

ГОРОХОВ ВАСИЛИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ
И ГРАФИТОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ
НАГРУЖЕНИЯХ**

Специальность 01.02.04 –
механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего
профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор **Капустин Сергей Аркадьевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Коротких Юрий Георгиевич**
кандидат технических наук, доцент **Миронов Анатолий Алексеевич**

Ведущая организация – ФГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова

Защита состоится 24 мая 2007 года в 16.00 на заседании диссертационного совета
Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по
адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 6, актов. зал.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан 24 апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.09
кандидат технических наук

Трухин Б.В.

Актуальность темы.

Многие конструктивные элементы современной техники, в частности ядерных энергетических установок, работают продолжительное время в условиях механических и физических воздействий, что приводит к необходимости исследования поведения в процессе эксплуатации наиболее ответственных узлов. Характерной особенностью, отличающей условия эксплуатации ряда ответственных узлов ядерных энергетических установок (ЯЭУ), является работа в течение длительного срока в условиях повышенных температур и интенсивного радиационного облучения. Эксплуатация конструкции в условиях радиационного воздействия приводит к значительным изменениям механических свойств и дополнительным эффектам поведения облучаемого материала, оказывающим существенное влияние на процессы деформирования конструкции в целом.

Материалами, наиболее широко используемыми в ядерных энергетических установках, являются нержавеющие стали и искусственные конструкционные графиты. Нейтронное облучение вызывает радиационное формоизменение и радиационную ползучесть нержавеющих сталей, значительно влияет на протекание процессов термической ползучести и пластичности. В конструкционных графитах, наряду с перечисленными эффектами в процессе облучения проявляется также анизотропия свойств, оказывающая существенное влияние на поведение этих материалов в условиях терморadiационных воздействий. Для адекватного отражения процессов деформирования элементов конструкций, работающих в условиях термических и радиационных воздействий, должны быть созданы математические модели, описывающие упруговязкопластическое поведение конструкционных материалов с учетом основных эффектов возникающих при нейтронном облучении. Кроме того, необходимо разработать алгоритмы и численные методики, реализующие созданные модели в виде программных средств численного исследования упруговязкопластического деформирования конструкций при терморadiационных воздействиях.

Таким образом, проблема численного моделирования упруговязкопластического поведения конструкций при квазистатических термосиловых и радиационных воздействиях представляется весьма актуальной.

Цели диссертационной работы.

- анализ основных закономерностей поведения нержавеющих сталей и конструкционных графитов в условиях терморadiационных воздействий;
- развитие математических моделей, описывающих основные закономерности процессов деформирования нержавеющих сталей и конструкционных графитов, находящихся в условиях комбинированных термосиловых и радиационных нагружений;

- разработка, на основе предложенных моделей, алгоритмов и численных методик решения задач упруговязкопластического деформирования конструкций, выполненных из этих материалов, при квазистатических термосиловых и радиационных воздействиях;

- создание программных средств, реализующих разработанные модели, алгоритмы и методики в рамках существующего в НИИ механики вычислительного комплекса;

- численные исследования влияния основных эффектов, проявляющихся при терморadiационных нагружениях облучаемых материалов, на закономерности процессов их деформирования;

- численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей и конструкционных графитов, эксплуатирующихся в условиях термомеханических и радиационных воздействий.

Научная новизна.

Развиты модели, описывающие основные закономерности поведения нержавеющей сталей и графитовых материалов в условиях термосиловых и радиационных воздействий с учетом зависимости их механических и теплофизических характеристик от уровней действующих температур и нейтронного облучения, эффектов радиационного формoизменения и терморadiационной ползучести.

Сформулирован вариант структурно-феноменологической модели трансверсально-изотропных материалов, учитывающей анизотропию механических свойств искусственных конструкционных графитов.

Разработаны методики, алгоритмы и программные средства, реализующие разработанные модели, которые позволяют проводить численное исследование кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий из нержавеющей сталей и конструкционных графитов, работающих в сложных условиях квазистатических силовых и терморadiационных воздействий.

Проведены численные исследования влияния основных эффектов, проявляющихся при терморadiационных нагружениях облучаемых материалов, на закономерности процессов их деформирования.

Решен ряд задач исследования НДС элементов и узлов конструкций из нержавеющей сталей и конструкционных графитов, эксплуатирующихся в условиях термосиловых и радиационных воздействий, близких к аналогичным условиям работы реальных ЯЭУ.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается решением большого числа тестовых задач и хорошим согласованием получаемых численных с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Практическая ценность.

Созданы методы, алгоритмы и программные средства, реализующие разработанные модели упруговязкопластического деформирования облучаемых материалов, позволяющие проводить численное моделирование кинетики НДС конструкций при квазистатических терморadiационных нагружениях.

Проведенные численные исследования использовались в ФГУП ОКБМ им. И.И. Африкантова для оценки напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов ЯЭУ, работающих в условиях термосиловых и радиационных воздействий.

Диссертационная работа выполнена при поддержке:

Программы поддержки ведущих научных школ России (грант НШ-6391.2006.8) и РФФИ (грант № 06-08-00360а).

Защищаемые положения работы.

1. Развитие моделей, описывающих поведение графита и нержавеющей сталей, учитывающих основные закономерности упруговязкопластического деформирования при термосиловых и радиационных воздействиях.

2. Методики и алгоритмы численного исследования кинетики НДС конструкций при терморadiационных воздействиях, созданные на основе разработанных моделей деформирования облучаемых материалов.

3. Программные средства, реализующие предложенные модели, методики и алгоритмы в составе создаваемого в НИИ механики вычислительного комплекса.

4. Результаты численного решения задач деформирования конкретных конструктивных элементов ЯЭУ, работающих в условиях терморadiационных воздействий.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 10-й Нижегородской сессии молодых ученых «Математические науки» (15-19 мая 2005 г., Саров), Четвертой молодежной научной школе-конференции «Лобачевские чтения-2005» (16-18 декабря 2005 г., Казань), XII международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» (13-17 февраля 2006 г., Ярополец), 11-й Нижегородской сессии молодых ученых «Математические науки» (22-25 мая 2006 г., Красный плес), IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (22-28 августа 2006 г., Нижний Новгород), Пятой молодежной научной школе-конференции «Лобачевские чтения-2006» (28 ноября - 2 декабря 2006 г., Казань), XIII международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (12-16 февраля 2007г., Ярополец).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-10].

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 113 страницах, содержит 28 рисунков и 2 таблицы. Список литературы состоит из 100 наименований.

Во введении обосновывается актуальность численного моделирования процессов упруговязкопластического деформирования конструкций, эксплуатирующихся при квазистатических терморadiационных воздействиях, и кратко излагается содержание работы.

В первой главе приводятся характерные особенности поведения нержавеющей стали и графитовых материалов в условиях нейтронного облучения, представлен обзор по имеющимся моделям, описывающим вязкопластическое поведение облучаемых материалов, моделям неупругого поведения анизотропных материалов и методикам численного моделирования процессов деформирования конструкций при терморadiационных воздействиях. В заключении главы сформулированы цели диссертационной работы.

В работах большого числа отечественных и зарубежных авторов, посвященных экспериментальному изучению поведения конструкционных материалов (нержавеющая сталь, графит) находящихся в условиях радиационного воздействия отмечается существенная зависимость их механических характеристик от уровня и взаимного влияния нейтронного облучения и температуры.

Особенностям поведения нержавеющей стали в условиях терморadiационных воздействий посвящены работы В.С. Ленского, Ш.Ш. Ибрагимова, А.А. Ильюшина, В.Н. Киселевского, С.Т. Конобеевского, И.С. Куликова, Г.С. Писаренко, В.А. Цыканова, А.М. Шалаева и др. Влияние нейтронного облучения на пластичность нержавеющей стали рассмотрены в работах И.Н. Воронина, С.Н. Вотина, А.И. Завьялова, А.И. Лапина, В.С. Ляшенко, В.А. Николаев и др. В этих работах отмечается, что под влиянием интенсивного нейтронного облучения в нержавеющей стали наблюдаются эффекты радиационного формоизменения, проявляющиеся в изменении линейных размеров, радиационная ползучесть, меняются характеристики прочности и пластичности. Отмечается также незначительная зависимость упругих характеристик от дозы облучения. В работах В.Н. Киселевского, И.С. Куликова, Б.Е. Тверковина рассмотрены вопросы терморadiационной ползучести.

Для графитовых материалов характерна значительная зависимость модулей упругости и коэффициента линейного температурного расширения от дозы облучения,

радиационное формоизменение и радиационная ползучесть (Ю.С. Виргильев, С.Е. Вяткин, В.В. Гончаров, Э.Н. Мармер, В.П. Соседов и др.). Способность графита к пластическому деформированию меньше чем у нержавеющей сталей, однако, характеристики пластичности сильно зависят от вида напряженного состояния материала (В.П. Соседов, А.О. Чернявский). В экспериментальных исследованиях также отмечается анизотропия графита, обусловленная технологией его изготовления.

Проблема моделирования необратимого деформирования материалов в радиационных потоках изучалась В.Н. Киселевским, Ю.И. Лихачевым, Б.З. Марголиным, В.Я. Пупко. В книге Ю.И. Лихачева и В.Я. Пупко строятся общие соотношения теории течения для облучаемых материалов на основе моделей, предложенных в работах И.А. Биргера, Прагера для необлученных материалов. Построению моделей, описывающих процессы ползучести при терморadiационных воздействиях, посвящены исследования В.Н. Киселевского, Ю.И. Лихачева, Б.З. Марголина, В.Я. Пупко и др. Авторы этих работ предлагают для облучаемого тела использовать основные закономерности ползучести, установленные на необлученных материалах Л.М. Качановым, Н.Н. Малининым, Ю.Н. Работновым.

Различные аспекты теоретических и экспериментальных методов оценки прочности конструкций ЯЭУ в условиях терморadiационных воздействий рассмотрены в работах В.Д. Балдина, В.Л. Решетина, О.К. Чугунова и др.

Численному моделированию кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов и узлов несущих конструкций из нержавеющей сталей и конструкционных графитов при терморadiационных воздействиях посвящены работы В.Н. Маневского, В.С. Рубцова, В.В. Сараева, Е.Н. Сеницына, А.А. Тутнова а также работы выполненные сотрудниками НИИМ ННГУ.

Во второй главе проводится построение математических моделей для описания процессов упруговязкопластического деформирования материалов, находящихся под воздействием термических и радиационных полей. Приводится формулировка структурно-феноменологической модели, учитывающей анизотропию механических свойств трансверсально-изотропного материала.

Несмотря на то что рассматриваемые в настоящей работе конструкционные материалы – нержавеющие стали и графиты представляют собой совершенно различные по своей природе материалы им присущи общие особенности поведения в условиях интенсивных терморadiационных воздействий: зависимость модулей упругости и коэффициента температурного расширения от уровня действующей температуры и нейтронного облучения, радиационное формоизменение и радиационная ползучесть.

Характерной особенностью поведения нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий является развитие эффектов радиационного формoизменения, радиационной ползучести, наиболее заметной в диапазоне температур $300 \leq T \leq 500^\circ\text{C}$, термической ползучести, скорость которой существенно возрастает при $T \geq 450^\circ\text{C}$ и увеличении интенсивности облучения, а также существенная зависимость характеристик пластичности материала от дозы облучения. Для описания процесса пластического деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях в работе предложена модель, в основу которой положена известная модель термопластичности с комбинированным упрочнением, в которую введена зависимость материальных функций модели от уровня нейтронного облучения. В модели предполагается, что в процессе развития пластических деформаций поверхность текучести меняет свои размеры (изотропное упрочнение, описываемое изменением радиуса поверхности текучести C_p) и смещается в пространстве девиаторов напряжений (кинематическое упрочнение, характеризующееся изменением тензора остаточных микронапряжений ρ_{ij}). Радиус поверхности текучести C_p представляется в виде функции $C_p(T, N, k_p)$, зависящей от температуры T , уровня облучения (флюенса) N и накопленной пластической деформации, характеризуемой параметром k_p (параметр Одквиста), где приращение длины траектории пластического деформирования $\Delta k_p = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p}$.

Компоненты тензора ρ_{ij} являются функционалом процесса пластического деформирования. Изменение компонент связано с изменением температуры и пластических деформаций соотношением:

$$\Delta \rho_{ij} = g_1 \Delta e_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \Delta k_p + g_T \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle, \quad (1)$$

где $g_1(T, N)$, $g_2(T, N)$, $g_T(T, N)$ - материальные функции, определяемые на основе проведения соответствующих экспериментов, $\langle \Delta T \rangle = \Delta T$ при $\Delta T > 0$, $\langle \Delta T \rangle = 0$ при $\Delta T < 0$. Изменения пластических деформаций определяются на основе ассоциированного закона течения:

$$\Delta e_{ij}^p = \lambda (\sigma'_{ij} - \rho_{ij}), \quad (2)$$

где λ - параметр, определяемый из условия прохождения текущей поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений.

Таким образом, для реализации рассматриваемой модели необходимо иметь следующие материальные функции: $C_p(T, N, k_p)$, $g_1(T, N)$, $g_2(T, N)$, $g_T(T, N)$.

Скорость радиационной ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}$ нержавеющей сталей зависит от уровня действующих напряжений σ'_{ij} , температуры T и накопленного флюенса нейтронов N . Это позволяет записать соотношения для приращений деформаций радиационной ползучести в следующем виде:

$$\Delta e_{ij}^r = \sigma'_{ij} B_r(T, N) \Delta N, \quad (3)$$

где $B_r(T, N)$ - материальная функция модели радиационной ползучести, которая может быть получена на основе проведения соответствующих экспериментов.

Для описания скорости термической ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}$ используется простейшая модель упрочнения, применяемая для описания ползучести материалов при термосиловых нагружениях, дополненная учетом влияния на процесс ползучести флюенса и флакса:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \sigma'_{ij} B_c(T, N, \mathcal{N}, k_c, \psi), \quad (4)$$

$$B_c(T, N, \mathcal{N}, k_c, \psi) = L_c(\psi, T) H(k_c, T) F_c(T, N, \mathcal{N}).$$

Здесь $L_c(\psi, T)$ - функция, характеризующая начальную скорость термической ползучести материала, отнесенную к единичному напряжению при уровне напряжений, определяемых параметром ψ :

$$\psi = \frac{\sqrt{\sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} - C_c(T)}{C_c(T)}, \quad (5)$$

где $C_c(T)$ - радиус поверхности ползучести. $H(k_c, T)$ - функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости ползучести. $F_c(T, N, \mathcal{N})$ - функция, учитывающая влияние накопленного флюенса и флакса на скорость термической ползучести при заданном уровне температур. В качестве параметра упрочнения k_c могут быть использованы:

- либо время ползучести $k_c = t$;

- либо длина траектории деформации ползучести $k_c = \int \left(\frac{2}{3} \Delta e_{ij}^c \Delta e_{ij}^c \right)^{1/2}$;

- либо энергия диссипации $k_c = \int \sigma'_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt$.

В отличие от нержавеющей сталей конструкционные графиты представляют собой малопластичный материал, свойства пластичности которого, могут существенно зависеть от текущего вида напряженно-деформированного состояния и обладающий возможной анизотропией свойств, обусловленной технологией его изготовления. При этом различные марки графитов могут быть либо изотропными, либо проявлять различную степень

анизотропии в направлении вытяжки графита. Для описания поведения изотропного графита предлагается использовать модель, аналогичную модели рассмотренной выше для нержавеющей сталей.

При формулировке модели пластичности в соотношения, описывающие начальную и последующие поверхности текучести, дополнительно введена зависимость материальных функций пластичности от текущего вида напряженно-деформированного состояния. В качестве параметра, определяющего вид напряженно-деформированного состояния, используется величина, определяемая через главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ в точке тела с помощью следующей зависимости:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}. \quad (6)$$

Величина p монотонно меняется от значения $p = -\sqrt{3}$ при всестороннем сжатии до $p = \sqrt{3}$ при всестороннем растяжении. При этом для определения значения любой материальной функции пластичности при заданном значении параметра p достаточно знать значения этой функции при двух фиксированных значениях p , например при $p = 1$, что соответствует одноосному растяжению, и при $p = -1$, что соответствует одноосному сжатию.

Радиационная ползучесть графита описывается на основе известных соотношений для одноосной радиационной ползучести рекомендуемых нормами минатома. Применительно к случаю сложного напряженного состояния эти соотношения позволяют записать для изменения деформаций радиационной ползучести Δe_{ij}^r следующие зависимости:

$$\Delta e_{ij}^r = \frac{3}{2} \sigma'_{ij} \Delta \Pi, \quad (7)$$

где σ'_{ij} - девиаторные составляющие тензора напряжений, соответствующие текущему уровню температуры T и нейтронному облучению N ;

$$\Pi = k \ln\left(1 + \frac{N}{q_1}\right) + b(N - q_2); \quad (8)$$

$k = k(T), b = b(T), q_1 = q_1(T), q_2 = q_2(T)$ - материальные функции, определяемые на основе опытных данных.

Приведенные зависимости показывают значительную аналогию в описании поведения нержавеющей сталей и конструкционных графитов. Это позволяет построить единую модель, описывающую связь между напряжениями и деформациями в нержавеющей сталях и графитах с учетом различных зависимостей описывающих частные эффекты

необратимого поведения материала. Естественно, что уравнения, описывающие эту связь оказываются существенно нелинейными. Значительная часть величин, входящих в эти уравнения являются функционалами, зависящими от предшествующей истории процесса деформирования, и может быть определена путем интегрирования для конкретных траекторий нагружения. Поэтому при анализе процесса деформирования рассматриваемых материалов необходимо последовательно проследивать изменения всех определяющих параметров в процессе нагружения, что требует формулировки уравнений, связывающих напряжения и деформации для их малых изменений на элементарном шаге изменения внешних воздействий.

В работе такая связь между изменениями напряжений и деформаций представлена в виде:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2\mathcal{G}(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}(\mathcal{K} - \frac{2}{3}\mathcal{G})(\Delta e_{ii} - \Delta d_{ii}) \quad (9)$$

$$\Delta d_{ij} = \Delta e_{ij}^n - \frac{\Delta G}{2\mathcal{G}} \bar{\sigma}'_{ij} + \delta_{ij} \left[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K}{3\mathcal{K}} \bar{\sigma} \right]$$

$$\Delta e_i^h = \Delta e_{ij}^p + \Delta e_{ij}^c + \Delta e_{ij}^r \quad (10)$$

$$\Delta G = \frac{\mathcal{G} - \bar{G}}{\bar{G}}, \Delta K = \frac{\mathcal{K} - \bar{K}}{\bar{K}}$$

$$\Delta(\alpha T) = \mathcal{G}\mathcal{F} - \bar{\alpha}\bar{T}, \Delta\beta = \mathcal{B} - \bar{\beta}$$

Здесь $\bar{G}, \mathcal{G}, \bar{K}, \mathcal{K}$ - модули сдвиговой и объемной деформации материала, отнесенные к уровням температур и нейтронного облучения исходного \bar{T}, \bar{N} и текущего \mathcal{T}, \mathcal{N} состояний, $\bar{\alpha}, \mathcal{G}$ - значения коэффициентов линейного температурного расширения в исходном и текущем состояниях соответственно, $\bar{\beta}, \mathcal{B}$ - величина деформаций радиационного формоизменений, соответствующие исходному \bar{T}, \bar{N} и текущему состоянию \mathcal{T}, \mathcal{N} . Введение дополнительных деформаций Δd_{ij} позволяет представить процесс решения нелинейной краевой задачи в виде последовательности линейных задач с постоянными коэффициентами и изменяющимися правыми частями, определяемыми текущими значениями Δd_{ij} . При фиксированных на текущих итерациях значениях этих величин, уравнения (9) сводятся к соотношениям упругости материала с начальными деформациями Δd_{ij} .

В соотношении (10) Δe_{ij}^p - приращения деформаций пластичности, определяемые для нержавеющей стали, соотношениями (1), (2), а для графита аналогичными выражениями с

учетом зависимости материальных функций модели от параметра напряженного деформированного состояния (6); Δe_{ij}^c - приращение деформаций термической ползучести нержавеющей описывается уравнениями (4), (5); Δe_{ij}^r - приращение деформаций радиационной ползучести, вычисляемые с помощью (3) в случае нержавеющей стали и (7), (8) в случае графитового материала.

Для описания анизотропии механических свойств графитового материала предлагается структурно-феноменологическая модель, позволяющая представить исходный трансверсально-изотропный материал в виде комплекса двух совместно работающих изотропных материалов: основного материала, рассматриваемого с позиций механики сплошной среды и материала волокон, ориентированных вдоль направления анизотропии исходного материала. При этом предполагается, что волокна воспринимают лишь осевые усилия растяжения-сжатия и деформируются совместно с основным материалом сплошной среды.

Изменение напряжений на шаге изменения внешних воздействий в основном материале аналогично соотношениям (9) и (10), а для материала волокон изменение напряжения в нем определяется следующим образом:

$$\Delta \sigma^A = \mathcal{E}^A (\Delta e^A - \Delta d^A), \quad (11)$$

где

$$\Delta d^A = \Delta e^{An} - \frac{\Delta E^A}{\mathcal{E}^A} \bar{\sigma}^A + \Delta(\alpha^A T) + \Delta \beta^A. \quad (12)$$

Здесь $\bar{\sigma}^A$ - значение напряжения в волокне в исходном состоянии, E^A - модуль Юнга волокон, Δe^{An} - изменение необратимой составляющей деформации материала волокон, которая может включать в себя деформацию пластичности, термической или радиационной ползучести;

$$\Delta(\alpha^A T) = \mathcal{C}^A \mathcal{T} - \bar{\alpha}^A \bar{T}, \quad \Delta \beta^A = \mathcal{B}^A - \bar{\beta}^A, \quad \Delta E^A = \frac{\mathcal{E}^A - \bar{E}^A}{\bar{E}^A}, \quad (13)$$

где $\bar{\alpha}^A, \mathcal{C}^A$ - коэффициент линейного температурного расширения материала волокон в исходном и текущем состоянии, $\bar{\beta}^A, \mathcal{B}^A$ - деформация радиационного формоизменения материала волокон в исходном и текущем состоянии.

При решении задач упруговязкопластического деформирования элементов конструкций с использованием предлагаемой структурно-феноменологической модели необходимо модифицировать матрицу коэффициентов упругости материала с учетом влияния анизотропии. В данном случае эта матрица будет представлять собой матрицу

коэффициентов упругости изотропного основного материала с дополнительным слагаемым, учитывающим влияние дополнительной жесткости волокон в направлении анизотропии.

Так как из эксперимента известны свойства графита в направлении анизотропии, и в плоскости перпендикулярной ему, то необходимо провести идентификацию механических свойств материалов структурно-феноменологической модели. Ниже индексу “0” соответствуют величины основного материала сплошной, “A” – материалу волокон “1” – свойствам графита в плоскости перпендикулярной направлению анизотропии, “3” – характеристикам графита в направлении волокон.

Будем полагать, что модуль E^A определяет дополнительную жесткость приведенного материала по отношению к основному, т.е. $E^A = E_3 - E^0$.

Предположим, что модуль сдвига основного материала G^0 равен модулю сдвига G_1 в поперечном направлении и рассматривая простейшие случаи одноосного напряженного состояния элементарного объема сплошной среды можно выразить механические свойства основного материала и материала волокон через известные свойства исходного материала в продольном и поперечном направлениях:

$$v^0 = v_3, E^0 = 2G_1(1 + v_3); \quad (14)$$

$$\alpha^A = \frac{E_3\alpha_3 - E^0\alpha^0}{E^A}, \beta^A = \frac{E_3\beta_3 - E^0\beta^0}{E^A}, e^{An} = \frac{E_3e_3^n - E^0e^{0n}}{E^A}; \quad (15)$$

$$\alpha^0 = \frac{\alpha_1 + v^0\alpha_3}{1 + v^0}, \beta^0 = \frac{\beta_1 + v^0\beta_3}{1 + v^0}. \quad (16)$$

Таким образом, термомеханическое поведение трансверсально-изотропного материала при радиационном воздействии можно представить как результат совместного деформирования двух изотропных материалов: основного материала и материала волокон, воспринимающего лишь усилия в направлении анизотропии, свойства которых могут быть определены на основе известных свойств исходного материала вдоль и поперек волокон.

В третьей главе приведены алгоритмы и методы численного моделирования процессов упруговязкопластического деформирования конструкций при квазистатических термосиловых и радиационных нагружениях.

Исследование кинетики НДС конструкций на основе представленных в предыдущей главе физических соотношений приводит к сложным нелинейным системам разрешающих уравнений. Решение таких нелинейных задач строится обычно на основе инкрементальной формулировки исходных уравнений с применением шаговых методов. Однако при численном решении задач на основе шаговых методов практически всегда происходит накопление ошибок, определяемых различными этапами огрубления реального физического

процесса. Эти ошибки связаны с погрешностью аппроксимации траекторий нагружения, неточностью вычисления величин изменения необратимых деформаций на шаге нагружения. Для снижения негативного влияния названных факторов при исследовании упруговязкопластического поведения конструкций в условиях традиционных термосиловых нагружений в работах С.А. Капустина предложена комбинированная шаговая схема, состоящая из шагов верхнего и нижнего уровня.

Шаги верхнего уровня, называемые этапами нагружения служат для внешней линеаризации задачи. Реальная траектория нагружения аппроксимируется ломаной в пространстве параметров внешних воздействий. При этом величина каждого отдельного линейного участка определяется из условия удовлетворительной аппроксимации траектории нагружения. Решение нелинейной краевой задачи на этапе нагружения осуществляется методом начальных напряжений путем итерационного равновесного состояния деформируемой конструкции. Для определения изменений необратимых деформаций в пределах этапа строится внутренняя шаговая схема, позволяющая с нужной степенью точности вычислить скорости изменения этих величин для внутренних точек траектории деформирования и проинтегрировать в пределах текущего этапа. На шагах нижнего уровня все вычисления строятся независимо для каждого физического узла конструкции без коррекции уравнений равновесия.

В настоящей работе предложена модификация упомянутой комбинированной схемы, учитывающая специфику терморadiационных нагружений. В частности, наряду с основными шагами верхнего уровня (этапами нагружения) введены промежуточные шаги (подэтапы нагружения), эквивалентные по своему функциональному назначению основным шагам, но протяженность которых определяется характером изменения функций, описывающих механическое поведение материала в процессе нейтронного облучения. Также переработан алгоритм внутренней шаговой схемы, используемой для вычисления необратимых составляющих деформаций текущего подэтапа нагружения.

При вычислении протяженности шага нижнего уровня δt в текущей точке траектории деформирования сначала производится независимое вычисление протяженности из условий пластичности δt^p , термической δt^c и радиационной δt^r ползучести, а затем выбирается наименьшая из протяженностей. Протяженность δt^p выбирается из условия, чтобы прогнозируемое изменение напряжений $\Delta \sigma'_{ij}$ на подэтапе нагружения не превышало заданной доли радиуса поверхности текучести C_p . Размер шага δt^c выбирается из условия, чтобы величина прогнозируемого изменения напряжений $\Delta \sigma'_{ij}$ на подэтапе не превышала заданной доли радиуса поверхности термической ползучести C_c . В связи с тем, что в модели

радиационной ползучести не вводилось понятия радиуса, то предлагается протяженность шага δt^r выбирать из условия, чтобы величина прогнозируемого изменения напряжений на этапе не превышала заданной доли радиуса поверхности текучести C_p . В случае структурно-феноменологической модели по описанному алгоритму определяется протяженность шагов для основного материала и материала волокон, после чего выбирается шаг с меньшей длительностью.

Процесс нагружения на внутреннем шаге представляется в виде двух актов: мгновенного изменения деформаций δe_{ij} , температуры δT и флюенса нейтронов δN , и последующей релаксацией напряжений за промежуток времени $\delta t = \Delta t \delta t$, где Δt – временная протяженность текущего подэтапа нагружения.

Для текущего шага на основе соответствующей модели пластичности описанной в предыдущей главе вычисляются изменения пластических деформаций δe_{ij}^p , корректируются текущий уровень напряжений и значения параметров, характеризующих историю пластического деформирования материала.

Изменение деформаций термической δe_{ij}^c и радиационной δe_{ij}^r ползучести на шаге вычисляется на основе схемы «предиктор-корректор», после чего корректируется текущий уровень напряжений и значений параметров, характеризующих историю деформирования материала при ползучести.

При организации внутренней шаговой схемы для структурно-феноменологической модели материала производится вычисление изменений деформаций пластичности δe_{ij}^{0p} , термической δe_{ij}^{0c} и радиационной δe_{ij}^{0r} ползучести, а так же параметров, характеризующих историю необратимого деформирования основного материала. Кроме того, производятся вычисления изменений деформации пластичности δe^{Ap} , термической δe^{Ac} и радиационной δe^{Ar} ползучести, а также параметров, характеризующих историю необратимого деформирования материала волокон.

Для решения краевой задачи на текущем подэтапе нагружения необходимо определить изменения полей перемещений Δu_i , деформаций Δe_{ij} и напряжений $\Delta \sigma_{ij}$ в конструкции при заданном изменении температуры ΔT , флюенса нейтронов ΔN , объемных сил ΔF_i , поверхностных сил ΔP_i заданных на части поверхности Σ_1 и граничных перемещений Δu_i^G на части поверхности Σ_2 , а также известных значениях параметров, характеризующих историю упруговязкопластического деформирования материала в

исходном состоянии. Искомые поля должны удовлетворять рассмотренным выше физическим соотношениям (9), (10), соотношениям Коши:

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2}(\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}), \quad (17)$$

уравнениям равновесия в объеме тела:

$$\Delta \sigma_{ij,j} + \Delta F_i = 0, \quad (18)$$

и на части поверхности Σ_1 :

$$\Delta \sigma_{ij} l_j - \Delta P_i = 0, \quad (19)$$

а также граничным условиям для перемещений на части поверхности Σ_2 : $\Delta u_i = \Delta u_i^G$. В уравнении (19) l_j - направляющие косинусы нормали к поверхности Σ_1 .

Разрешающую систему уравнений сформулированной задачи при фиксированных значениях параметров Δd_{ij} можно получить из условия стационарности функционала:

$$\delta \Pi = 0, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_V \Delta \sigma_{ij} (\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) dV - \int_V \Delta F_i \Delta u_i dV - \int_{\Sigma} \Delta P_i \Delta u_i d\Sigma + \\ & + \int_V (\bar{\sigma}_{ij} \Delta e_{ij} - \bar{F}_i \Delta u_i) dV - \int_{\Sigma} \bar{P}_i \Delta u_i d\Sigma. \end{aligned} \quad (21)$$

В этом функционале два последних слагаемых введены для коррекции глобальных условий равновесия конструкции.

Численное решение сформулированной задачи осуществляется на основе МКЭ с использованием изопараметрических двумерных и пространственных КЭ с сирендиповой квадратичной аппроксимацией поля перемещений.

В результате КЭ дискретизации исследуемых конструкций условие стационарности функционала (20) может быть сведено к системе алгебраических уравнений вида:

$$[H]\{\Delta U\} - \{\Delta R\} = 0, \quad (22)$$

где $[H]$ – матрица жесткости конструкции, определяемая упругими характеристиками материала при температуре \mathcal{F} и уровне нейтронного облучения \mathcal{N} , соответствующих текущему состоянию; $\{\Delta U\}$ – вектор изменений узловых перемещений конструкции для текущего шага нагружения; $\{\Delta R\}$ – вектор узловых сил, состоящий из постоянной на шаге составляющей $\{\Delta R'\}$ и переменной $\{\Delta R''\}$

$$\{\Delta R\} = \{\Delta R'\} + \{\Delta R''\}. \quad (23)$$

Постоянная составляющая $\{\Delta R'\}$ определяются совокупностью внешних воздействий, заданных на текущем шаге нагружения. Переменная $\{\Delta R''\}$ включает в себя нелинейные члены, зависящие от решения задачи, и определяется текущими значениями параметров Δd_{ij} , меняющихся в процессе последовательных приближений.

При решении задач на этапе нагружения матрица $[H]$ и вектор $\{\Delta R'\}$ формируются в начале шага и не меняются в процессе последовательных приближений. При этом решение задачи (22) представляется в виде:

$$\{\Delta U\} = \{\Delta U'\} + \{\Delta u\}, \quad (24)$$

где

$$\{\Delta U'\} = [H]^{-1}\{\Delta R'\}, \quad (25)$$

$\{\Delta u\}$ – нелинейная часть вектора решения, зависящая от вектора $\{\Delta R''\}$. Таким образом, согласно принятой схеме линеаризации, решение нелинейной задачи на шаге нагружения сводится к однократному нахождению вектора линейной части $\{\Delta U'\}$ и последовательному уточнению нелинейной части $\{\Delta u\}$ в процессе последовательных приближений

$$\{\Delta u\} = [H]^{-1}\{\Delta R''\}. \quad (26)$$

Представленные выше методические положения реализованы в составе программных средств созданного в НИИМ ННГУ вычислительного комплекса УПАКС.

В четвертой главе представлены результаты верификации разработанных моделей, алгоритмов и программных средств, численного исследования влияния эффектов, возникающих при нейтронном облучении, на характер деформирования графитовых материалов и нержавеющей стали. Проведены расчеты процессов деформирования изделий, находящихся в условиях квазистатических термосиловых и радиационных воздействий.

Верификация разработанных средств для стали X18H9 проводилась путем решения ряда тестовых задач, в которых сравнивается численное решение с аналитическими зависимостями, описывающими поведение материала, полученными на основе экспериментальных данных.

Во всех тестовых задачах рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) в прямолинейном призматическом стержне, находящемся в условиях равномерно распределенных по объему температурных и нейтронных полей. Один из торцов стержня закреплен от осевых перемещений, а другой находится под действием равномерно распределенных осевых поверхностных сил. Ввиду однородности распределения НДС по объему стержня численное решение задач строилось для одного пространственного КЭ в виде кубика с ребрами, ориентированными вдоль основных направлений стержня, размером

$l=10$ мм. Процесс нагружения стержня осуществлялся за два этапа. На первом этапе осуществлялся мгновенный нагрев стержня до $T=500^{\circ}\text{C}$ и растяжение нагрузкой интенсивностью P . На втором – производилось облучение потоками нейтронов до значения флюенса N за промежуток времени t .

В первой задаче принималось $N = 9.7 \cdot 10^{22}$ н/см², $P = 250$ МПа, $t = 400000$ часов. При этом предполагалось, что в материале отсутствуют деформации пластичности и термической ползучести, но могут развиваться деформации радиационной ползучести. На рис. 1,а приведены графики продольной деформации кубика в зависимости от уровня облучения. Значению $N = 0$ соответствует деформация, полученная на конец первого этапа нагружения. Во второй задаче принималось $N = 3.88 \cdot 10^{20}$ н/см², $P = 250$ МПа, а временная протяженность $t = 1600$ часов (такие условия нагружения выбраны из условия окончания к концу второго этапа нагружения первой стадии термической ползучести). При этом предполагалось, что в материале отсутствуют деформации пластичности и радиационной ползучести, но могут развиваться деформации термической ползучести. На рис. 1,б приведены графики деформации термической ползучести в продольном направлении кубика в зависимости от времени. Аналитические решения показаны сплошной линией, а численные отмечены точками.

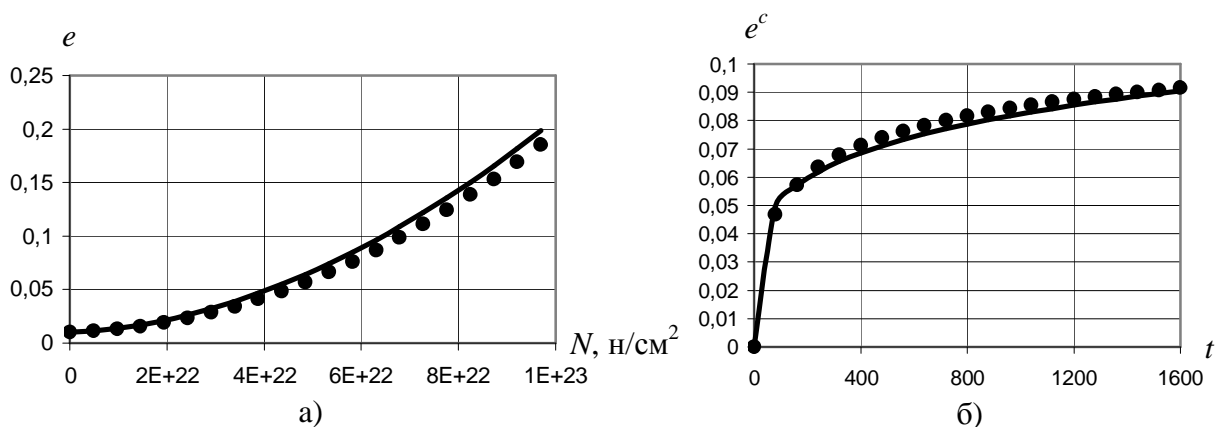


Рис. 1

Тестовым примером, подтверждающим работоспособность разработанной методики для графитовых материалов, послужила задача о расчете напряженно-деформированного состояния толстостенной сферы находящейся под действием температурного и радиационного полей. Результаты полученного численного решения хорошо согласуются с известным аналитическим.

Адекватность структурно-феноменологической модели при описании эффектов анизотропии материала подтверждается сравнением результатов полученных по разработанной методике с результатами, полученными с помощью программного комплекса

ANSYS. В первом примере производится расчет изгиба консольной балки, а во втором рассматривается упругое деформирование фрагмента графитового блока кладки реактора при действии температурного поля. В обоих примерах можно отметить очень хорошее совпадение получаемых результатов.

Для оценки влияния основных эффектов, влияющих на поведение материалов в условиях терморadiационных воздействий, рассмотрен пример расчета изменения напряжений в стержне с квадратным сечением, который закреплен по торцам, от продольных смещений и находится под действием равномерно распределенных по объему температуры и потока нейтронов. Ввиду того, что в процессе нагружения в стержне реализуется однородное напряженное состояние, решение задачи строилось с использованием одного пространственного 20-узлового КЭ с квадратичным законом распределения функций.

В случае графитового материала стержень находится под действием температуры $T = (20 - 750)^\circ\text{C}$ и потока нейтронов $N = (0 - 1 \cdot 10^{22})\text{н/см}^2$, меняющихся во времени пропорционально параметру нагружения t . Получено решение задачи для двух вариантов терморadiационного нагружения стержня. В первом варианте стержень сначала нагревался от $T = 20^\circ\text{C}$ до $T = 750^\circ\text{C}$ ($t = 1 - 10$), а затем подвергался нейтронному облучению $t = 11 - 20$. Во втором – температурное и нейтронное нагружение осуществлялось одновременно пропорционально параметру t . На рис. 2,а приведены графики изменения осевых напряжений в стержне без учета радиационной ползучести (кривая 1) и с учетом последней (кривая 2). На рис. 2,б приведены аналогичные графики для второго варианта нагружения.

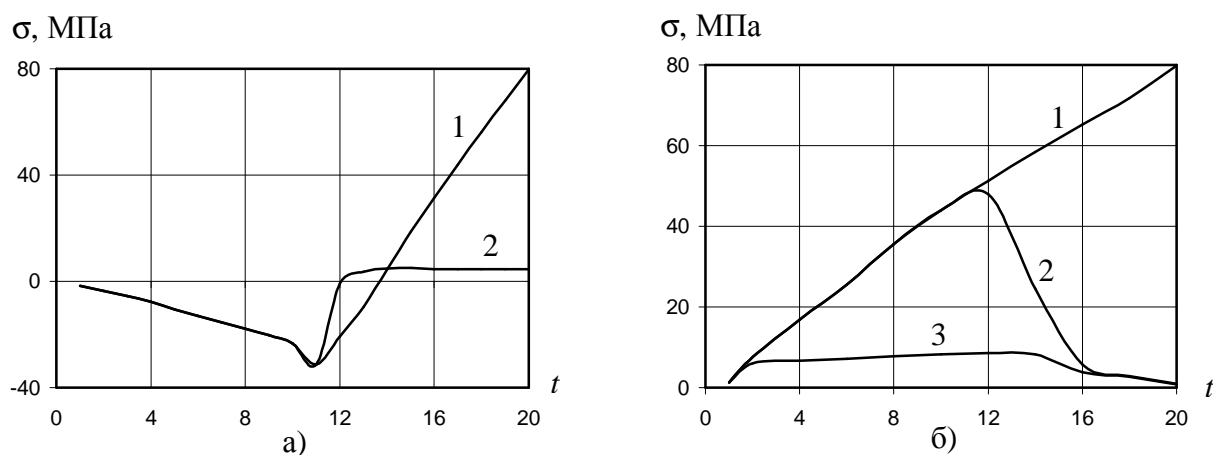


Рис. 2

Анализ результатов решения первого варианта задачи показал, что при действии нейтронного потока происходит усадка материала, приводящая к возникновению

растягивающих напряжений из-за ограничения осевых смещений. Растягивающие напряжения достигают максимального значения при $t = 20$. При этом диапазон изменения напряжений за счет радиационного формоизменения превышает температурные напряжения более чем в 4 раза. Сравнение графиков 1 и 2 на рис. 1,б также показывает, что с ростом облучения материала графита наряду с процессом формоизменения все большую роль начинает играть радиационная ползучесть, приводящая к значительному снижению напряжений на завершающей стадии нагружения. При синхронном изменении температуры и облучения в случае отсутствия эффектов пластичности и радиационной ползучести (кривая 1) напряжения монотонно увеличиваются до максимального значения при $t = 20$. При учете радиационной ползучести без пластичности (кривая 2) после $t = 12$ (уровень облучения $N = 6 \cdot 10^{21} \text{ н/см}^2$) начинают сказываться эффекты радиационной ползучести и уровень напряжений резко снижается. При дополнительном учете эффектов пластичности (кривая 3) сначала наблюдается замедление роста напряжений при превышении ими предела текучести (условный предел текучести материала при растяжении принят равным $\sigma_T = 6.0 \text{ МПа}$), а затем после $t = 12$ напряжения начинают снижаться за счет эффектов радиационной ползучести.

В случае нержавеющей стали X18H9, стержень находится под действием температуры и потока нейтронов, меняющихся согласно следующей последовательности:

- начальное состояние - $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $N_0 = 0 \text{ н/см}^2$;
- промежуточное состояние - $T_{20} = 500^\circ\text{C}$, $N_{20} = 0 \text{ н/см}^2$;
- конечное состояние - $T_{40} = 500^\circ\text{C}$, $N_{40} = 9.7 \cdot 10^{22} \text{ н/см}^2$.

Таким образом, процесс нагружения состоял из двух этапов (нагрев и последующее облучение), при этом временная протяженность температурного этапа нагружения принималась равная 10 часам, а этапа с радиационным воздействием 400000 часам. Каждый этап нагружения разбивался на 20 подэтапов.

Рассмотрено четыре варианта задачи с различными предположениями о свойствах материала:

1. Учитывается радиационное формоизменение.
2. Дополнительно к варианту 1 учитывается пластичность.
3. Дополнительно к варианту 1 учитывается радиационная ползучесть.
4. Полный вариант – учитывается радиационное формоизменение, пластичность, радиационная и термическая ползучесть.

На рис. 3 представлены зависимости осевых напряжений от номера подэтапа нагружения для всех рассмотренных вариантов задачи, где цифрами отмечены соответствующие варианты.

Результаты решения первого варианта задачи показывают, что по мере повышения температуры в стержне возникают сжимающие осевые напряжения. При появлении нейтронного облучения дальнейшего повышения напряжений не происходит, в связи с высоким уровнем сжимающих напряжений,

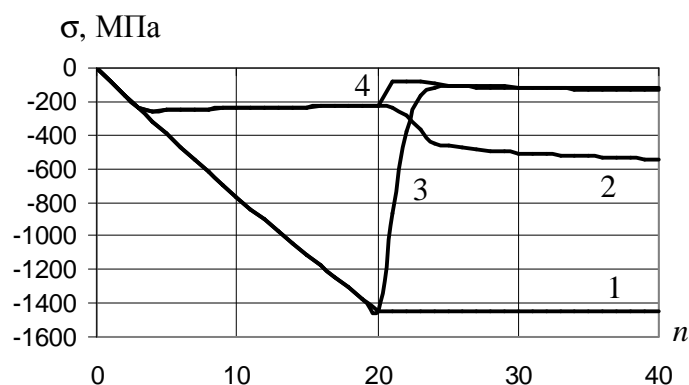


Рис. 3

при котором скорость радиационного формоизменения равна нулю.

При учете в материале стержня пластических деформаций, начиная с третьего подэтапа нагружения до момента начала облучения, происходит стабилизация уровня напряжений. С ростом дозы облучения напряжения несколько увеличиваются за счет формоизменения и повышения предела текучести материала.

Рассматривая результаты решения третьего варианта задачи можно отметить существенную релаксацию напряжений, вызванную учетом в расчетах деформаций радиационной ползучести.

Результаты решения четвертого варианта задачи также демонстрируют существенную релаксацию напряжений в стержне. Сначала за счет пластических деформаций, а затем за счет деформаций радиационной и термической ползучести.

На основе приведенных результатов можно сделать вывод, что влияние каждого эффекта возникающего при нейтронном облучении на процесс деформирования облучаемой стали X18Н9, является существенным.

С целью иллюстрации работоспособности разработанной методики рассмотрен пример расчета напряженно-деформированного состояния фрагмента графитового блока кладки реактора, при квазистатическом изменении температурного и нейтронного полей во времени и по объему блока по заданному закону. Блок представляет собой прямоугольный параллелепипед высотой $h = 600$ мм, имеющий квадратное поперечное сечение размером 200×200 мм² и сквозное круглое отверстие диаметром 66 мм, в поперечном направлении смещенное вдоль оси z на 10 мм. Температурные и радиационные поля в блоке постоянны вдоль оси y и меняются в поперечном сечении по законам, заданным для восьми дискретных моментов времени t_i ($t_i = 2, 6, 10, 13.8, 17, 20.5, 24, 27$ лет). Закон изменения

флюенса в радиальном направлении принимается в виде: $N(r) = F_i \cdot e^{-0.0075(r-r_0)}$, где r_0 - радиус отверстия в блоке, F_i - значение флюенса на поверхности отверстия. Температура увеличивается в радиальном направлении по логарифмическому закону. На рис.4,а приведена геометрия и КЭ дискретизация блока (1/4 симметричная часть).

В результате решения задачи были получены значения полей перемещений, деформаций и напряжений в блоке для всех указанных выше моментов времени. Так на рис. 4, б показана деформированная конфигурация рассматриваемого фрагмента блока при увеличении масштаба перемещений в 30 раз. Анализ результатов расчета также выявил значительную неравномерность изменения напряжений в блоке во времени. Для иллюстрации этого эффекта на рис.5 приведены графики изменения напряжений во времени для одной из наиболее нагруженных точек блока (точка С).

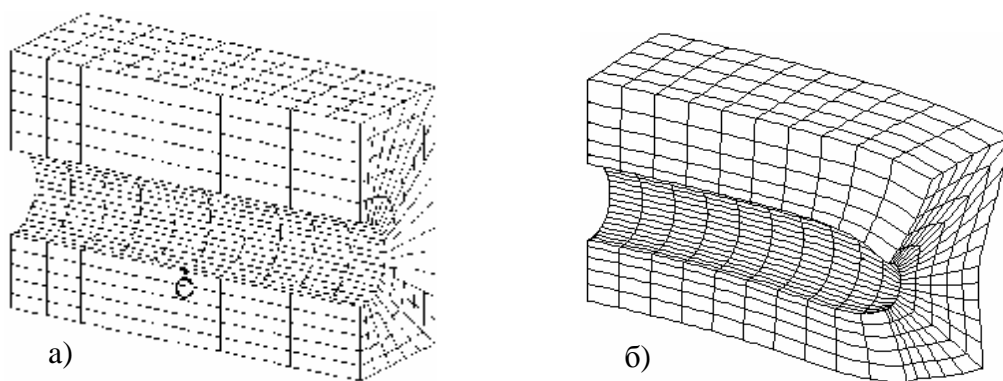


Рис. 4

Цифрами на рисунке обозначены нормальные напряжения вдоль осей x (цифра 1), y (цифра 2), z (цифра 3), а также интенсивность напряжений (цифра 4). Из графиков видно, что наибольших значений напряжения в блоке достигают к моменту времени $t = 12$ лет,

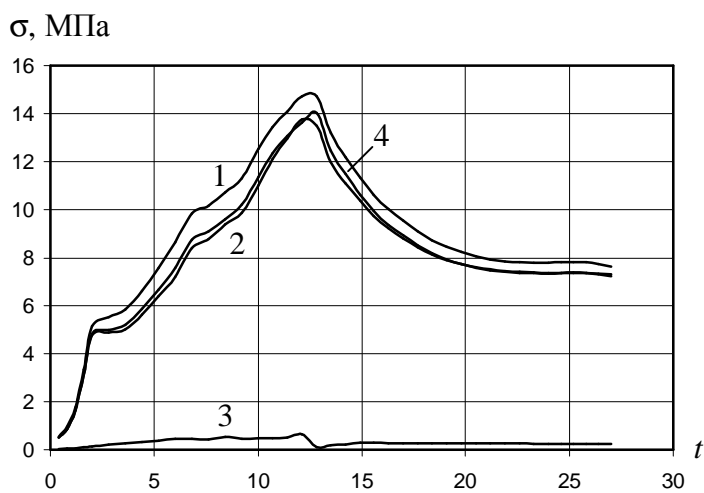


Рис. 5

после чего их величины снижаются. Можно предположить, что такой эффект связан с увеличением влияния радиационной ползучести, обусловленным увеличением нейтронного облучения.

Для иллюстрации работоспособности разработанных средств, исследования поведения конструкций из нержавеющей стали в условиях терморadiационных воздействий была рассмотрена задача расчета напряженно-деформированного состояния оболочки, находящейся в условиях радиационно-термических полей.

Также было проведено численное исследование упруговязкопластического деформирования внутренней обечайки отражателя нейтронов, выполненной из нержавеющей стали X18H9, эксплуатирующейся длительное время под действием пространственных и радиационных полей. Конструкция имеет следующие геометрические размеры: диаметр 3385 мм, высота 1800 мм и толщина стенки 50 мм. Процесс нагружения обечайки представляется в виде последовательности двух этапов нагружения: температурного этапа и этапа, соответствующего последующему нейтронному облучению.

Результаты проведенного исследования показывают, что к концу температурного этапа нагружения уровень напряжений в обечайке невелик по сравнению с напряжениями при последующем нейтронном облучении. Максимальные значения интенсивности напряжений к концу температурного этапа достигают величины $\sigma_{и} = 201$ МПа в районе нижнего фланца. При последующем нейтронном облучении зона максимальных напряжений перемещается в область соединения обечайки с трапециевидной стенкой, где интенсивность напряжений достигает величин $\sigma_{и} = 318$ МПа на момент времени $t = 25$ лет и $\sigma_{и} = 386$ МПа при $t = 45$ лет (конечный момент нагружения). Зона максимальных прогибов обечайки для $t = 25$ лет и $t = 45$ лет располагается в районе максимального флюенса. В этом же районе наблюдается значительное утолщение обечайки.

Разработанная структурно-феноменологическая модель позволила провести численное моделирование процесса деформирования фрагмента графитового блока кладки реактора с учетом анизотропии свойств материала. Геометрические размеры блока аналогичны таковым в задаче рассмотренной выше. В расчетах учитывается зависимость модулей упругости и коэффициента температурного расширения от уровня нейтронного облучения, эффекты радиационного формоизменения и радиационной ползучести. В таблице 1. приведены значения перемещений в точке А (см. рис. 6), полученные на основе разработанной методики, и с использованием допущения об

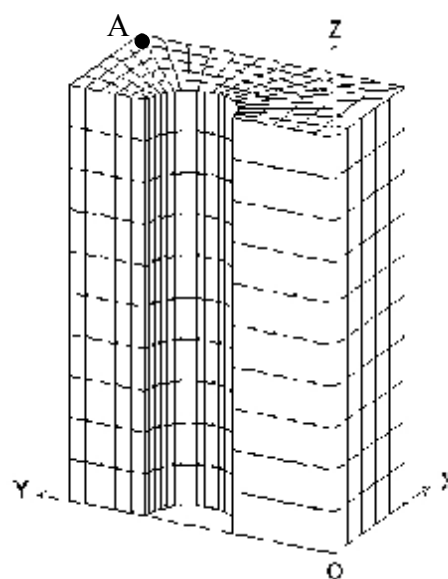


Рис. 6

изотропии механических характеристик материала графита, которые принимались как среднее арифметическое между значениями в продольном и поперечном направлениях.

Таблица 1

	Изотропный вариант	Анизотропный вариант
U_x (мм)	-0.884	0.441
U_y (мм)	-1.881	1.129
U_z (мм)	-3.008	-6.817

Видно существенное различие в полученных результатах, что объясняется значительной разницей деформаций радиационного формоизменения материала графита в продольном и поперечном направлениях при высоких значениях флюенса.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Развита модель, описывающая основные закономерности поведения нержавеющей стали и графитовых материалов в условиях термосиловых и радиационных воздействий с учетом зависимости их механических и теплофизических характеристик от уровней действующих температур и нейтронного облучения, эффектов радиационного формоизменения и терморadiационной ползучести.

2. Сформулирован вариант структурно-феноменологической модели трансверсально-изотропных материалов, учитывающей анизотропию механических свойств (модулей упругости, коэффициента температурного расширения, радиационного формоизменения, характеристик пластичности и терморadiационной ползучести) искусственных конструкционных графитов.

3. На основе предложенных моделей созданы методы, алгоритмы и программные средства, позволяющие проводить численное исследование упруговязкопластических процессов деформирования изделий из нержавеющей стали и конструкционных графитов, работающих в условиях сложных квазистатических силовых и терморadiационных воздействий.

4. Проведены верификация разработанных средств и численные исследования, иллюстрирующие влияние эффектов радиационного формоизменения, пластичности, термической и радиационной ползучести, проявляющихся при терморadiационных нагружениях облучаемых материалов, на закономерности процессов их деформирования.

5. Решен ряд задач исследования НДС элементов и узлов конструкций из нержавеющей стали и конструкционных графитов, эксплуатирующихся в условиях термосиловых и радиационных воздействий, близких к аналогичным условиям работы реальных ЯЭУ:

- рассмотрена задача расчета НДС фрагмента графитового блока кладки реактора при квазистатическом изменении температурного и нейтронного полей во времени и по объему блока;

- проведено численное моделирование упруговязкопластического деформирования цилиндрической оболочки и обечайки отражателя нейтронов из нержавеющей стали, находящихся в условиях пространственных радиационно-термических полей;

- выполнено численное моделирование процесса деформирования фрагмента графитового блока кладки реактора с учетом анизотропии механических свойств материала.

Основное содержание и результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Горохов, В.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния изделий из графита при терморadiационных воздействиях / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов, А.В. Рябцов // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород. – 2004. – Вып. 66. – С. 51 – 61.

2. Горохов, В.А. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, О.Ю. Виленский, В.Б. Кайдалов // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород. – 2005. – Вып. 67. – С. 26 – 36.

3. Горохов, В.А. Численное моделирование поведения конструкций из трансверсально-изотропных материалов в условиях квазистатических силовых и терморadiационных воздействий / С.А. Капустин, В.А. Горохов, Ю.А. Чурилов, Ю.Г. Слепнев // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород.- 2006. – Вып. 68. – С. 53 – 60.

Остальные публикации

4. Горохов, В.А. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкция ядерной техники при комбинированных воздействиях физических полей высоких параметров / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.Г. Слепнев, Ю.А. Чурилов // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Нижний Новгород, 22 – 28 августа 2006 г. – Т. 3. – С. 74.

5. Горохов, В.А. Методика численного исследования на основе МКЭ процессов деформирования графитовых изделий при терморadiационных воздействиях / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов // Тезисы докладов XII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Ярополец, 13 – 17 февраля 2006 г. – С.103 – 104.

6. Горохов, В.А. Численное исследование упруговязкопластического поведения конструкций в условиях квазистатических терморadiационных воздействий с учетом влияния нейтронного облучения на свойства материала / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.Г. Ю.А. Чурилов // Тезисы докладов XIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Ярополец, 12 – 16 февраля 2007 г. – С.76 – 77.

7. Горохов, В.А. Численное исследование поведения конструкций из нержавеющей стали в условиях квазистатических терморadiационных воздействий / В.А. Горохов // Материалы Четвертой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения-2005», Казань, 16 – 18 декабря 2005 г. – С.50 – 51.

8. Горохов, В.А. Численное моделирование упруговязкопластического деформирования элементов конструкций ядерной техники / В. А. Горохов, С. А. Капустин, Ю. А. Чурилов // Материалы Пятой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения-2006», Казань, 28 ноября – 2 декабря 2006 г. – С. 65 – 66.

9. Горохов, В.А. Численное моделирование процессов деформирования графитовых конструкций при терморadiационных воздействиях / В.А. Горохов // Тезисы докладов 10-й Нижегородской сессии молодых ученых «Математические науки», Саров, 15 – 19 мая 2005 г. – С. 17 – 18.

10. Горохов, В.А. Решение задач упруговязкопластического деформирования элементов конструкций выполненных из трансверсально-изотропных материалов находящихся в условиях терморadiационных воздействий / В.А. Горохов // Материалы докладов 11-й Нижегородской сессии молодых ученых «Математические науки», Красный плес, 22 – 25 мая 2006 г. – С. 44.