УДК 539.3+539.372+621.94.084

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИГАРЕВ А. В., магистр техн. наук ШИРВЕЛЬ П. И.

Белорусский национальный технический университет

Известно, что под действием интенсивного облучения высокоэнергетическими частицами (нейтроны, протоны, электроны или ионы) происходит изменение структуры материала, что отражается как на его кратковременных и длительных механических свойствах, так и на общих закономерностях процесса деформирования в целом [1–4]. Различные дефекты радиационного или металлургического характера, неравномерный теплосъем с поверхности тепловыделяющего тела вызывают неоднородное температурное распределение по его периметру. Воздействие неравномерного в окружном направлении температурного поля в условиях радиационного облучения приводит не только к появлению неоднородных объемных окружных деформаций термического расширения, но и к возникновению значительных по величине необратимых деформаций радиационного распухания в кольцевых направлениях. Это неизбежно влечет за собой появление дополнительных напряжений в твердом теле. В случае проявления эффектов вязкости модельной среды действующие напряжения должны также вызывать дополнительные неоднородные деформации ползучести по периметру сечения, скорость которых будет изменяться с дозой облучения и градиентом неосесимметричного нагрева. При этом наряду с высокотемпературной тепловой ползучестью возникает радиационная ползучесть, которая совместно с радиационным распуханием может привести к существенному формоизменению тел. В результате компоненты тензора деформаций, тензора напряжений и вектора перемещений будут зависеть не только от радиальной, но и от окружной координат тела. В таком случае необходимо рассматривать неосесимметричное напряженно-деформированное состояние (НДС), под которым подразумевается зависимость его характеристик как от радиуса, так и от меридионального угла (т. е. в плоскостях, проходящих через ось вращения, не возникают одинаковые напряженное и деформированное состояния для текущей радиальной координаты). Очевидно, что данный вопрос в настоящее время требует дополнительного исследования, так как в различных областях современной техники (энергетическое и атомное машиностроение, аэрокосмическая отрасль и т. д.) находят широкое применение конструкционные элементы и компоненты оборудования, имеющие цилиндрическую форму. Повышенные требования, предъявляемые к прочности и надежности таких элементов, могут быть обеспечены лишь при наличии достоверной информации об их НДС. Поэтому необходимо выполнить дополнительные исследования касательно теории неосесимметричного НДС по выявлению степени влияния на конечное решение допущений, которые имеют место при выводе разрешающих соотношений осесимметричности.

В [5–8] проведена общая постановка задачи об упруго-вязком деформировании длинных цилиндрических тел при квазистатическом терморадиационном нагружении. Получены разрешающие выражения для неосесимметричного НДС цилиндра в перемещениях. Дальнейшая

цель состоит в проверке механико-математической модели на соответствие заявленным свойствам, в первую очередь неосесимметричному деформированию в условиях ползучести и облучения. Используя численную методику, приведенную в [8], выполним виртуальное моделирование $2D(r, \theta)$ деформирования односвязного цилиндрического тела в условиях терморадиационных воздействий и рассмотрим влияние окружной неравномерности на неосесимметричное НДС для различных значений амплитуд температур. Также приведем результаты сравнения с осесимметричной моделью. В качестве модельного тела будем рассматривать сплошной цилиндр, выполненный из материала с внутренними источниками теплоты (ядерное топливо).

Неосесимметричное температурное поле задается с учетом равномерного внутреннего тепловыделения в следующем виде:

$$T(r,\theta) = \frac{\bar{Q}}{4\bar{\lambda}}(R^2 - r^2) + A\left(\frac{r}{R}\right)^4 \sin(4\theta) + T_s, \quad (1)$$

где R – радиус цилиндра (R = 0,003 м); A – амплитуда значение окружной неравномерности; $\bar{Q}$ – средняя объемная плотность тепловыделения, которая постоянна; r – текущий радиус; θ – окружная координата.

Считается, что тепловыделяющий материал (40 %UO_2 + 60 %Cr) обладает следующими осредненными по сечению физико-механическими характеристиками: E = 1,85 · 10^5 МПа; μ = 0,29; α = 11,3 · 10^{-6} 1/К; λ = 18 Вт/(м · К); Q = 2,234 · 10^9 Вт/м^3; T_s = 873 К, а скорость распухания материала модельного тела задается на основании модели сферических газовых пор. Согласно [1–3], предполагаем, что влияние напряжения на скорость ползучести можно представить в виде суммы двух членов: линейного радиационного и нелинейного термического. Закон ползучести тепловыделяющего материала на установившейся стадии принят в виде [4] и включает как термическую, так и радиационную составляющие

$$\dot{\varepsilon}_{\text{и}}^{c} = C\sigma_{\text{и}}^{m} + D\sigma_{\text{и}}, \quad (2)$$

где C, D – модули тепловой и радиационной ползучести; m – показатель тепловой ползучести ($5 < m < 6$); $\sigma_{\text{и}}$ – интенсивность напряжения.

Для определения распухания топливных композиций делящихся материалов можно использовать модель квазистатических газовых пор в предположении, что поры в топливном материале малоподвижны и в среднем имеют одинаковый размер. Таким образом, распухание материала (керметного топлива) подчиняется эмпирическим зависимостям, рекомендуемым в [2], в соответствии с решениями интегро-дифференциальных уравнений распухания [4], которые были получены на основе модели сферических ячеек. Альтернативой заданному распределению распухания для керметного топлива могут служить корреляционные уравнения [3], описывающие распухание карбидов и нитридов урана в зависимости от рабочих параметров и химического состава. Считается, что модельное тело не выгибается, и потеря устойчивости не происходит. Заметим, что значения нагрузки и размеров модельного тела исключают возможность потери устойчивости цилиндра на основе данных по устойчивости цилиндров в условиях ползучести и облучения, полученных Ю. И. Лихачевым и И. С. Куликовым [2, 4].

Для удобства анализа получаемых результатов условно разделим сечение модельного тела на три участка: внутренний $0 \le \rho \le 1/3$; средний $1/3 \le \rho \le 2/3$ и внешний $2/3 \le \rho \le 1$. В дальнейшем в зависимости от распределения неосесимметричного температурного поля для внутреннего (I), среднего (II) и внешнего (III) участков условно выделим две зоны – горячих (θ = [0; π/4]) и холодных (θ = [π/4; π/2]) сечений согласно схеме, представленной на рис. 1 (P_{ext} = 8 МПа).

Далее, используя методику, изложенную в [5–8], получим картину изменения характеристик напряженного состояния тепловыделяющего цилиндрического тела в условиях обобщенной плоской деформации. Отметим, что все решения были получены с использованием лицензионной программной среды Visual Studio 2010 Express, которая была бесплатно предоставлена компанией Microsoft. Программная модель позволяет обрабатывать и визуализиро-

вать результаты расчетов кинетики неосесимметричного НДС цилиндрических тел.

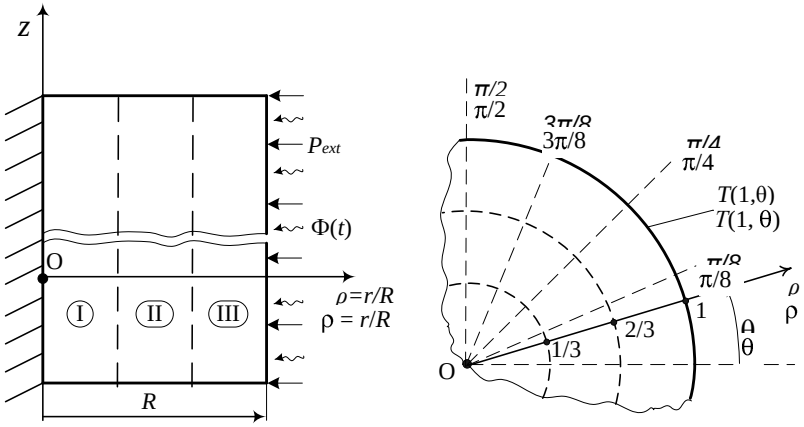

Рис. 1. Схема анализа напряженно-деформированного состояния

Напряженное состояние длинного сплошного цилиндра с внутренними источниками тепловыделения за 1000 ч нагружения для различных амплитудных значений окружной температурной неравномерности представлено на эпюрах рис. 2–4.

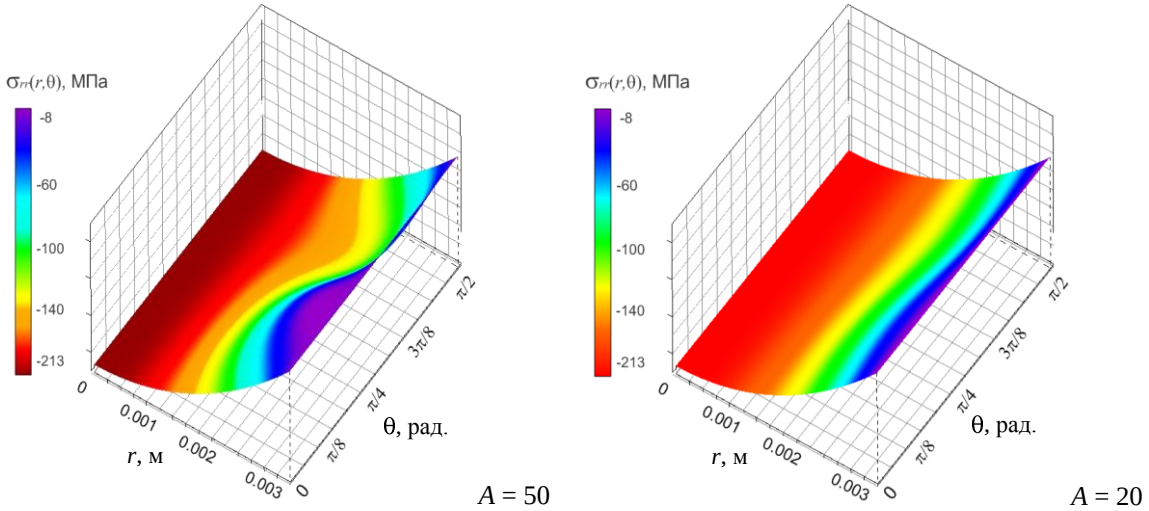

Рис. 2. Поверхности радиальных напряжений за 1000 ч нагружения

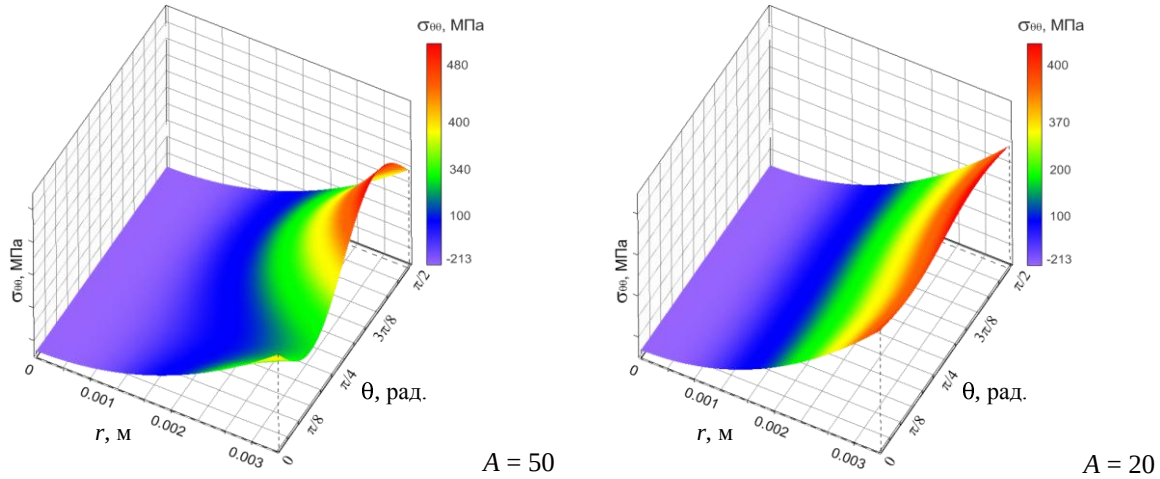

Рис. 3. Поверхности окружных напряжений за 1000 ч деформирования

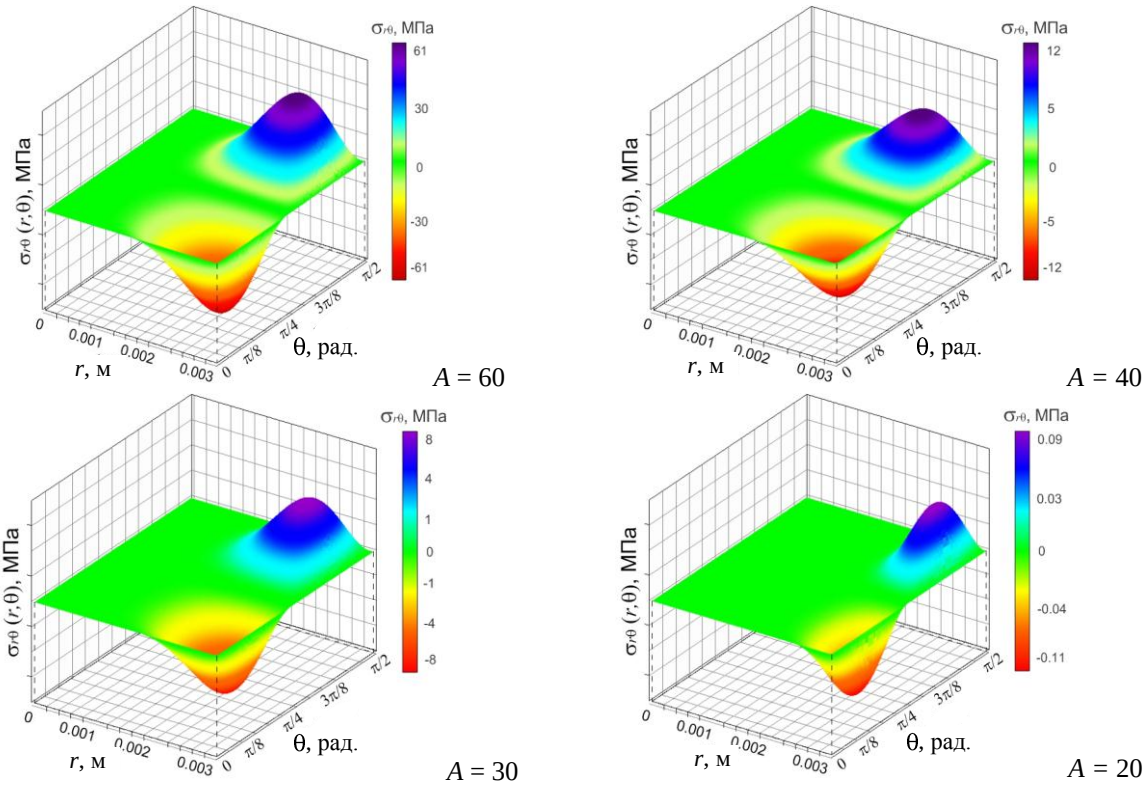

Рис. 4. Поверхности распределения касательных напряжений за 1000 ч при различных значениях окружной температурной неравномерности

Изменение со временем напряженного состояния в зависимости от амплитудного значения температур в точках экстремума окружных координат средних сечений (при ρ = 2/3) представлено в табл. 1, 2, в которых сведены обработанные числовые значения серии расчетов для максимальных и минимальных величин радиального напряжения и интенсивности напряжений соответственно за время 0; 500; 1000; 2000; 3000 ч деформирования.

Таблица 1

Изменение радиальных напряжений со временем в зависимости от амплитудного значения температур для *r*/*R* = 2/3 в горячих и холодных сечениях

A	θ, рад.	σ_{rr}, МПа, при *t*, ч				
		0	500	1000	2000	3000
0	π/8	–110	–122	–156	–195	–214
	3π/8	–110	–122	–156	–195	–214
10	π/8	–109	–121	–156	–195	–214
	3π/8	–113	–123	–158	–195	–214
20	π/8	–103	–115	–150	–190	–220
	3π/8	–116	–130	–162	–202	–227
40	π/8	–89	–103	–138	–175	–224
	3π/8	–131	–142	–175	–205	–241
50	π/8	–70	–100	–125	–160	–235
	3π/8	–140	–150	–160	–200	–260

Таблица 2

Изменение интенсивности напряжений со временем в зависимости от амплитудного значения температур для *r*/*R* = 2/3 в горячих и холодных сечениях

A	θ, рад.	$\sigma_и$, МПа, при *t*, ч				
		0	500	1000	2000	3000
0	π/8	136	150	200	246	306
	3π/8	136	150	200	246	306
10	π/8	135	150	200	246	306
	3π/8	138	151	200	246	306
20	π/8	130	144	195	243	304
	3π/8	144	158	207	252	310
40	π/8	100	115	180	240	301
	3π/8	150	165	225	270	321

Исходя из представленной кинетики напряженного состояния, можно предположить, что вместе с постоянным ростом напряжений со временем терморадиационного нагружения прослеживается общее снижение неоднородности напряженного состояния по периметру. Как видно из табл. 1, уровень неравномерности разболтки напряжений прямо пропорционален изменению параметра неосесимметричности *A*

в законе распределения температуры. Неоднородность интенсивности напряжений по периметру также возрастает с увеличением окружной неравномерности (табл. 2). Таким образом, чем больше первоначальная окружная развертка температур ($2A$), тем больше остаточная амплитуда изменения неоднородности напряженного состояния по периметру модельного тела. Вместе с тем следует отметить, что даже при высоком уровне окружной амплитуды температур (например, $2A = 80$) за 3000 ч деформирования неравномерность напряженного состояния в кольцевом направлении значительно снижается, причем в холодных сечениях уровень напряжений остается несколько выше, чем в горячих. На основании проведенной серии расчетов видно, что значительная неоднородность напряжений на начальных этапах нагружения (t = 0–500 ч) обусловлена в первую очередь неосесимметричностью температурного поля $T(r, \theta)$ по периметру модельного тела с внутренними источниками тепловыделения. Причем максимум и минимум окружной неоднородности в соответствии с неосесимметричным температурным полем достигаются для сечений $\theta = \pi/8$ и $\theta = 3\pi/8$ радиальной плоскости. Особенно сильно неравномерность напряжений проявляется на среднем ($1/3 \le \rho \le 2/3$) и внешнем ($2/3 \le \rho \le 1$) участках. В то же время на внутреннем интервале ($0 \le \rho \le 1/3$) распределение напряжений близко к осесимметричному. С течением времени (0–3000 ч) окружная неравномерность полей напряжений для II и III участков сглаживается, что связано в первую очередь с большой термической ползучестью материала. Заметим, что величина сжимающих радиальных напряжений, также как и абсолютная величина напряжений (табл. 2), снижается в сечениях, где предполагаются большие радиационные деформации (в соответствии с принятым распределением распухания). Так, в горячих сечениях на внешнем (III) и среднем (II) участках наблюдается общее снижение максимальных сжимающих напряжений на 25–30 %, что наиболее четко видно на графиках изменения радиальных напряжений. Это говорит о том, что в данном случае возникающие радиационные напряжения (растягивающие) со временем способны несколько снизить общий уровень первоначальных термоупругих напряжений. Таким образом, совместный учет необратимых деформаций ползучести и распухания приводит к значительному уменьшению неоднородности напряжений, а также к их изменению примерно на 5–25 %: увеличению растягивающих и уменьшению по модулю сжимающих напряжений по периметру II и III участков модельного тела. Вместе с тем расчеты показали, что на II и III участках неравномерность распределения деформаций остается значительной, кроме того, с течением времени такая неоднородность стремительно увеличивается, причем меняется качественный характер ее распределения по периметру. В целом оценочные результаты виртуальных экспериментов дают основания полагать, что разрушение цилиндра произойдет при длительном нагружении в области упругих напряжений. Вопрос состоит в определении времени, когда остаточные механические деформации модельных тел станут недопустимо большими, превышая предел ползучести. Действующие напряжения в общем случае вызывают дополнительные неоднородные деформации ползучести по периметру сечения, скорость которых будет изменяться с дозой облучения и градиентом неосесимметричного нагрева. Результаты виртуальных испытаний показали, что при расчете тепловыделяющего цилиндра целесообразно учитывать в основном только термическую ползучесть. Влияние неравномерности температурного поля на НДС в условиях ползучести и облучения показало, что для тепловыделяющего материала неоднородность напряженного состояния со временем снижается.

Таким образом, в результате проведения серии вычислительных экспериментов установлено, что наименьшее амплитудное значение неравномерности температур, при котором необходимо использовать теорию неосесимметричного НДС, составляет 40 градусов ($A = 20$). При значениях, равных или меньших указанной величины, относительное изменение напряжений по периметру не превышает 5 % (амплитуда изменения радиальных напряжений – 3,8 %, окружных – 4,7 %, осевых – 4,2 %, касательных – 2,5 %). Учитывая, что погрешность проводимых численных экспериментов составила 4–5 % (при числе разбиения k = 1000, m = 100, n = 100), для данных условий нагружения

и свойств тепловыделяющего цилиндра наименьшее амплитудное значение неравномерности температур, при котором необходимо использовать теорию неосесимметричного НДС, составляет $2A = 40$. При $2A > 40$ осесимметричная модель в целом дает неудовлетворительные результаты: характерны увеличение сжимающих напряжений в горячих сечениях, а также уменьшение растягивающих напряжений в холодных сечениях на внешнем участке. В то время как по неосесимметричной модели происходит некоторое снижение терморадиационных напряжений по абсолютной величине в горячих сечениях, в холодных сечениях наблюдается их рост. Следует, однако, отметить, что со временем деформирования неоднородность напряженного состояния по кольцевой координате значительно сглаживается и уже при t = = 3000 ч не превышает 10 % (для $A < 50$). Вместе с тем в обоих случаях неравномерность по периметру, сильно сказывающаяся на поверхности модельного цилиндрического тела, заметно сглаживается по мере приближения к продольной оси. Так, сравнение с осесимметричной моделью показало, что в результате обоих расчетов наблюдалось качественное и количественное совпадение решений при $\theta = 0$ и $\rho < 1/3$ ($\rho = r/R$, R = 0,003 м). Следует отметить, однако, что при $\rho > 1/3$ количественно может быть довольно большое различие (до 70 %) в зависимости от принятой амплитуды окружной неравномерности. В то же время напряжения, получаемые по $2D(r, \theta)$-модели, в среднем сечении ($\theta = 0$) цилиндра близки по своему характеру с напряжениями по осесимметричной модели при той же нагрузке по всей толщине тела.

Анализ влияния неравномерности температурного поля на НДС цилиндрических тел в условиях ползучести и облучения показал, что неравномерность температуры вызывает дополнительные к номинальным температурные напряжения, превышающие напряжения от внешнего механического нагружения, что существенно влияет на работоспособность модельного тела в экстремальных условиях нагружения, особенно при значительных дозах облучения, вызывающих неравномерное распухание. Учет этой неоднородности, проявляющейся в увеличении объемной деформации, снижает максимальные сжимающие напряжения до 30 %. С одной стороны, такое снижение максимальных напряжений при неупругой работе материала позволяет повысить допустимую величину терморадиационной нагрузки, но с другой – необходимо следить, чтобы растягивающие напряжения, возникающие при данном значении флюенса и температуры, не приводили к разрушению тела в зоне растяжения. Следует отметить, что учет переменности НДС по $2D(r, \theta)$-модели дает достаточно существенные отклонения от осесимметричной модели. Однако погрешность такого расчета по осесимметричной модели по сравнению с неосесимметричной зависит от многих параметров сложного нагружения: величины неравномерности температур, уровня температур в целом, так как последние определяют распухание материала, а также выгорания и пористости топливного (тепловыделяющего) материала и других факторов (флюенс нейтронов, механическое давление, физико-механические свойства). Поэтому для конкретного случая нужно вести конкретный расчет. Для окончательных рекомендаций требуется детальный численный расчет в более широких диапазонах изменения неравномерного поля температур и радиационных нагрузок, который не подвергался подробному исследованию. Однако даже несколько примеров расчетов показали, что это влияние значительно и требует отдельного изучения.

ВЫВОДЫ

Общий случай неосесимметричного терморадиационного напряженно-деформированного состояния значительно отличается от осесимметричного, а решение неосесимметричной задачи деформирования не может быть заменено решением ряда осесимметричных задач в соответствующих меридиональных сечениях. Если рассмотренные в [9] модели напряженно-деформированного состояния дают представление об интегральных изменениях в цилиндрическом теле, то неосесимметричная $2D(r, \theta)$-модель позволяет провести анализ его состояния в любой материальной точке как по радиусу, так и по периметру сечения с возможностью дальнейшей оценки прочности на основе того или иного критерия.

Построенная механико-математическая модель неосесимметричного напряженно-деформированного состояния вполне точно описывает объект исследований, приводя к допустимым значениям ошибки. Достоверность результатов решения тестовых и модельных задач подтверждена совпадением их с известным аналитическим решением, частично с результатами натурных экспериментов и данными, полученными с помощью других пакетов прикладных программ, корректность которых доказана многолетней практикой их использования: отклонение составляет от 4 до 9 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселевский, В. Н.** Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении / В. Н. Киселевский. – Киев: Ин-т пробл. прочности, 1977. – 103 с.

2. **Лихачев, Ю. И.** Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю. И. Лихачев, В. Я. Пупко. – М.: Атомиздат, 1975. – 280 с.

3. **Тутнов, А. А.** Расчетное моделирование распухания топливных материалов по модели квазистатических пор / А. А. Тутнов, А. И. Ульянов, К. К. Желтухин. – М., 1984. – 25 с.

4. **Куликов, И. С.** Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин. – Минск: Наука и техника, 1984. – 104 с.

5. **Ширвель, П.И.** О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению / П. И. Ширвель, И. С. Куликов // Машиностроение: респ. межведомственный сб. – 2008. – Вып. 24. – Т. 1. – С. 185–191.

6. **Ширвель, П. И.** Решение неосесимметричной задачи термоупругости для неравномерно нагретого длинного цилиндра в условиях ползучести / П. И. Ширвель, И. С. Куликов // Вестник БНТУ. – 2009. – № 4. – С. 75–80.

7. **Ширвель, П. И.** Неосесимметричное термоупругопластическое деформирование цилиндрических тел в условиях облучения / П. И. Ширвель, А. В. Чигарев // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. II. – С. 404–411.

8. **Ширвель, П. И.** Модель расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях пластичности и ползучести / П. И. Ширвель, И. С. Куликов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2012. – № 4. – С. 51–62.

9. **Ширвель, П. И.** Решение радиационно-термоупругой задачи для сплошного цилиндра / П. И. Ширвель // Теоретическая и прикладная механика: респ. межведомственный сб. науч.-техн. статей. – 2008. – Вып. 23. – С. 55–63.

Поступила 03.05.2013