

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И КОМПОНЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ

к. ф.-м. н. **Ширвель П.И.**, маг. **Сергей А.А.**, асп. **Чигарев В.А.**

Белорусский национальный технический университет, Минск

Характерной особенностью, отличающей условия эксплуатации любых ЯЭУ (предназначенных как для атомных электростанций и других энергетических систем выработки высокопотенциального тепла, так и для космических объектов, транспортных средств или двигательных систем на основе использования ядерной энергии), является работа в течение длительного срока в условиях повышенных температур и интенсивных радиационных облучений. Это приводит к дополнительным эффектам поведения облученного материала, которые оказывают определяющее влияние на процессы деформирования в целом [1–3]. Учет этих изменений крайне важен, так как непредвиденное поведение элементов конструкций и компонентов оборудования в зоне высокой радиации может привести к катастрофе [4, 5]. В этой связи возникает необходимость в более адекватном описании и имитационном моделировании ответственных элементов конструкций, подверженных сложным техногенным воздействиям. Вообще говоря, современная постановка задач прогнозирования ресурса и продления эксплуатации компонентов оборудования, внедрения новых материалов в элементы конструкции требует исследования процесса деформирования при всевозможных условиях, как правило, экстремальной эксплуатации, включая аварийные ситуации, вплоть до разрушения. Создание механико-математических моделей и методов расчета, в полной мере удовлетворяющих этим зачастую противоречивым требованиям, является одним из приоритетных направлений современных научных исследований. Данная проблематика соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Беларуси. Именно поэтому, озвученная тема, как и вообще тематика научных работ, посвященных моделированию процессов деформирования твердых тел в сложных условиях немеханического нагружения, актуальна как в теоретическом, так и в прикладном плане, что подтверждается ростом числа публикаций в отечественной и зарубежной литературе (по данным индекса цитируемости систем научного поиска Web of Science, Scopus и SciVerse Science Direct). К примеру, вопросам моделирования процессов деформирования твердых тел, эксплуатирующихся в условиях термосиловых и радиационных воздействий, уделено внимание в определенном числе работ. Однако при детальном анализе с позиций механики деформируемого твердого тела выясняется, что в них не в полной мере учитываются особенности поведения материалов в терморadiационных потоках. Как следствие, такие решения в большинстве своем отражают интересы и возможности авторов и не исчерпывают поставленную задачу в целом. В тоже время, механическое поведение элементов конструкций и компонентов оборудования ЯЭУ зависит от большого числа различных явлений, где существует целый комплекс взаимосвязанных физических, химических и механических процессов, причем лишь некоторые из них описаны теоретически. Как правило, столь жесткие условия эксплуатации сопровождаются необратимыми изменениями теплофизических, механических и прочностных характеристик используемых материалов [2]. Кроме того, здесь используются предельные возможности современных конструкционных и топливных (делящихся) материалов [5]. Следует отметить, что не последнюю роль в этом вопросе играет и корректное определение напряженного и деформированного состояния элементов конструкций с последующей оценкой их работоспособности на основе того или иного критерия [6]. Без преувеличения, повышенные требования, предъявляемые к прочности и надежности таких элементов, могут быть обеспечены лишь при наличии достоверной информации об их НДС. Последующий расчет на прочность и оценка долговечности основаны на анализе НДС с учетом особенностей свойств и поведения материала в реальных условиях эксплуатации. Вообще говоря, общая особенность эксплуатации почти всех элементов конструкций атомной техники заключается в том, что прочностная надежность ответственных конструктивных элементов во многом определяется уровнем и характером распределения возникающих в них внутренних напряжений [4, 6]. Поэтому обеспечение безопасности эксплуатации и продление ресурса оборудования энергетических установок тесно связано с анализом НДС наиболее напряженных элементов конструкций. В связи с этим и возрастает роль как теплофизических, так и прочностных расчетов и анализа НДС компонентов ЯЭУ, повышаются требования к их точности.

Таким образом, проблема расчета и анализа напряженного и деформированного состояния конструктивных элементов ЯЭУ является актуальной в первую очередь с точки зрения прогнозирования ресурса и безопасности работы всей АЭС.

На сегодня решению задач определения НДС конструктивных элементов в условиях термо-радиационных воздействий посвящено много работ [4–6]. В нашей мы занялись разработкой современных моделей расчета НДС элементов конструкций и компонентов оборудования цилиндрической геометрии, основанных на достижениях механики деформированного твердого тела, общих закономерностях деформирования и разрушения материалов в терморadiационных потоках и компьютерных технологий для расчета НДС конструкций, находящихся в условиях сложного нагружения с учетом внутриреакторных условий АЭС. Конкретнее, ставилась задача создания общей механико-математической модели деформирования физически нелинейных твердых тел с учетом интенсивного облучения потоками частиц большой энергии в условиях неоднородного термосилового воздействия и изменения свойств материалов, а также моделирование НДС при ползучести и облучении длинных цилиндрических тел в стационарном, квазистационарном и нестационарном приближениях, с учетом имеющихся в научной и справочной литературе исходных данных. Это направление исследований последнее время стремительно развивается (особенно за рубежом), что связано как с быстрым ростом вычислительных мощностей, так и с потребностью в обобщении разнородных данных из радиационного материаловедения и механики сплошных сред, в их формализации на уровне комплексных математических моделей. Для проведения исследований на разработанных моделях, реализован оригинальный алгоритм расчета НДС и компьютерная программа решения задач в условиях облучения. Здесь следует отметить, что наиболее удобной формой представления вычислительного алгоритма реализации полученных при выполнении проекта механико-математических моделей деформирования и разрушения элементов конструкций ЯЭУ, а также построенных численных схем определения НДС твердых тел при термомеханических и радиационных воздействиях является стандартная программа, реализованная в виде процедур на современном алгоритмическом языке C++ или C# [7, 8]. Система языка C#/C++ обеспечивает пользователям удобную интегрированную операционную среду, а также существенно облегчает профессиональное программирование, в котором определяющими параметрами являются скорость компиляции, высокое качество генерируемого кода и относительно малая потребляемость оперативной памяти. Тем самым, использование алгоритмического языка в некоторой степени снижает барьер между профессиональным программистом и математиком-механиком. От которого требуются лишь минимальные знания основ программирования для того, чтобы организовать требуемую программу расчета с использованием отдельных процедур. Общая структурная блок-схема программы моделирования НДС приведена на рисунке 1.

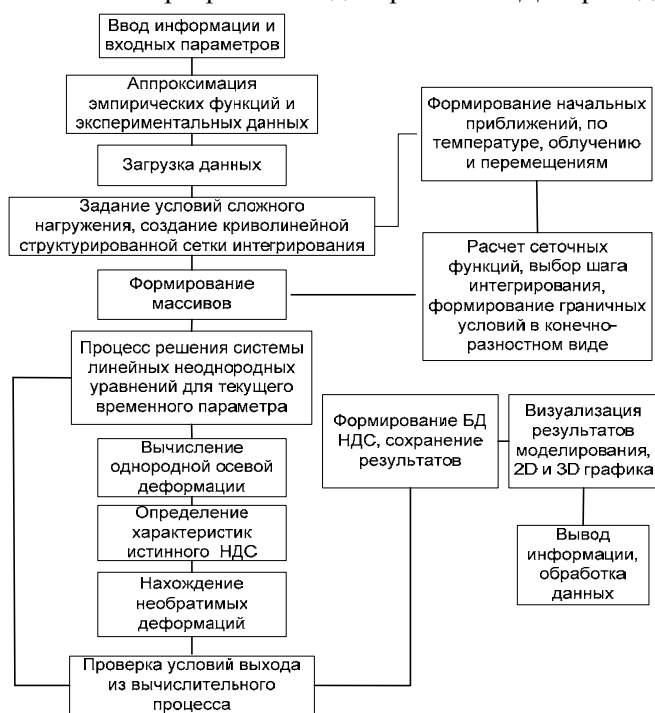


Рисунок 1 – Упрощенная структурная схема программы

В функциональное назначение программы входит загрузка данных и входных параметров, аппроксимация эмпирических функций и экспериментальных данных, импорт геометрии расчетной области, задание модели среды, расстановка начальных и граничных условий, генерация криволинейной структурированной расчетной сетки, задание критериев сходимости и т.д. После этого управление передается решателю, выполненного на основе разработанного численного метода, который начинает процесс счета с учетом алгоритма определения необратимых деформаций.

В ходе выполнения работы оказалось, что учет НДС, который предполагалось провести существующими методами, по отношению к рассматриваемым нелинейным моделям ползучести и радиационного распухания является весьма сложной задачей, и пришлось разработать гибридный численный метод решения данного класса

задач. К настоящему моменту метод был протестирован как на обыкновенных дифференциальных уравнениях, так и на уравнениях в частных производных. Следует отметить также, что решение может осуществляться как для бесконечно длинных цилиндрических тел, так и с учетом однородной осевой (обобщенной плоской) деформации. При достижении требуемого значения критерия сходимости вычислительный процесс может быть остановлен. В дальнейшем результаты доступны для их обработки, формирования базы данных, сохранения и визуализации. Отметим, что такое построение программы позволяет проводить виртуальное моделирование и одновременно, визуализируя значение характеристик НДС, анализировать получаемые результаты, менять условия нагружения, а также параметры механико-математической модели. В целом, указанная структурная схема представляет собой совокупность предписаний, обеспечивающих выполнение операций и процедур, необходимых для получения решений, позволяющих исследовать процессы функционирования рассматриваемой механической системы. Все дальнейшие вычислительные процедуры производились на базе современных ПЭВМ на языке C# с использованием программной среды Microsoft Visual Studio 2011 Express [9, 10].

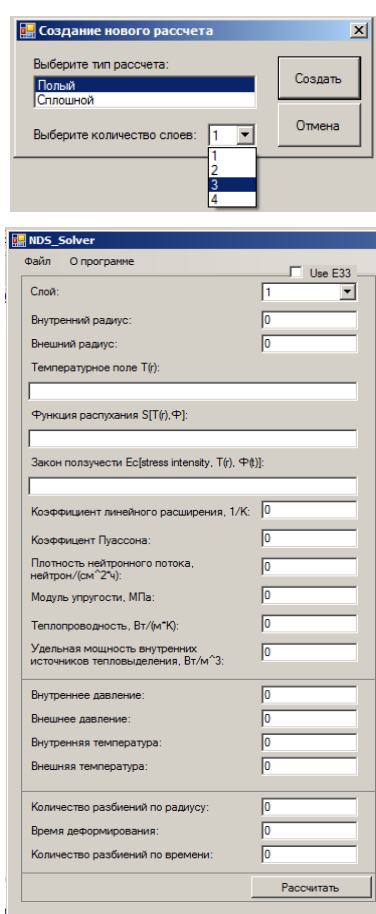


Рисунок 3.

В результате, на основании математических моделей и вычислительных процедур, полученных на отдельных этапах исследования, разработан пакет программ для современных персональных компьютеров. Все программы являются оригинальными. Разработанные отдельные коды для удобства проведения виртуальных (численных) экспериментов и дальнейшей обработки получаемых результатов были сведены в единый программный комплекс. Программный комплекс составляет множество основных файлов функционально связанных между собой, которые объединены в один управляющий файл NDS_Solver.exe. Работа всех кодов комплекса осуществляется последовательным выполнением программных файлов, каждый из которых выполняет определенную задачу и управляет работой комплекса, например, в зависимости от требования пользователя формирует исходную информацию о материалах, из которых изготовлены исследуемые тела, их геометрии и форме; подготавливает данные по физико-механическим и теплофизическим свойствам (конкретные зависимости, характеризующие свойства материалов вводятся или загружаются в начале работы), а также о механических нагрузках и терморadiационных воздействиях; производит графическое представление результатов моделирования (все найденные характеристики НДС) в виде цветных двумерных и трехмерных графиков (рисунок 2); содержит информацию по базе данных, относящуюся к материалам, которые будут использованы при расчетах, проводит расчет НДС однослойных или многослойных цилиндрических тел, формирует информацию в виде БД; организует управление программой, сохранение и загрузку данных и др. Расчет производится в диалоговом режиме (рисунок 3 и 4).

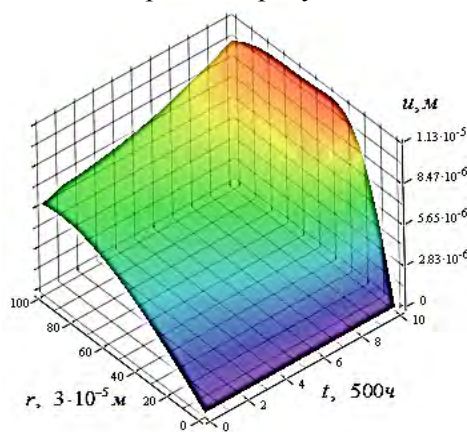
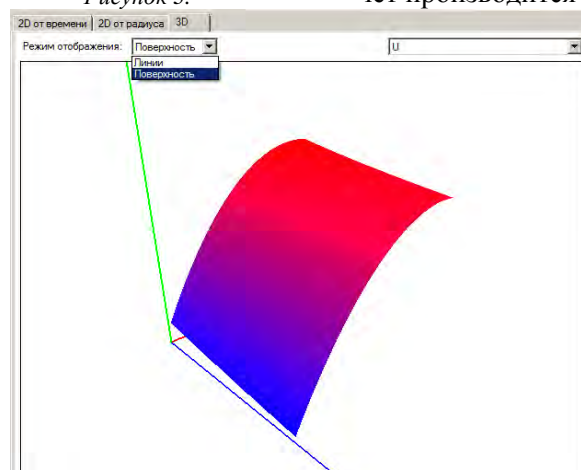


Рисунок 2. – Полученные графические 3D результаты до (слева) и после (справа) обработки

Также в программном комплексе использованы следующие динамически загружаемые библиотеки: ZedGraph.dll – .Net библиотека для работы с двумерными графиками; Visualisation.dll – .Net библиотека для работы с трехмерными графиками; Tao.OpenGL.dll, Tao.FreeGlut.dll – .Net библиотека для работы с графикой, необходима для корректной работы Visualization; IniFileClass.dll – .Net библиотека для работы с ini-файлами, которые отвечают за сохранение и загрузку конфигурации приложения; Freeglut .dll – библиотека для поддержки функций freeglut. Используется для упрощения работы с графической библиотекой OpenGL; DynamicFunctions.dll – .Net библиотека для работы с математическими формулами. Программный комплекс может быть использован для работы на персональных компьютерах под управлением операционной системы Windows (XP, Vista) и выше (необходимо наличие библиотек .Net Framework 3.0). Архитектура программного комплекса является модульной, что дает возможность добавлять новые функциональные возможности и вносить улучшения. Внешний вид программы соответствует стандартам и рекомендациям к приложениям для операционных систем Windows (рисунок 4).

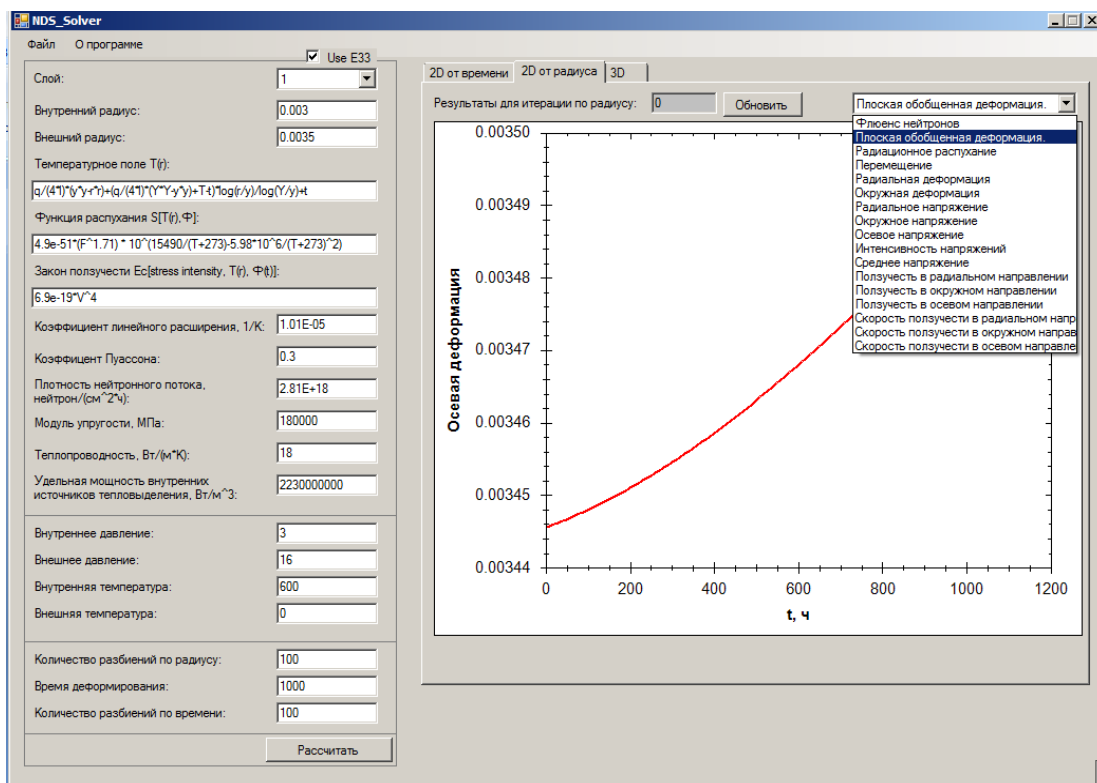


Рисунок 4. – Разработанный программный комплекс NDS_Solver

Не вдаваясь в излишние подробности, далее кратко перечислим основные научные результаты проведенных исследований. На первом этапе проекта были модифицированы механико-математические модели 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 до 1150 К и флюенсов нейтронов 10^{25} – 10^{27} нейтрон/м² [5–7]. Получены разрешающие системы дифференциальных уравнений в частных производных описывающие НДС цилиндрических тел при облучении. Далее для их решения предложен и обоснован численный метод. На втором этапе исследований была разработана расчетная схема и алгоритмы нахождения основных характеристик НДС цилиндрических тел в условиях ползучести и нейтронного облучения (при определении деформаций ползучести использовалась теория течения с учетом радиационной составляющей). На третьем этапе исследований на основе предложенных моделей были 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). Проведен ряд вычислительных экспери-

ментов, а также верификации и валидация данных, полученных в результате моделирования НДС в условиях неравномерного нагрева и интенсивного нейтронного облучения [11]. Также получен ряд решений модельных и тестовых задач для изучения деформирования цилиндрических тел с учетом физической нелинейности. На заключительном этапе исследований была разработана специальная методика проведения виртуальных экспериментальных исследований и программный модуль для имитационного моделирования и исследования НДС тепловыделяющих цилиндрических тел, позволяющие адекватно описать реально происходящие процессы деформирования при ползучести и облучении для основных конструкционных и тепловыделяющих материалов.

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 атомном машиностроении и энергетике. Полученные результаты могут стать в дальнейшем важным инструментом при оценке работоспособности элементов активных зон проектируемых ядерных реакторов нового поколения. С этой точки зрения данная тематика является достаточно перспективной и своевременной, учитывая новый этап развития атомной энергетики в Беларуси, отечественный потенциал которой напрямую зависит от объемов научно-исследовательских разработок. 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.

Дальнейшие планы предусматривают совместно со специалистами БГУИР, ФТИ, ОИМ и ОИЭЯИ – Сосны применение разработанных моделей и программных средств для определения оптимальных эксплуатационных нагрузок цилиндрических элементов конструкций и компонентов оборудования в машиностроении и энергетике: при анализе НДС конструктивных элементов, при прогнозировании ресурса конкретных технических устройств и анализе возможных механизмов и причин их повреждения в условиях экстремальной эксплуатации, а также применение изложенной методики и разработанного пакета прикладных программ при проведении прочностных расчетов с целью повышения точности прогнозирования ресурса широко применяемых в современной технике конструктивных элементов оборудования в виде цилиндрических тел в различных условиях экстремального нагружения.

В перспективе, полученные результаты могут наряду с нейтронно-физическим и теплофизическим блоками стать одной из трех составляющих общего компьютерного кода для проведения комплексных расчетов нейтронно-физических, теплофизических и прочностных характеристик конструктивных элементов ядерных реакторов. Подчеркнем, что до настоящего времени вычислительная программа такого уровня нигде в мире не создана. Проведенное исследование является хорошим заделом для создания такой общей программы расчета характеристик ЯЭУ: нейтронно-физический расчет – теплофизический расчет – напряженно-деформированное-состояние и обратная связь: нейтронно-физический расчет – теплофизический расчет – напряженно-деформированное состояние, но уже с учетом изменившейся геометрии активной зоны в результате деформирования и т.д.

Подходы, приемы и методы, используемые и полученные при выполнении исследований 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. Возможный экономический эффект заключается в том, что полученные результаты, позволяют без проведения дорогостоящих экспериментов и связанных с ними энергетических и материальных затрат рассчитывать напряженно-деформированное состояние и критические нагрузки при проектировании цилиндрических конструктивных элементов энергетического и машиностроительного оборудования, работающего в экстремальных условиях.

Благодарности

- *Исследования проведены при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта T12-MB-038 «Моделирование процессов деформирования и разрушения элементов конструкций ядерных энергетических установок», № госрегистрации в ГУ «БелИСА» 20123143 от 09.10.2012.*

- Авторы проекта считают приятным долгом выразить благодарность профессору И.С. Куликову и профессору А.В. Чigareву за ценные советы и замечания.

РЕЗЮМЕ

Проведен комплекс исследований по изучению механического поведения конструктивных элементов цилиндрической геометрии при воздействии неоднородных термосиловых и интенсивных радиационных полей. Выполнены виртуальные эксперименты по применению полученной модели для численного анализа элементов конструкций ЯЭУ. Программная модель реализована на C# в лицензионной среде Visual Studio 2011, которая позволяет обрабатывать и визуализировать результаты расчетов кинетики НДС цилиндрических тел. Проведена верификация и валидация методики решения и программы расчета, проверено соответствие разработанного программного средства процессам в реальном конструкционном элементе реактора. Полученные результаты можно квалифицировать как решение задачи численного моделирования физико-механических систем с недетерминированными параметрами, которая имеет существенное значение в области расчетов конструктивных элементов энергетического и машиностроительного оборудования, а также позволяет улучшить существующие модели деформирования и разрушения сплошных сред в условиях сложных техногенных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Todreas, N.E. Nuclear Systems I. Thermal Hydraulic Fundamentals / N.E. Todreas, M.S. Kazimi. – New York: Hemisphere Publishing Co, 1990.
2. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение / Паршин А.М., Неклюдов И.М., Камышанченко И.В., Тихонов А.Н. и др. Белгород: – Изд. Белгородского университета, 1998. –378 с.
3. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / А.Д.Амаев, А.М.Крюков, И.М.Неклюдов и др. Под ред. А.М.Паршина и П.А.Платонова. –СПб.: Политехника, 1997. –312 с.
4. Куликов, И. С. Прочность элементов конструкций при облучении / И. С. Куликов, В. Б. Нестеренко, Б. Е. Тверковкин. - Минск: Навука і тэхніка, 1990. - 143с.
5. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях: В 2-х т. / Под ред. Г. С. Писаренко. - Киев: Наук. думка, 1980.
6. Киселевский, В. Н. Прочность конструкционных материалов ядерных реакторов / В. Н. Киселевский. - Киев: Наук. думка, 1990. – 163с.
7. Кристиан Нейгел и др. C# 5.0 и платформа .NET 4.5 для профессионалов = Professional C# 5.0 and .NET 4.5. — М.: «Диалектика», 2013. — 1440 с. — ISBN 978-5-8459-1850-5
8. А. Хейлсберг, М. Торгерсен, С. Вилтамут, П. Голд Язык программирования C#. Классика Computers Science. 4-е издание = C# Programming Language (Covering C# 4.0), 4th Ed. — СПб.:«Питер», 2012. — 784 с. — ISBN 978-5-459-00283-6
9. Джон Скит. C#: программирование для профессионалов, 2-е издание = C# in Depth, 2nd Edition. — М.: «Вильямс», 2011. — 544 с. — ISBN 978-5-8459-1555-9
10. Кристиан Нейгел, Карли Уотсон и др. Visual C# 2010: полный курс = Beginning Microsoft Visual C# 2010. — М.: Диалектика, 2010. — ISBN 978-5-8459-1699-0
11. Кавун О.Ю. САПР отрасли. Программы и программные комплексы, применяемые при конструировании ЯЭУ. Примеры применения и верификации конечно-разностных схем при разработке программ. М.: изд-во Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 2005. -108с.

SUMMARY

The purpose of work is to create nonlinear mechanical models of stress/strain state for cylindrical elements undergoing irregular temperatures, swelling and creep. The main goal is to produce a general mathematical model of solve stress/strain state problem for solid, hollow and multilayer cylinders undergoing nuclear radiation, creep and thermal strains; software implementation of these models, numerical solution, research and analysis. Methods of research are systems programming C#/C++, a programming environment Microsoft Visual Studio 2011 Express, general methodology of mathematical modeling and computer simulation, theory of nonlinear differential equations. The obtained results can be used in in the design and development of a wide class of problem for power engineering and nuclear power. Also they can be used in teaching process by reading special courses of mechanical modeling and simulation in universities.

Поступила в редакцию 29.10.2013