструк-

ционного материала соответствуют нержавеющей аустенитной стали. Механическое давление, равномерно распределенное по внешней поверхности цилиндра равно $P_{ext}=8$ МПа. Также рассмотрено влияние неравномерного температурного распределения на работоспособность модельного тела при изменениях температуры от 500°C до 600°C и величине флюенса нейтронов вплоть до 10^{27} нейтрон/ m^2 . Изменение объемных радиационных деформаций за 5000ч облучения потоком быстрых нейтронов ($\bar{E}>0.1$ МэВ) плотностью $\phi=7.8\cdot 10^{19}$ нейтрон/ $(\text{m}^2\cdot\text{c})$ при неосесимметричном нагреве ($A=50$) представлено на рисунке 15. Распределение полей напряжений в указанном диапазоне терморadiационных нагружений в зависимости от окружной координаты показано на рисунке 16. Исследование и анализ неосесимметричного НДС проводился по схеме, представленной на рисунке 12.

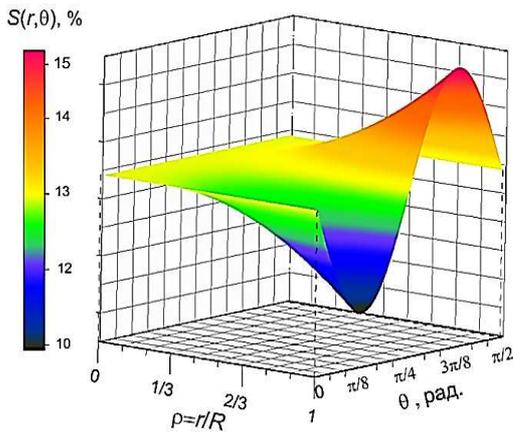


Рисунок 15 – Распределение радиационного распухания

метричном нагреве ($A=50$) представлено на рисунке 15. Распределение полей напряжений в указанном диапазоне терморadiационных нагружений в зависимости от окружной координаты показано на рисунке 16. Исследование и анализ неосесимметричного НДС проводился по схеме, представленной на рисунке 12.

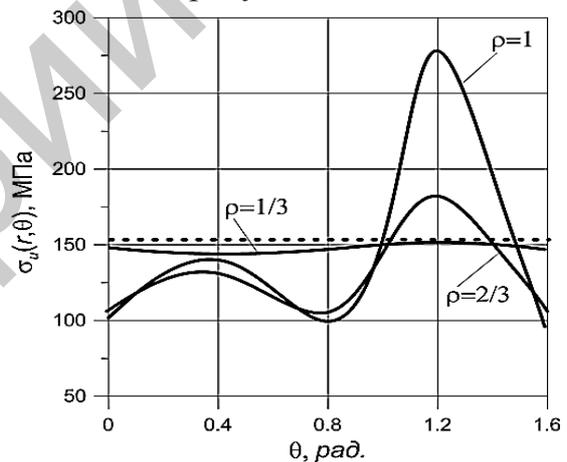
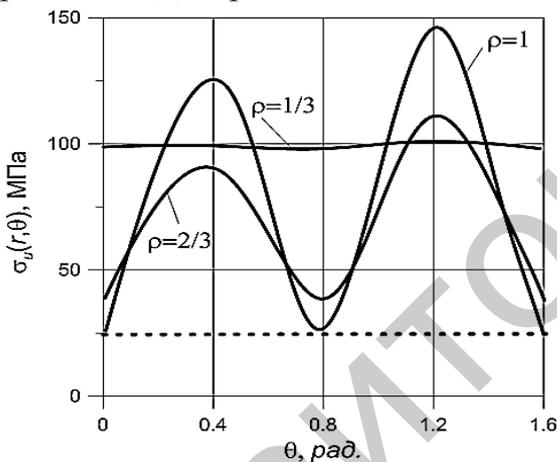


Рисунок 16 – Изменение интенсивности напряжений при $t=1000\text{ч}$ (а) и $t=5000\text{ч}$ (б) с учетом (—) и без учета (---) окружной неравномерности температуры

Достоверность результатов решенных задач подтверждена совпадением их с аналитическим решением (при отсутствии радиационного распухания и ползучести), частично с результатами натуральных экспериментов и данными, полученными с помощью других пакетов прикладных программ (рисунок 17: — — аналитическое решение; — приближенное, по МКЭ; $\times\times\times$ — численное, по разработанной методике), корректность которых доказана многолетней практикой их использования, а также исследованием сходимости конечноразностных аппроксими-

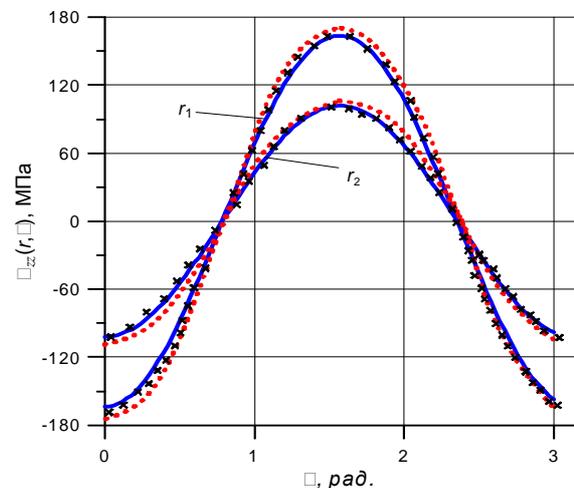


Рисунок 17 – Сравнение осевых термических напряжений в длинном сплошном цилиндре

маций с изменением шага разбиения. Решение ряда тестовых и модельных задач дало хорошее совпадение полученных численных результатов с известными решениями и расчетными данными других авторов: для различных параметров отклонение составляет от 4.6% до 9% соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации. Основные результаты и выводы диссертационной работы формулируются следующим образом

1. Модифицированы механико-математические модели осесимметричного деформирования цилиндрических тел, описывающие основные закономерности поведения конструкционных и топливных материалов в условиях термосиловых и радиационных воздействий с учетом зависимости их механических и теплофизических характеристик от уровней действующих температур в диапазоне 573–1150 К и флюенсов нейтронов 10^{25} – 10^{27} нейтрон/м² [3, 4, 6, 9, 10, 11, 15, 17, 18, 25, 28];

2. Впервые получены разрешающие системы дифференциальных уравнений в частных производных относительно перемещений, описывающие неосесимметричное НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении. Для их решения предложен и обоснован численный метод. Разработана расчетная схема и алгоритмы нахождения основных характеристик неосесимметричного НДС цилиндрических тел в условиях ползучести и нейтронного облучения. При определении деформаций ползучести использовалась теория течения с учетом радиационной составляющей [1, 7, 12, 21–24];

3. Разработана механико-математическая модель неосесимметричного НДС, учитывающая изменение напряжений и деформаций по периметру цилиндрических тел с учетом влияния тепловых и радиационных эффектов в условиях плоской и обобщенной плоской деформации. Использование предложенной модели позволило впервые определить неосесимметричное НДС в условиях ползучести и облучения для длинных сплошных и полых толстостенных цилиндров [7, 8, 20, 24, 25, 27, 30];

4. На основе предложенных моделей созданы эффективные методики, оригинальные алгоритмы и программные средства, позволяющие проводить численное исследование кинетики упруговязких процессов деформирования элементов конструкций и компонентов оборудования, работающих в условиях сложных квазистатических терморadiационных воздействий. Универсальный программный комплекс для различных типов граничных условий и вида цилиндрических областей (сплошной, полый, многослойный цилиндры) имеет адаптацию к различным видам физической нелинейности (радиационное распухание и ползучесть). Программная модель реализована на С# в среде Microsoft Visual Studio 2010 Express и позволяет обрабатывать и визуализировать результаты расчетов кинетики НДС цилиндрических тел [2, 3, 8, 27, 29, 30];

5. Получен ряд решений модельных и тестовых задач для изучения деформирования цилиндрических тел с учетом физической нелинейности: решение задачи ползучести стальной трубы под облучением, определение НДС тепловыделяющих цилиндров с учетом радиационного распухания и термической ползучести, сравнительный анализ кинетики деформирования полых и сплошных цилиндрических тел с внутрен-

ними источниками тепла. Достоверность полученных в работе результатов подтверждена совпадением полученных данных с ранее выполненными приближенными оценками НДС полых и сплошных цилиндров в условиях облучения, полученными другими авторами, а также путем тестирования численных результатов на точных аналитических решениях, в случае отсутствия радиационного распухания и ползучести [1, 3–11, 13, 19, 24, 25, 27–30];

6. Впервые исследовано влияние неосесимметричности температурного поля на результаты решения задачи определения квазистатического НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении: проведено сравнение симметричной и неосесимметричной моделей НДС цилиндрических тел и пределы их применимости в зависимости от амплитуды температурной неоднородности. Выполненные исследования по неосесимметричному НДС и последующий анализ результатов виртуального моделирования выявили влияние на конечное решение допущений, имеющих место в осесимметричной модели [1, 5, 7, 8, 12, 27, 29, 30];

7. Разработана специальная методика проведения виртуальных экспериментальных исследований и программный модуль $2D(r, \theta)$ для имитационного моделирования и исследования НДС тепловыделяющих цилиндрических тел, позволяющие адекватно описать реально происходящие процессы неосесимметричного деформирования при ползучести и облучении для основных конструкционных и топливных (тепловыделяющих) материалов [2, 5, 7–9, 13, 14, 16, 18, 19, 29, 30].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Подходы, приемы и методы, используемые и полученные в диссертационной работе, а также собственно полученные результаты могут быть использованы: для дальнейшего развития и совершенствования методов моделирования и изучения терморadiационного НДС; при выполнении научно-исследовательских фундаментальных и прикладных тем, связанных с изучением прочностных характеристик твердых тел в условиях сложных термосиловых нагружений.

Предложенная общая механико-математическая модель и численный метод определения НДС могут послужить базой для разработки отечественных компьютерных кодов, моделирующих поведение цилиндрических элементов конструкций и компонентов оборудования, работающих в условиях экстремальных механических, термических и радиационных нагрузок при определении НДС элементов конструкций и компонентов оборудования в машиностроении и энергетике. Результаты проведенных исследований могут быть также использованы при чтении специальных курсов студентам специальностей, связанных с компьютерным моделированием необратимых механических процессов, а также для подготовки отечественных специалистов по прочностным расчетам в области атомного машиностроения. Они уже нашли применение в учебном процессе БНТУ, что отражено в акте внедрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных в Перечне ВАК

1. *Куликов, И.С.* Решение неосесимметричной задачи термоупругости для неравномерно нагретого длинного цилиндра в условиях ползучести / *И.С. Куликов, П.И. Ширвель* // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 4. – С. 75–80.
2. *Ширвель, П.И.* О численных методах исследования напряженно-деформированного состояния тепловыделяющих элементов АЭС / *П.И. Ширвель* // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. Приложение. – 2010. – Т. 5. – С. 226–235.
3. *Ширвель, П.И.* Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек конечной длины при неравномерном нагреве и нейтронном облучении / *П.И. Ширвель, С.А. Клус* // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2010. – № 4. – С. 90–100.
4. *Куликов, И.С.* Расчет напряженно-деформированного состояния топливных элементов ядерного реактора с помощью функции напряжений Эри / *И.С. Куликов, П.И. Ширвель* // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 1 (10). – С. 68–73.
5. *Куликов, И.С.* Моделирование термосилового воздействия на топливный сердечник твэла активной зоны АЭС / *И.С. Куликов, П.И. Ширвель* // Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 3. – С. 55–62.
6. *Ширвель, П.И.* Прогнозирование ресурса и моделирование НДС трубопроводов, используемых на АЭС / *П.И. Ширвель, Т.И. Кулак* // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 4. – С. 60–69.
7. *Ширвель, П.И.* Модель расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях пластичности и ползучести / *П.И. Ширвель, И.С. Куликов* // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2012. – № 4. – С. 51–62.
8. *Ширвель, П.И.* Решение задачи Кирша в условиях радиационного облучения / *П.И. Ширвель, Д.Н. Костюк, А.А. Сергей* // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск: БНТУ, 2012. – Вып. 27. – С. 275–282.
9. *Костюк, Д.Н.* Нелинейное вязкоупругое деформирование при стационарном нагреве и облучении высокоэнергетическими частицами / *Д.Н. Костюк, П.И. Ширвель* // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 28. – С. 132–142.
10. *Кулешов, Р.А.* Изгиб балки в условиях неравномерного нагрева и нейтронного облучения / *Р.А. Кулешов, П.И. Ширвель, Н.М. Сабиров* // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск: БНТУ, 2013. – Вып. 28. – С. 237–244.

Статьи в сборниках

11. *Ширвель, П.И.* Решение радиационно-термоупругой задачи для сплошного цилиндра / *П.И. Ширвель* // Теоретическая и прикладная механика: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2008. – Вып. 23. – С.55–63.
12. *Ширвель, П.И.* О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению / *П.И. Ширвель,*

- И.С. Куликов* // Машиностроение: респ. межвед. сб. в 2 т. – Минск: БНТУ, 2009. – Вып. 24, т. 1. – С. 185–191.
13. **Ширвель, П.И.** Определение напряженно-деформированного состояния тепловыделяющих элементов ядерного реактора АЭС / **П.И. Ширвель, И.С. Куликов** // НИРС – 2009: сб. науч. работ студ. высш. учеб. зав. Республики Беларусь. – Минск: БГУ, 2010. – С. 222–226.
14. **Ширвель, П.И.** Методика оценки прочностных характеристик чехла тепловыделяющей сборки атомного реактора / **П.И. Ширвель, А.В. Глембоцкий, С.А. Клус** // Теоретическая и прикладная механика: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2010. – Вып. 25. – С. 238–244.
15. **Ширвель, П.И.** НДС тонкостенных цилиндрических оболочек при неравномерном нагреве и нейтронном облучении с учетом тепловой и радиационной ползучести / **П.И. Ширвель, А.В. Левчук, С.А. Клус** // Теоретическая и прикладная механика: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2010. – Вып. 25. – С. 244–252.
16. *Глембоцкий, А.В.* Оценка напряженного состояния чехла тепловыделяющей сборки атомного реактора / *А.В. Глембоцкий, П.И. Ширвель, С.А. Клус* // Теоретическая и прикладная механика: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 26. – С. 411–419.
17. *Куликов, И.С.* Моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при неравномерном нагреве и нейтронном облучении / *И.С. Куликов, П.И. Ширвель, С.А. Клус* // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 26. – С. 238–244.
18. *Левчук, А.В.* Влияние механических нагрузок на напряженно-деформированное состояние тонкостенных цилиндрических оболочек в условиях ядерных реакторов / *Левчук А.В., П.И. Ширвель, Клус С.А.* // Машиностроение: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 26. – С. 455–463.
19. *Покульницкий, А.Р.* Моделирование взаимодействия топлива и оболочки твэла с помощью МКЭ в среде ANSYS / *А.Р. Покульницкий, П.И. Ширвель, С.А. Клус* // Машиностроение: респ. межвед. сб. – Минск: БНТУ, 2011. – Вып. 26. – С. 405–411.

Материалы конференций

20. *Чигарев, А.В.* Расчетная модель НДС для неосесимметричного цилиндра, подверженного неравномерному нагреву и нейтронному облучению при ползучести / *А.В. Чигарев, П.И. Ширвель, И.С. Куликов* // «Инновации в машиностроении»: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30–31 окт. 2008 г. – Минск: ОИМ, 2008. – С. 242–250.
21. **Ширвель, П.И.** Определение неосесимметричного НДС длинного сплошного цилиндра в условиях ползучести и облучения / **П.И. Ширвель** // «Математическое моделирование и краевые задачи»: тр. VII Всероссийской науч. конф. с междунар. участием, Самара, 3–6 июля 2010 г.: в 2 ч. – Самара: СамГТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 395–398.
22. **Ширвель, П.И.** Неосесимметричное НДС цилиндрического тела в условиях терморadiационного нагружения с учетом пластической деформации / **П.И. Ширвель** // Научн. тр. Междунар. конф. ученых МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, Москва-Луганск, 15–17 янв. 2010 г.: в 7 т. – М.: МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, 2010. – Т. 6: Естественные и технические науки. – С. 35–40.
23. *Чигарев, А.В.* Неосесимметричное термоупругопластическое деформирование цилиндрических тел в условиях облучения / *А.В. Чигарев, П.И. Ширвель* // Меха-

- ника 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. С. 404–411.
24. *Чигарев, А.В.* Упруговязкопластическое деформирование тел цилиндрической геометрии при термосиловых нагружениях в условиях нейтронного облучения / *А.В. Чигарев, П.И. Ширвель* // «Современные проблемы математики, механики, информатики»: материалы междунар. научн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина, 19–23 сент. 2011 г. – Тула: ТулГУ, 2011. – С. 237–247.
25. *Чигарев, А.В.* Механико-математическая модель напряженно-деформированного состояния трубопровода АЭС / *А.В. Чигарев, П.И. Ширвель, Т.И. Кулак* // Научн. тр. Междунар. конф. ученых МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, Москва-Луганск, 19–20 янв. 2012 г.: в 6 т. – М.: МАДИ (ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ, 2012. – Т. 6. Естественные и технические науки. – С. 36–45.

Тезисы докладов

26. *Ширвель, П.И.* НДС сплошного цилиндра, подверженного температурному радиационному и силовому воздействию / *П.И. Ширвель* // «Наука – образованию, экономике и производству»: сб. тезисов докл. VI междунар. научн.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2008. – Т. 3. – С. 300.
27. *Ширвель, П.И.* Моделирование механического поведения топливного сердечника твэла при терморadiационных нагружениях в условиях пластичности и ползучести / *П.И. Ширвель* // «Ядерные технологии XXI века»: сб. тезисов докл. II Междунар. конф., 6–8 окт. 2010 г. – Минск: ОИЭЯИ – Сосны, 2010. – С. 19–20.
28. *Ширвель, П.И.* Исследование защитной оболочки тепловыделяющего элемента атомного реактора / *П.И. Ширвель, С.А.Клус, А.В.Левчук* // «Наука – образованию, производству и экономике»: сб. тезисов докл. VII междунар. научн.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2010. – Т. 3 – С. 411.
29. *Shyrvel, P.I.* The simulation of stress state for cermet fuel pin under NPP's reactor operating / *P.I. Shyrvel* // «Integrating science and technology for sustainable energy development as basis for secure future SSF-2010»: Proc. of II International Humboldt Conference, Minsk, June 3–6, 2010. – Minsk, 2010. – P. 22–24.
30. *Shyrvel, P.I.* Mechanical model and simulation of stress/strain state for the cermet fuel pin under operation of NPP's reactor / *P.I. Shyrvel* // «NuMat2010»: Proc. of The Nuclear Materials Congress, Karlsruhe, Germany, October 4–7, 2010 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. и прогр. (530 Мб). – Karlsruhe, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

РЭЗЮМЭ

Шырвель Павел Іванавіч

НЕСІМЕТРЫЧНЫ НАПРУЖАНА-ДЭФАРМАВАНЫ СТАН ДОЎГІХ ЦЫЛІНДРЫЧНЫХ ЦЕЛ ВА ЁМОВАХ ПАЎЗУЧАСЦІ І РАДЫЯЦЫЙНАГА АПРАМЯНЕННЯ

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, незваротныя дэфармацыі, радыяцыйнае распуханне, паўзучасць, невосіметрычнае дэфармаванне, механіка-матэматычная мадэль, віртуальнае мадэляванне.

Мэта работы: распрацоўка механіка-матэматычных мадэляў нелінейнага дэфармавання, якія ўлічваюць інтэнсіўнае апрамяненне струменямі часціц з вялікай энергіяй, неаднастайнае тэрмасілавое ўздзеянне і рэаномнасць уласцівасцяў матэрыялу; распрацоўка агульных падыходаў і эфектыўных метадык рашэння адпаведных краявых задач; віртуальнае мадэляванне.

Метады даследавання: сістэмы праграмавання C#/C++, асяроддзе праграмавання Microsoft Visual Studio 2010, агульная метадалогія мадэлявання, матэматычны апарат краявых задач для нелінейных дыферэнцыяльных ураўнанняў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Разгледжаны асаблівасці дэфармавання матэрыялаў з улікам залежнасці іх механічных і цеплафізічных характарыстак ад узроўняў дзейнічаючых тэмператур і апрамянення струменем часціц з вялікай энергіяй, эфектаў радыяцыйнай фармазмены і тэрмарадыяцыйнай паўзучасці. Праведзена агульная пастаноўка краявых задач па разліку НДС цел цыліндрычнай формы, якія эксплуатауюць у экстрэмальных умовах нагружэння. Развіты механіка-матэматычныя мадэлі дэфармавання, якія ўлічваюць асноўныя заканамернасці паводзін ва ўмовах тэрмасілавых і радыяцыйных уздзеянняў з улікам рэалагічных уласцівасцяў матэрыялу і розных умоў замацавання. Распрацаваны новы варыянт мадэлі $2D(r,\theta)$ несіметрычнага НДС, які ўлічвае змену напружання і дэфармацыі ўздоўж радыяльнай і акруговай каардынаты па перыметры сячэння. На аснове прапанаваных мадэляў створаны эфектыўныя метадыкі, алгарытмы і праграмныя сродкі, якія дазваляюць праводзіць лікавае даследаванне кінэтыкі вязкапружкіх працэсаў дэфармавання канструктыўных элементаў, што працуюць ва ўмовах складаных квазістатычных тэрмарадыяцыйных уздзеянняў.

Рэкамендацыі па прымяненні. Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры праектаванні, распрацоўцы і прагназаванні рэсурсу рэальных элементаў канструкцый і кампанентаў абсталявання энергетычнага машынабудавання, а таксама ў вучэбнай практыцы тэхнічных універсітэтаў пры чытанні спецыяльных курсаў па мадэляванню незваротных механічных працэсаў.

РЕЗЮМЕ

Ширвель Павел Иванович

НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИИ

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, необратимые деформации, радиационное распухание, ползучесть, неосесимметричное деформирование, механико-математическая модель, виртуальное моделирование.

Цель работы: создание механико-математических моделей нелинейного деформирования, учитывающих облучение, неоднородное термосиловое воздействие и изменение свойств; разработка общих методов решения соответствующих краевых задач; алгоритмическая и программная реализация, компьютерное моделирование.

Методы исследования: системы программирования C#/C++, среда программирования Microsoft Visual Studio 2010, общая методология моделирования, математический аппарат краевых задач для нелинейных дифференциальных уравнений.

Полученные результаты и их новизна. Установлены особенности деформирования конструкционных и тепловыделяющих материалов с учетом зависимости их характеристик от уровней действующих температур и облучения, эффектов радиационного формоизменения и терморadiационной ползучести. Дана общая постановка краевых задач по расчету НДС тел цилиндрической геометрии, эксплуатируемых в экстремальных условиях нагружения. Модифицированы осесимметричные модели деформирования с учетом ползучести материала и различных условий нагружения и закрепления. Разработана новая механико-математическая модель $2D(r, \theta)$ неосесимметричного НДС, учитывающая изменение напряжений и деформаций в зависимости от радиальной и окружной координат с учетом ползучести и влияния тепловых и радиационных эффектов. На основе предложенных моделей созданы эффективные методики, алгоритмы и программные средства, позволяющие проводить численное исследование кинетики деформирования элементов оборудования, работающих в условиях сложных квазистатических силовых и терморadiационных воздействий.

Рекомендации по применению. Полученные результаты могут быть использованы при определении и анализе НДС, а также при прогнозировании ресурса экстремально нагруженных конструктивных элементов в машиностроении и энергетике. Результаты исследований использованы в учебном процессе при чтении специальных курсов студентам специальностей, связанных с компьютерным моделированием необратимых механических процессов.

SUMMARY
Shyrvel Pavel Ivanovich
ASYMMETRIC STRESS/STRAIN STATE OF LONG CYLINDRICAL
ELEMENTS UNDER CREEP AND NUCLEAR RADIATION

Key words: stress/strain state, irreversible deformation, irregular temperature, swelling, creep, asymmetric mechanical model, stress state simulation.

The purpose of work: to create nonlinear mechanical models of stress/strain state for cylindrical elements undergoing irregular temperatures, swelling and creep; to produce a general mathematical model of solve stress/strain state problem for solid, hollow and multi-layer cylinders undergoing nuclear radiation, creep and thermal strains; software implementation of these models, numerical solution, research and analysis.

Methods of research: systems programming C#/C++, a programming environment Microsoft Visual Studio 2010 Express, general methodology of mathematical modeling and computer simulation, theory of nonlinear differential equations.

The obtained results and their novelty. A new model of 2D (r, θ) asymmetric stress/strain state taking into account the change of displacements, stresses and strains as a function of radial and circumferential coordinates has been suggested. The numerical solution to solve stress/strain state problem under creep, swelling and thermal strain has been obtained. The method of the numerical analysis has been offered. The original algorithms and computer software for solutions of 1D(r) and 2D (r, θ) stress/strain state under creep and nuclear radiation have been realized. All the obtained results have been verified via checking procedures. The analysis of the mechanisms of nonlinear asymmetric deformation for cylindrical bodies was produced. Optimization performance characteristics of quasistatic loading of fast neutron flux and establish the optimal properties of the irreversible deformation processes for asymmetric stress/strain state have been done.

Recommendations to use. The obtained results can be used in in the design and development of a wide class of problem for power engineering and nuclear power. The proposed mechanical model and numerical method can be the basis for the development of computer code to simulate the behavior of structural elements and components of the equipment in a whole spectrum of extreme operational modes, including emergency situations. Also they can be used in teaching process by reading special courses of mechanical modeling and simulation in universities.

Научное издание

Ширвель Павел Иванович

НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ДЛИННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ
ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИИ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Подписано в печать 21.05.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 80. Заказ 506.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.