

Расчеты НДС проводились для полученных максимальных значений ускорений и для заданной величины натяга $\Delta = 0,33 \cdot 10^{-4}$ м. На рис. 4 и 5 представлены картины полей радиальных перемещений и интенсивности напряжений в зонах торцевых затворов. Максимальные радиальные перемещения стенок КУ наблюдаются на границах контакт с затвором но не превышают величины $0,16 \cdot 10^{-4}$ м, то есть условие герметичности выполняется. Максимальные значения интенсивности напряжений (≈ 90 МПа) наблюдаются в точках материала защитных стальных труб в зоне контакта с преградой. Величина интенсивности не достигает значения предела текучести для стали. Таким образом, можно сделать вывод, что при заданных условиях ударных нагрузок конструкция КУ остается работоспособной.

Список литературы: 1. Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов (ОПБЗ-83). – М., ЦНИИатом-информ, 1984. 2. Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ. Нормы МАГАТЭ по безопасности. Серия изданий по безопасности № 6. Издание 1985 г. 3. Комплекты упаковочные транспортные для отработавших тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. Общие технические требования. ГОСТ 26013–83. Издательство стандартов, 1984. 4. Андреев Ю.М., Ларин А.А, Морачковский О.К. Система компьютерной алгебры для досліджень механіки машин // Машинознавство. – 2005. – № 6 - С.3-8. 5. Веселков И.Л., Самарин Ю.А., Свилов А.В. и др. Расчетная оценка динамической реакции ТУК-84 при испытаниях на аварийные условия перевозки // Атомная энергия. – Т. 100. Вып. 6. – Июнь 2006 г. – С. 437-440.

Поступила в редколлегию 04.12.2007

УДК 539.3

Д.В.БРЕСЛАВСКИЙ, докт.техн.наук; **Ю.Н.КОРЫТКО**; **П.М.ЛЫСАК**;
НТУ «ХПИ»

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Статтю призначено опису програмних засобів, розроблених в НТУ «ХПІ» для розв'язку двовимірних задач теорії повзучості – плоского напруженого стану, плоскої деформації та узагальненого плоского напружено-деформованого стану. Як метод розв'язання поставлених задач застосовується метод скінчених елементів (МСЕ) у поєднанні з багатокроковими методами інтегрування за часом. Обговорюється побудова програмного продукту та проводиться оцінка достовірності чисельних результатів.

The paper describes the program codes has been developed in NTU 'KhPI' for the numerical simulation of two-dimensional problems of creep theory, such as plane stress, plane strain and generalized stress-strain state. The Finite Element Method (FEM) jointly with multi step time integration methods are used as a method of computer simulation. The software structure, as well as verification of numerical results are discussed.

1. Актуальность темы. Моделирование поведения при высокотемпературной ползучести достаточно большого количества элементов и деталей машиностроительных конструкций приводит к постановкам, отвечающим расчетным схемам двумерных задач. Это сосуды и клапана высокого давления, трубопроводы, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, ротора паровых и газовых турбин, корпусные детали активной зоны ядерных реакторов и др. В связи со сложной геометрической формой деталей, сложной геометрией нагрузок и закреплений, использование аналитических методов в расчетах зачастую затруднительно. В связи с этим в расчетах используются численные методы, прежде всего метод конечных элементов (МКЭ). Разработка современных программных продуктов, предназначенных для решения задач ползучести и длительной прочности, является, таким образом, актуальной и важной в научно-практическом отношении задачей.

2. История создания. Работы в направлении создания высокоэффективных средств численного анализа двумерных задач теории ползучести на базе метода конечных элементов ведутся в НТУ «ХПИ» с середины восьмидесятих годов прошлого столетия [1, 2]. В это время был разработан и внедрен в Украинском республиканском фонде алгоритмов и программ [2] программный комплекс для решения задач ползучести осесимметричных элементов конструкций. Комплекс имел две версии – одну на языке Алгол-ГДР для ЭВМ типа БЭСМ-6, другую – на языке PL/1 для ЭВМ серии ЕС. Математические постановки задач и описание алгоритмов опубликованы в работах [1, 3].

Переход на IBM-совместимые компьютеры с операционной системой MS DOS в начале девяностых годов потребовал разработки нового поколения программных средств, для реализации которых был выбран алгоритмический язык Паскаль. К этому же времени относятся и разработки первых препроцессоров, предназначенных для генерации конечноэлементных сеток для областей, составленных из комбинации простых геометрических объектов [4].

В качестве конечного элемента был выбран треугольный трехузловой элемент, позволяющий избавиться от многих проблем, связанных с необходимостью обеспечения совместности нелинейного деформирования при ползучести в соседних элементах. Как будет показано ниже, использование достаточного числа данных элементов обеспечивает вполне удовлетворительную точность решения инженерных задач.

Развитие операционных систем, опирающихся на мощные вычислительные комплексы с большим быстродействием и объемом оперативной памяти, позволило перейти к созданию третьего поколения программного продукта.

3. Описание программных средств. В настоящее время программный комплекс для решения двумерных задач теории ползучести состоит из трех основных частей – препроцессорной программы генерации конечноэлементных сеток с соответствующим заданием граничных условий, собственно мо-

делирующей программы и постпроцессора, позволяющего визуализировать поля напряжений, деформаций, перемещений, структурных параметров в рассчитываемом конструктивном элементе. В качестве основной идеи разработки была принята идея максимального приближения к платформенной независимости программного средства. В связи с этим для его написания использованы наиболее распространенные алгоритмические C++ и java, что позволяет организовывать работу с комплексом как в операционной системе MS Windows, так и в UNIX – подобных системах (например Linux).

Препроцессор *Divider* предназначен для редактирования и разбиения на треугольники фигуры, которая задается как совокупность контуров. В настоящее время используется версия «divider 2.4c». Программа написана на языке java и может быть запущена на любой платформе, на которой имеется java-среда (Windows, Linux и др.).

В программе задаются и редактируются граничные условия в виде закрепления узлов или приложенных сил. Разбиение фигуры на треугольные элементы осуществляется по опциям, которые определяет пользователь: минимальная площадь элемента, максимальная площадь элемента и минимальный угол в элементе. В основе работы программы лежат алгоритмы предварительного разбиения многоугольника, измельчения сетки и алгоритм поворота диагоналей относительно узла. Результатом работы программы являются файлы – массивы узловых координат, матрица индексов; закрепленных, пограничных узлов, узлов, в которых приложена нагрузка, параметров линий уровня для дальнейшей работы препроцессора.

На рис. 1-3 приведены характерные окна, доступные при работе с препроцессором, а также примеры разбиения сложных фигур на треугольные элементы с помощью программы «divider 2.4c».

Основная моделирующая программа *FEM CREEP* написана на языке C/C++ и состоит из ряда функций, основные из которых следующие:

- 1 Блок вычисления физических констант.
- 2 Функция MATRGS(), которая служит для вычисления компонент матриц жесткости конечных элементов и построения матрицы жесткости системы.
- 3 Функция PG() - для определения вектора узловой нагрузки.
- 4 Функции CHOBANDD() та CHOBANDS() реализуют алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений методом Холецкого.
- 5 Функция STRESS обеспечивает подсчет компонентов тензоров деформаций и напряжений в конечных элементах, деформаций ползучести в элементах.
- 6 Функция CREFOR() предназначена для определения величин сил, вызванных неоднородными температурными и радиационными полями и деформациями ползучести.
- 7 Функция PRECOR() реализует интегрирование начально-краевой задачи ползучести методом прогноза-коррекции.

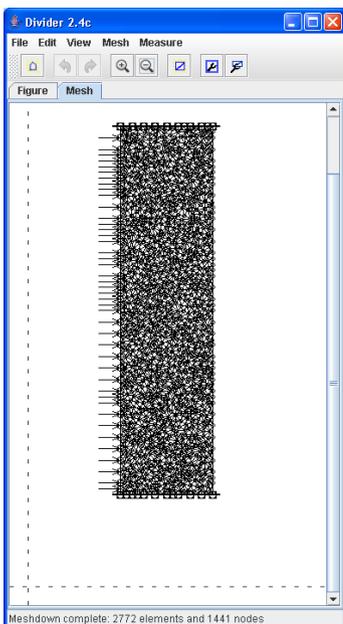


Рисунок 1 – Тело вращения – цилиндр, произвольная сетка из 2772 КЭ, 1441 узла

Постпроцессор «POST 2D» написан на языке C/C++. Реализует две основные формы представления решения задач ползучести – вывод графиков функций по заданным в препроцессоре линиям и вывод полей распределения основных неизвестных по области рассматриваемого конструктивного элемента. Также предусмотрена возможность подключения библиотек и функций пакета MatLab.

4. Пример расчетов. Достоверность получаемых результатов была предметом особого внимания во все периоды разработки комплекса. Результаты тестовых задач для осесимметричных тел вращения, пластин с отверстиями и т.п. обсуждаются в [2, 3]. В данной работе в качестве примера рассмотрим расчет тепловой ползучести для модели, представленной на рис. 3. В программе «Divider 2.4c» создана конечно-элементная модель: количество конечных элементов

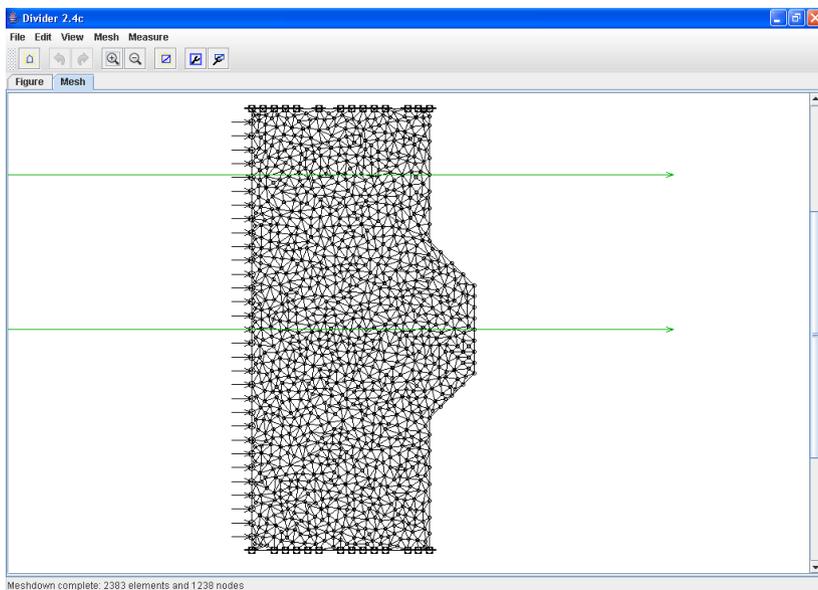


Рисунок 2 – Оболочка твэла, 2383 КЭ, 1238 узла

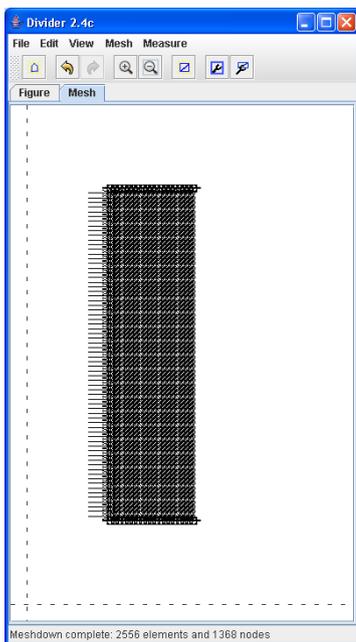


Рисунок 3 – Тело вращения – цилиндр, равномерная сетка из 2556 КЭ, 1368 узла

составляет 2556, количество узлов 1368. Приложено внутреннее давление 1 МПа, материал сталь 45X14H14B2M при температуре $T = 873$ К. Расчет ползучести проводился с шагом 0,1 часа, общее время – 300 часов. В результате расчета установлено, что перераспределение напряжений происходит при $t = 200$ часов. На рис. 4 представлены графики распределения напряжений в среднем сечении в пределах упругости и при установившейся ползучести. Ниже приведены таблицы полученных в среднем сечении результатов. Погрешность расчетов составляет 4 % в пределах упругости и 9 % при установившейся ползучести.

5. Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о вполне удовлетворительном характере моделирования ползучести в осесимметричных телах вращения сложной геометрии с помощью программных средств конечно-элементного моделирования.

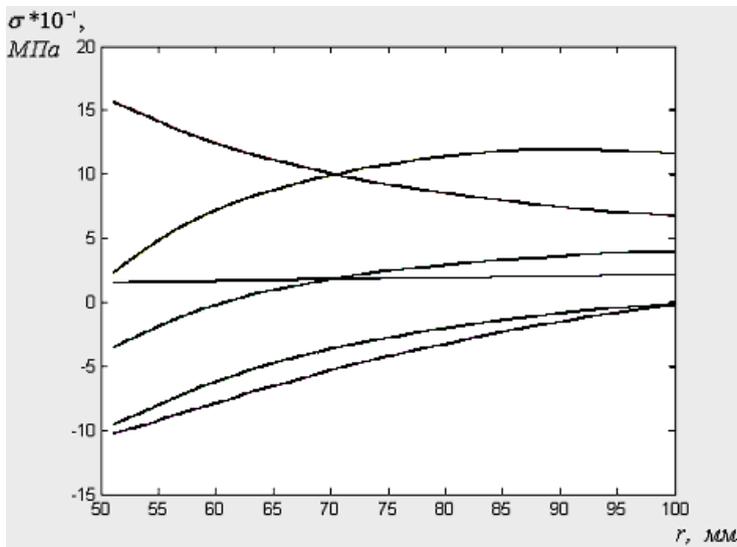


Рисунок 4 – Графики распределения напряжений

Таблица 1 – Результаты расчетов при $t = 0$ ч

	50,9 мм (1153 эл-т)	60,2 мм (1160 эл-т)	70,4 мм (1167 эл-т)	79,6 мм (1174 эл-т)	89,8 мм (1181 эл-т)	99,1 мм (1188 эл-т)
σ_r anal	-0,952	-0,587	-0,34	-0,192	-0,0799	-0,00626
σ_r num	-0,912	-0,612	-0,326	-0,203	-0,073	-0,0115
σ_θ anal	1,62	1,25	1,01	0,859	0,746	0,673
σ_θ num	1,629	1,24	1,01	0,854	0,7506	0,673
σ_z anal	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
σ_z num	0,197	0,195	0,199	0,194	0,206	0,208

Таблица 2 – Значение компонент НДС при $t = 200$ ч

	50,9 мм (1153 эл-т)	60,2 мм (1160 эл-т)	70,4 мм (1167 эл-т)	79,6 мм (1174 эл-т)	89,8 мм (1181 эл-т)	99,1 мм (1188 эл-т)
σ_r anal	-0,967	-0,686	-0,449	-0,279	-0,126	-0,0106
σ_r num	-0,91	-0,726	-0,43	-0,291	-0,113	-0,0113
σ_θ anal	0,812	0,906	0,985	1,042	1,093	1,13
σ_θ num	0,801	0,823	0,959	0,972	1,014	1,014
σ_z anal	-0,0773	0,1103	0,268	0,381	0,483	0,5604
σ_z num	-0,137	0,000767	0,2	0,289	0,397	0,495

Список литературы: 1. Д.В.Бреславский. Термоползучесть анизотропных тел вращения и математическое обеспечение расчетов практических задач на ЭВМ // Динамика и прочность машин. – Харьков: Вища школа. – 1986. – Вып. 43. – С. 22-25. 2. Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Программный комплекс для решения задач ползучести осесимметричных элементов конструкций // ПС РФАП УССР, инв. № П6345. Ном. гос. рег. № 50880001310. – 1988. – 99 с. 3. Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Нелинейная ползучесть и разрушение плоских тел при высокочастотном циклическом нагружении // Прикладная механика. – 1998. – Т. 34, № 3. – С.97-103. 4. Анищенко Г.О., Бреславский Д.В., Морачковский О.К. Программные средства для проектирования машиностроительных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях статической и динамической ползучести // Компьютер: наука, техника технология, здоровье. Тез. докл. международной научно-технической конференции. – Харьков, Мишкольц: ХПИ, МУ. – 1993. – С. 6-8.

Поступила в редколлегию 7.11.2007.