

## НЕОСЕССИМЕТРИЧНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЛИННОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЦИЛИНДРА В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ТЕРМОРАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

к. ф.-м. н. <sup>1</sup>Ширвель П.И., д. ф.-м. н. Куликов И.С., д. ф.-м. н. <sup>1</sup>Чигарев А.В.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

Общеизвестно, 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 [1–8]. Различные дефекты радиационного или металлургического характера, неравномерный теплосъем с поверхности тепловыделяющего тела могут вызывать также неоднородное температурное распределение по периметру тела. Отметим, что 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 [2]. 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 и радиационная ползучесть, которая совместно с радиационным распуханием (свеллинг), 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 деформируемого тела. В таком случае, необходимо рассматривать неосесимметричное 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 одинаковое 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, транспорт 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.

В предыдущих работах [9–13] проведена общая постановка задачи об упруговязком деформировании длинных цилиндрических тел при квазистатическом терморadiационном 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 [13], выполним виртуальное моделирование  $2D(r, \theta)$  деформирования односвязного цилиндрического тела в условиях терморadiационных воздействий и рассмотрим влияние окружной температурной 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 тепла (ядерное топливо).

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

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

Здесь  $R$  – радиус цилиндра ( $R = 0,003$  м);  $A$  – амплитудное значение окружной неравномерности;  $\bar{Q}$  – средняя объемная плотность тепловыделения, которая постоянна. Считается, что тепловыделяющий материал ( $40\%UO_2+60\%Cr$ ) обладает следующими осредненными по сечению физико-механическими характеристиками:  $E=1,85 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu=0,29$ ;  $\alpha=11,3 \cdot 10^{-6}$  1/К;  $\lambda=18$  Вт/(м · К);  $Q=2,234 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>,  $T_s=873$  К, а скорость распухания материала модельного тела задается на основании модели сферических газовых пор. Согласно [1–4], 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 включают как термическую, так и радиационную составляющую

$$\dot{\varepsilon}_u^c = C\sigma_u^m + D\sigma_u, \quad (2)$$

где  $C, D$  – модули тепловой и радиационной ползучести;  $m$  – показатель тепловой ползучести ( $5 < m < 6$ ). Также при моделировании терморadiационного НДС можно использовать результаты экспериментальных исследований [7, 8], полученные для керамического топлива.

Принимаем, что для определения распухания топливных композиций делящихся материалов можно использовать модель квазистатических газовых пор [3] в предположении, что поры в топливном материале малоподвижны и в среднем имеют одинаковый размер. Таким образом, распухание материала (керметного топлива) подчиняется основным эмпирическим зависимостям, рекомендуемым в [2, 5], в соответствии с решениями интегро-дифференциальных уравнений распухания [4], которые были получены на основе модели сферических ячеек. Альтернативой, заданному распределению распухания керметного топлива, могут служить корреляционные уравнения [3], описывающие распухание карбидов и нитридов урана в зависимости от рабочих параметров и химического состава.

В соответствии с указанными решениями интегро-дифференциальных уравнений распухания [4], при неоднородном по периметру нагреве (1) радиационное распухание цилиндра с внутренними источниками тепловыделения (топливный материал) примет с учетом различных амплитудных значений температур ( $2A=40$  и  $2A=80$ ) вид (рисунок 1)

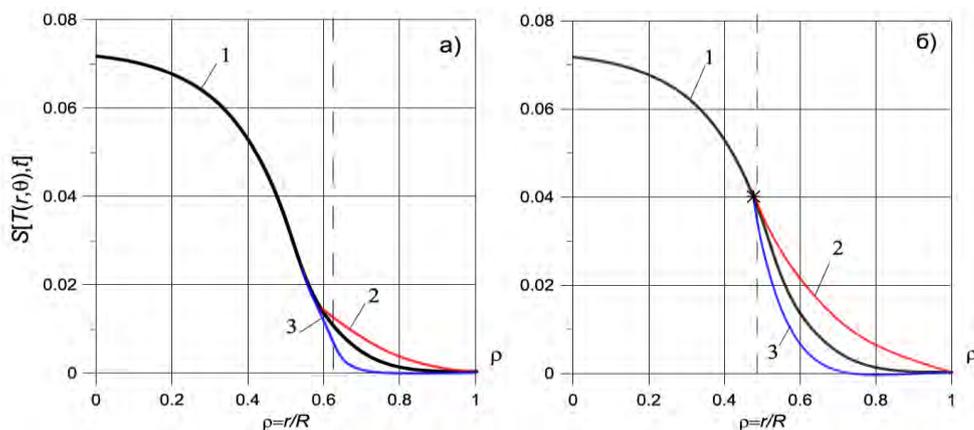


Рисунок 1 – Распределение радиационного распухания за 5000ч в зависимости от окружной координаты ( $1-\theta=0$ ;  $2-\theta=\pi/8$ ;  $3-\theta=3\pi/8$ ) и амплитудного значения неравномерности температур: а)  $A=20$ ; б)  $A=40$

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

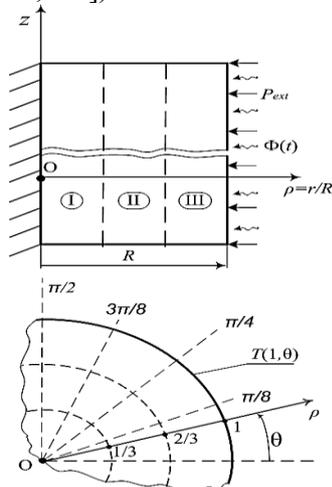


Рисунок 2. – Схема анализа неосесимметричного НДС

*Замечание.* 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 в [4], а также Ю. И. Лихачевым в [2].

Далее, используя методику, изложенную в [5, 7–9], 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 визуализировать результаты расчетов кинетики неосесимметричного НДС цилиндрических тел.

Напряженное состояние длинного сплошного цилиндра с внутренними источниками тепловыделения за 1000ч нагружения для различных амплитудных значений окружной температурной неравномерности представлено на эпюрах рисунков 3–4.

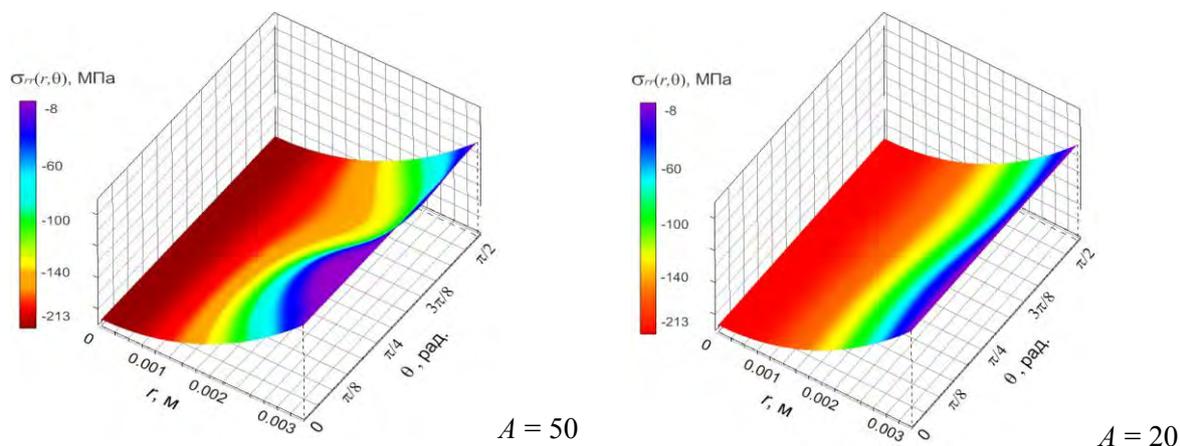


Рисунок 3. – Поверхности радиальных напряжений за 1000 ч нагружения

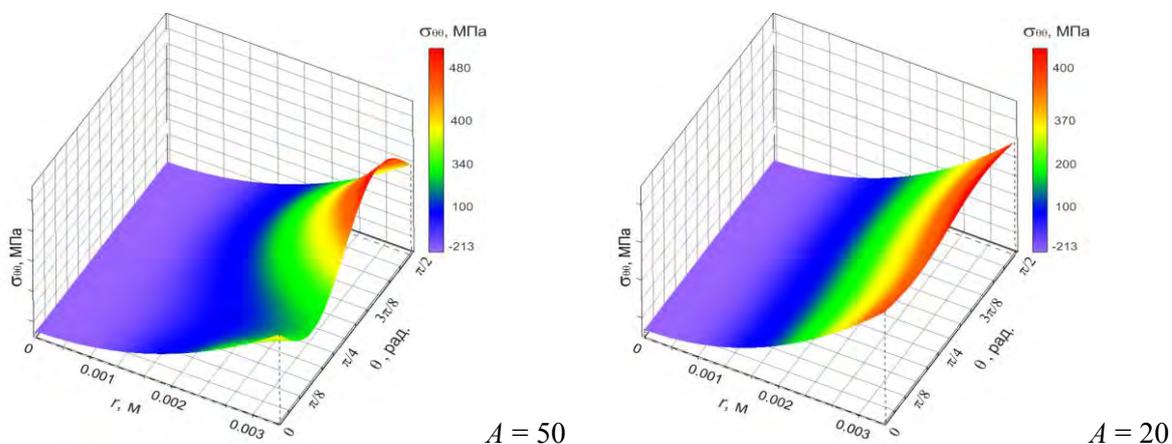


Рисунок 4. – Поверхности окружных напряжений за 1000 ч деформирования

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

Таблица 1 – Изменение радиальных напряжений со временем в зависимости от амплитудного значения температур для  $r/R=2/3$  в горячих и холодных сечениях

$A, ^\circ\text{C}$	$\theta, \text{рад.}$	$\sigma_{rr}, \text{МПа}$				
		$t, \text{ч}$				
		0	500	1000	2000	3000
0	$\pi/8$	-110	-122	-156	-195	-214
	$3\pi/8$	-110	-122	-156	-195	-214
10	$\pi/8$	-109	-121	-156	-195	-214
	$3\pi/8$	-113	-123	-158	-195	-214
20	$\pi/8$	-103	-115	-150	-190	-220
	$3\pi/8$	-116	-130	-162	-202	-227
40	$\pi/8$	-89	-103	-138	-175	-224
	$3\pi/8$	-131	-142	-175	-205	-241
50	$\pi/8$	-70	-100	-125	-160	-235
	$3\pi/8$	-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

$A, ^\circ\text{C}$	$\theta, \text{рад.}$	$\sigma_{\theta}, \text{МПа}$				
		$t, \text{ч}$				
		0	500	1000	2000	3000
0	$\pi/8$	136	150	200	246	306
	$3\pi/8$	136	150	200	246	306
10	$\pi/8$	135	150	200	246	306
	$3\pi/8$	138	151	200	246	306
20	$\pi/8$	130	144	195	243	304
	$3\pi/8$	144	158	207	252	310
40	$\pi/8$	100	115	180	240	301
	$3\pi/8$	150	165	225	270	321

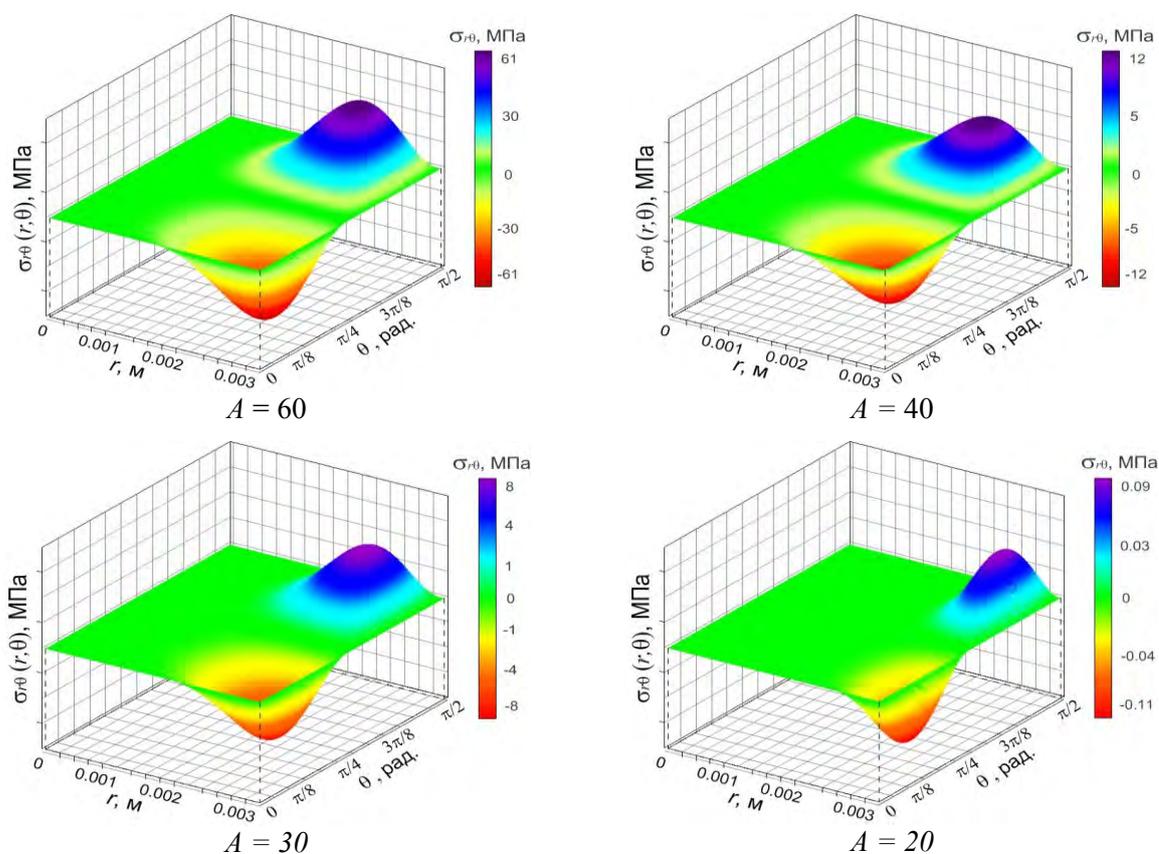


Рисунок 5. – Поверхности распределения касательных напряжений за 1000 ч при различных значениях окружной температурной неравномерности

Исходя из представленной выше кинетики напряженного состояния, можно предположить, что вместе с постоянным ростом напряжений со временем терморadiационного нагружения прослеживается общее снижение неоднородности напряженного состояния по периметру. Как видно из таблицы 1, уровень неравномерности разболтки напряжений прямо пропорционален изменению параметра неосесимметричности  $A$  в законе распределения температуры (1). Неоднородность интенсивности напряжений по периметру также возрастает с увеличением окружной неравномерности (таблица 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 часов деформирования неравномерность напряженного состояния в кольцевом направлении значительно снижается, причем в холодных сечениях уровень напряжений остается несколько выше, чем в горячих.

Закономерность изменения поверхности распределения радиальных напряжений за 500, 2000 и 3000 часов нагружения при значении окружной неравномерности  $A=50$  представлена на рисунке 6 (поверхность радиальных напряжений за 1000 часов показана на рисунке 6).

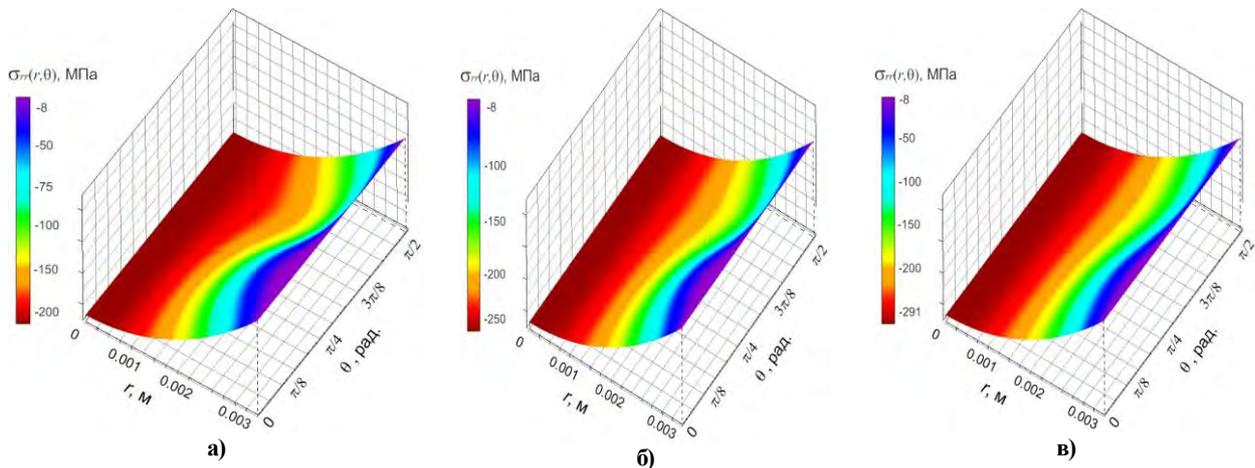


Рисунок 6 – Общий вид изменения поверхности распределения радиальных напряжений за 500ч (а), 2000ч (б) и 3000ч (в) часов нагружения при значении окружной неравномерности  $A=50$

На основании проведенной серии расчетов видно, значительная неоднородность напряжений на начальных этапах нагружения ( $t = 0 \dots 500$ 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 достигается для сечений  $\theta = \pi/8$  и  $\theta = 3\pi/8$  радиальной плоскости. Особенно сильно неравномерность напряжений проявляется на среднем ( $1/3 \leq \rho \leq 2/3$ ) и внешнем ( $2/3 \leq \rho \leq 1$ ) участках. В тоже время, на внутреннем интервале ( $0 \leq \rho \leq 1/3$ ) распределение напряжений близко к осесимметричному. С течением времени ( $0 \dots 3000$ 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 (таблица 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.

Эпюры изменения полной окружной деформации по периметру сплошного цилиндра при  $A=50$  для 3000ч и 5000ч терморadiационного нагружения представлены на рисунке 7.

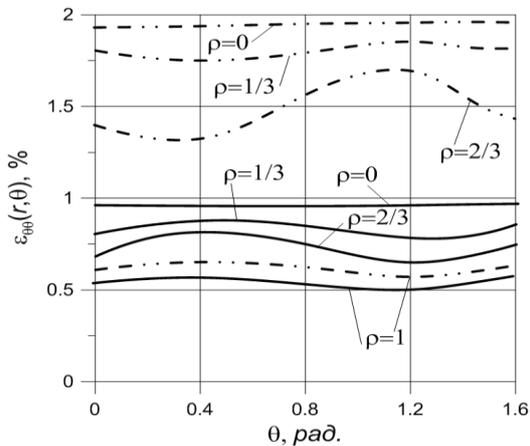


Рисунок 7 – Изменение окружных деформаций по периметру сечения со временем: \_\_\_\_\_ – 3000ч; ---- - 5000ч

Можно предположить, что при  $t=1000 \dots 3000$ ч неравномерность деформаций обусловлена действием неоднородного радиационного распухания в различных точках сечения по окружному направлению, которое на рисунке 1 особенно заметно на центральном ( $1/3 \leq \rho \leq 2/3$ ) и внешнем ( $2/3 \leq \rho \leq 1$ ) участках. В дальнейшем ( $t=3000 \dots 5000$ ч), действующие напряжения вызывают значительные дополнительные деформации терморadiационной ползучести по периметру сечения, скорость которых изменяться в первую очередь с градиентом неосесимметричности нагрева (1). Совместное действие радиационного распухания и ползучести приводит к необратимому формоизменению, которое при  $t=5000$ ч достигает максимальных величин.

В этой связи окружное изменение температур только способствует усилению неравномерности распределения деформаций по периметру сечения тепловыделяющего цилиндра со временем. В первую очередь такое усиление осуществляется за счет влияния на механизмы набухания и термической ползучести, причем амплитуда неоднородности деформаций в кольцевом направлении наибольшая для III участка ( $2/3 \leq \rho \leq 1$ ). 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 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 равной 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 значение амплитудное значение неравномерности температур при котором необходимо использовать теорию неосесимметричного НДС составляет  $2A = 40$ . При  $2A > 40$  осесимметричная модель в целом дает неудовлетворительные результаты: характерно увеличение сжимающих напряжений в горячих сечениях, а также уменьшение растягивающих в холодных сечениях на внешнем участке. В то время как по неосесимметричной модели происходит некоторое снижение терморadiационных напряжений по абсолютной величине в горячих сечениях, в тоже время 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 тоже 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 набухание. Учет этой неоднородности, появляющейся в увеличении объемной деформации, и снижает максимальные сжимающие напряжения до 30%. С одной стороны такое снижение максимальных напряжений при неупругой работе материала, позволяет повысить допустимую величину терморadiационной нагрузки, но с другой стороны необходимо следить, чтобы растягивающие напряжения, возникающие при данном значении флюенса и температуры, не приводили бы к разрушению тела в зоне растяжения. Следует отметить, 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, т.к. последние определяют набухание 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 детальное численное исследование в более широких диапазонах изменения неравномерного поля температур и радиационных нагрузок,

которое не подвергалось подробному исследованию. Однако даже несколько примеров расчетов показали, что это влияние значительно и требует отдельного изучения.

## РЕЗЮМЕ

Общий случай неосесимметричного терморadiационного НДС значительно отличается от осесимметричного, а решение неосесимметричной задачи деформирования не может быть заменено решением ряда осесимметричных задач в соответствующих меридиональных сечениях. Если рассмотренные в [2, 4, 5, 14] модели НДС 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 НДС вполне точно описывает объект исследований, приводя к допустимым значениям ошибки. Достоверность результатов решения тестовых и модельных задач подтверждена совпадением их с известным аналитическим решением [15], частично с результатами натуральных 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. - (Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ-3999/4)
4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин. - Минск: Наука и техника, 1984. - 104с.
5. Olander, D. R. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements/ D.R. Olander. - USA: Technical Information Center Energy Research and Development Administration, 1976. - 720p.
6. Тутнов, А. А. Математическое моделирование поведения теплофизических, прочностных и надежностных характеристик твэлов энергетических реакторов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.03 / А.А. Тутнов, Рос. науч. центр "Курчат. Ин-т", Ин-т реактор. технологий и материалов. - М., 1998. - 54 с.
7. Мальгин, В. Б. Разработка модели радиационной ползучести керамического топлива на основе расчетно-экспериментальных исследований: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / В.Б. Мальгин. - М., 1979. - 142 л.
8. Павлий, К. В. Радиационная ползучесть диоксида урана применительно к переходным и базовым режимам эксплуатации ТВЭЛА ВВЭР: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07/ К.В. Павлий. - Ташкент, 1989. - 152 л.
9. Ширвель, П.И. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению/П.И. Ширвель, И.С. Куликов // Республиканский межведомственный сборник «Машиностроение», Минск, 2008. Вып.24. Том 1. С.185-191.
10. Ширвель, П.И. Решение неосесимметричной задачи термоупругости для неравномерно нагретого длинного цилиндра в условиях ползучести /П.И. Ширвель, И.С. Куликов// Научно-технический журнал «Вестник Белорусского национального технического университета», Минск, 2009 – №4. – С.75-80.
11. 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. — 300 с. — ISBN 978-985-6637-21-9.
12. Ширвель, П.И. Модель расчета неосесимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях пластичности и ползучести /П.И. Ширвель, И.С. Куликов// Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук, Минск, 2012 –№4. – С.51-62.
13. Ширвель, П.И. Определение неосесимметричного НДС длинного сплошного цилиндра в условиях ползучести и облучения / П.И. Ширвель // «Математическое моделирование и краевые задачи»: тр. VII Всероссийской науч. конф. с междунар. участием, Самара, 3–6 июля 2010 г.: в 2 ч. – Самара: СамГТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 395–398.
14. Ширвель, П.И. Решение радиационно-термоупругой задачи для сплошного цилиндра / П.И. Ширвель // Республиканский межведомственный сборник научно-технических статей «Теоретическая и прикладная механика», Минск, 2008. – Вып.23. – С.55-63.
15. Гейтвуд, Б. Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, снарядам, турбинам и ядерным реакторам / Пер. с англ. М. Ф. Диментберга [и др.]. – М.: Изд. иностр. лит., 1959. – 349 с.

## SUMMARY

*A mathematical model for the determination of temperatures, strains and stresses in a rod fuel element at stationary conditions has been tested. The simulation of  $2D(r,\theta)$  deformation asymmetric task have been construction. The mechanical models for describe asymmetric steady stress-strain state of the nuclear reactor's fuel pin ( $40\%UO_2+60\%Cr$ ) are calculated. The analysis of the mechanisms of nonlinear asymmetric deformation for cylindrical bodies was produced. Optimization performance characteristics of quasistatic loading of fast neutron flux and establish the optimal properties of the irreversible deformation processes for asymmetric stress/strain state have been done. The computer program for decision this task has been programmed. Graphic distributions of stress and strain surfaces have been received. The obtained results can be used in the design and development of a wide class of problem for power engineering and nuclear power.*

Поступила в редакцию 06.08.2013