

АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЮЩИХСЯ В КАЧЕСТВЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Руководитель темы: Д.Н. Пузанов

Автор доклада: А.А. Сатин

Аннотация

В настоящей работе выполнен анализ и обобщение имеющихся данных по физическим и механическим свойствам циркониевых сплавов Э110 и Э635, применяющихся в качестве конструкционных материалов элементов ТВС. Показано, что в некоторых случаях формулы расчета радиационной ползучести сплава Э110, полученные по результатам испытаний твэльных оболочек, не применимы к описанию ползучести в продольном направлении направляющих каналов, изготовленных из сплава Э110.

Введение

Одними из наиболее важных критериев, определяющих безопасность ядерного топлива, являются геометрическая стабильность и прочность ТВС во время эксплуатации, которая обосновывается экспериментальными и расчетными методами. Достоверность, полученных при расчетном обосновании результатов, зависит не только от адекватности используемых расчетных моделей, но и от точности используемых в расчетах исходных данных, в частности данных по свойствам конструкционных материалов. При выполнении термомеханических расчетов ТВС особую важность представляют данные по скоростям радиационной ползучести и радиационному росту конструкционных материалов.

Основными конструкционными материалами элементов ТВС являются циркониевые сплавы Э110 и Э635. Для оболочечных твэльных труб имеется большая база данных по сплаву Э110. Данные по исследованию свойств сплава Э110 в составе труб для направляющих каналов отсутствуют, для дистанционирующих решеток – ограничены. Свойства опытных партий труб из сплава Э635 определены в ограниченном диапазоне изменения температур. Данные по свойствам циркониевых сплавов разрознены и зачастую плохо согласуются.

Приведенные в настоящей работе данные о свойствах сплавов Э110 и Э635 получены по результатам экспериментальных работ, выполненных в ВНИИНМ, РНЦ КИ, ФЭИ, НИИАР.

1. Обобщение физико-механических свойств циркониевых сплавов.

1.1. Теплопроводность

Для определения коэффициента теплопроводности сплавов Э110 и Э635 в диапазоне температур 20-1000 °С при обобщении имеющихся данных методом наименьших квадратов получена зависимость

$$\lambda = \sum_0^4 A_j \cdot T^j, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); $j=0,1,2,3,4$ – нумерация констант (нижний индекс), равный показателю степени температуры (верхний индекс).

Коэффициенты полинома (формула (1)) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов полинома

Обозначение коэффициента	Значение	
	Э110	Э635
A_0	17,25836558	13,40589
A_1	0,01370153	$4,419138 \cdot 10^{-3}$
A_2	$-4,009690688 \cdot 10^{-5}$	$1,992045 \cdot 10^{-5}$
A_3	$5,661085097 \cdot 10^{-8}$	$-9,994949 \cdot 10^{-8}$
A_4	$-2,061461183 \cdot 10^{-11}$	$1,287879 \cdot 10^{-10}$

1.2. Удельная теплоемкость сплавов Э110 и Э635

При определении функциональных зависимостей удельной теплоемкости температурный диапазон разбивался на два интервала:

- температурный интервал 100-700 °С;
- температурный интервал 700-1000 °С.

Для определения удельной теплоемкости сплавов Э110 и Э635 от температуры методом наименьших квадратов при обобщении имеющихся экспериментальных данных получены зависимости:

$$C_p = \sum_0^3 A_j \cdot T^j, \text{ при температуре от } 100 \text{ до } 700 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$C_p = \sum_0^3 B_j \cdot T^j, \text{ при температуре от } 700 \text{ до } 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

где C_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C); $j = 0, 1, 2, 3$ – нумерация констант (нижний индекс), равный показателю степени температуры (верхний индекс).

Коэффициенты полиномов (формулы (2)-(3)) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение коэффициента	Значения коэффициентов полинома	
	Э110	Э635
A_0	0,249	$2,315 \cdot 10^{-1}$
A_1	$3,512 \cdot 10^{-4}$	$8,090 \cdot 10^{-4}$
A_2	$-5,643 \cdot 10^{-7}$	$-1,750 \cdot 10^{-6}$
A_3	$6,667 \cdot 10^{-10}$	$1,355 \cdot 10^{-9}$
B_0	3,5	-
B_1	$-1,148 \cdot 10^{-2}$	-
B_2	$1,460 \cdot 10^{-5}$	-
B_3	$-6,333 \cdot 10^{-9}$	-

1.3. Коэффициент термического расширения сплавов Э110 и Э635

КТР сплава Э635 в интервале температур 20 – 400 °C изменяется от 5,5 до $5,8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Экспериментальные данные по КТР сплава Э110 в диапазоне температур 100-700 °C интерполировались по методу наименьших квадратов линейной функцией

$$\alpha = A + B \cdot T, \quad (4)$$

где α – КТР, 10^{-6} град⁻¹; $A=5,671428571$; $B=0,001571428571$

1.4. Модуль Юнга

Модуль упругости сплава характеризует силу взаимодействия атомов в решетке матрицы и зависит от легирующего и примесного состава сплава, его текстуры и деформационно-термического состояния. Все промышленные циркониевые сплавы при комнатной температуре имеют приблизительно равные значения модуля Юнга от 91 до 97 ГПа.

При определении функциональных зависимостей модуля Юнга сплава Э110 температурный диапазон разбивается на три интервала;

- температурный интервал 20-890 °C (область α и ($\alpha+\beta$) фаз сплава Э110);
- температурный интервал 890-920 °C (область перехода ($\alpha+\beta$) в β фазу сплава Э110);
- температурный интервал 920-1300 °C (область β фазы сплава Э110).

При определении функциональных зависимостей модуля Юнга сплава Э635 температурный диапазон разбивался на три интервала;

- температурный интервал 20-900 °C;
- температурный интервал 900-1000 °C;
- температурный интервал 1000-1200 °C.

Экспериментальные данные по модулю Юнга для сплавов Э110 и Э635 интерполировались функциями.

$$E = A_1 + B_1 \cdot T, \quad (5)$$

$$E = A_2 + B_2 \cdot T, \quad (6)$$

$$E = A_3 + B_3 \cdot T + C_3 \cdot T^2, \quad (7)$$

где $A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3, C_3$ – константы.

Интервалы температур, в которых применимы формулы (5)-(7), приведены в таблице 3

Таблица 3

Интервалы температур		Формула
Интервал температур, °C		
Э110	Э635	
20-890	20-900	(5)
890-920	900-1000	(6)
920-1300	1000-1200	(7)

Значения коэффициентов полиномов в формулах (5), (6) и (7) представлены в таблицах 4 и 5 для

Значения коэффициентов в полиномах для сплава Э110

Коэффициент	Значение		
	формула (5)	формула (6)	формула (7)
<i>A</i>	$95,628 \cdot 10^3$	$-374,333 \cdot 10^3$	$-27,255 \cdot 10^3$
<i>B</i>	-62	466,7	160
<i>C</i>	–	–	-0,077

Значения коэффициентов в полиномах для сплава Э635

Коэффициент	Значение		
	формула (5)	формула (6)	формула (7)
<i>A</i>	$93,71 \cdot 10^3$	$-63 \cdot 10^3$	$-128 \cdot 10^3$
<i>B</i>	-56	120	335
<i>C</i>	–	–	-0,15

1.5. Коэффициент Пуассона

Анализ имеющихся данных показывает, что для сплава Э635 и особенно для сплава Э110 наблюдается немонотонная температурная зависимость коэффициента Пуассона. Среднее значение коэффициента Пуассона для сплава Э110 в диапазоне температур от 20 до 700 °С равно 0,38, для сплава Э635 в диапазоне температур от 20 до 800 °С равно 0,34. Так как при выполнении расчетов прочности и деформированного состояния элементов ТВС, выполненных из сплавов Э110 и Э635, характер напряженного деформированного состояния, как правило, практически не зависит от конкретных значений коэффициента Пуассона из диапазона от 0,32 до 0,41, то возможно использование средних значений коэффициента Пуассона

1.6 Предел прочности, предел текучести, остаточная деформация

Наиболее достоверные данные по пределу прочности, пределу текучести, остаточной деформации для оболочечных труб из сплава Э110 и приведены в [1]. Данные по сплаву Э635 ограничены и приведены в таблице 6.

Свойства сплава Э635 в продольном и поперечном направлениях

Температура, °С	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Общая деформация, %
в продольном направлении			
20	441-490	294-333	36-46
380	255-274	137-167	39-50
в поперечном направлении			
20	451-510	392-490	26-36
380	225-274	206-245	28-40

2. Обобщение и анализ данных по термической и радиационной ползучести и радиационному росту

2.1 Термическая ползучесть

2.1.1 Зависимость скорости термической ползучести сплава Э110 от температуры, напряжения и размера зерна

По результатам испытаний на растяжение проведенных в ВНИИНМ, НИИАР и МИФИ получена зависимость $\dot{\epsilon}_{\text{экс}}$ (ч⁻¹) от температуры T (К), напряжения $\sigma_{\text{экс}}$ (МПа) и размера зерна d (м):

$$\dot{\epsilon}_{\text{экс}} = 2,88 \cdot 10^{25} \frac{\sigma_{\text{экс}}^5}{TG_c^4} e^{\frac{-30070}{T}} + 1,72 \cdot 10^{22} \frac{\sigma_{\text{экс}}^7}{TG_c^6} e^{\frac{-18040}{T}} + 8,46 \cdot 10^2 \frac{\sigma_{\text{экс}}}{d^2 T} e^{\frac{-30070}{T}} + 6,69 \cdot 10^{-10} \frac{\sigma_{\text{экс}}}{d^3 T} e^{\frac{-18040}{T}} \quad (8)$$

Существенное отклонение формулы (8) от эксперимента наблюдается лишь при больших нагрузках и связанных с ними больших деформациях. Объясняется это тем, что фактические напряжения в этих случаях уже нельзя определять по исходной площади поперечного сечения образцов.

2.1.2 Зависимости скорости термической ползучести сплава Э110 от температуры и напряжения

Уравнения состояния сплава Э110 получены по результатам экспериментальных исследований в диапазоне напряжений от 9 до 145 МПа и температур от 300 до 1500 К, включающем интервал фазового превращения сплава[2]:

1) для α -области (температура до 883 К)

в диапазоне напряжений от 9 до 32 МПа

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = 7,1 \cdot 10^5 \cdot \sigma_{\text{экв}}^{2,2} \cdot \exp(-28900 / T), \quad (9)$$

в диапазоне напряжений от 32 до 90 МПа

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = 26 \cdot \sigma_{\text{экв}}^{5,1} \cdot \exp(-28900 / T), \quad (10)$$

при более высоких напряжениях

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = 2 \cdot 10^9 \cdot \exp(0,05 \cdot \sigma_{\text{экв}}) \cdot \exp(-28900 / T), \quad (11)$$

2) для β области (температура выше 1173 К):

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = 0,09 \cdot \sigma_{\text{экв}}^{3,5} \cdot \exp(-13200 / T), \quad (12)$$

3) для $(\alpha + \beta)$ области (883 < T < 1173 К)

при 883 < T < 1070 К (относительная массовая доля β -фазы менее 10%) рекомендуется использовать модель параллельного соединения фаз, которая приводит к сумме напряжений каждой фазы

$$\sigma_{\text{экв}} = f_{\alpha} \cdot \sigma_{\alpha} + f_{\beta} \cdot \sigma_{\beta}, \quad (13)$$

при 1070 < T < 1173 К модель последовательного соединения фаз, которая приводит к сумме скоростей деформации каждой фазы

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = f_{\alpha} \cdot \dot{\epsilon}_{\alpha} + f_{\beta} \cdot \dot{\epsilon}_{\beta}, \quad (14)$$

где f_{α} , f_{β} – объемные доли α - и β -фазы; σ_{α} , σ_{β} – напряжения в α - и β -фазе,

$\dot{\epsilon}_{\alpha}$, $\dot{\epsilon}_{\beta}$ – скорости деформации α - и β -фаз.

Расчет скорости ползучести при температурах от 200 до 1000 °С по формулам (9)-(14) представлен на рисунке 1.

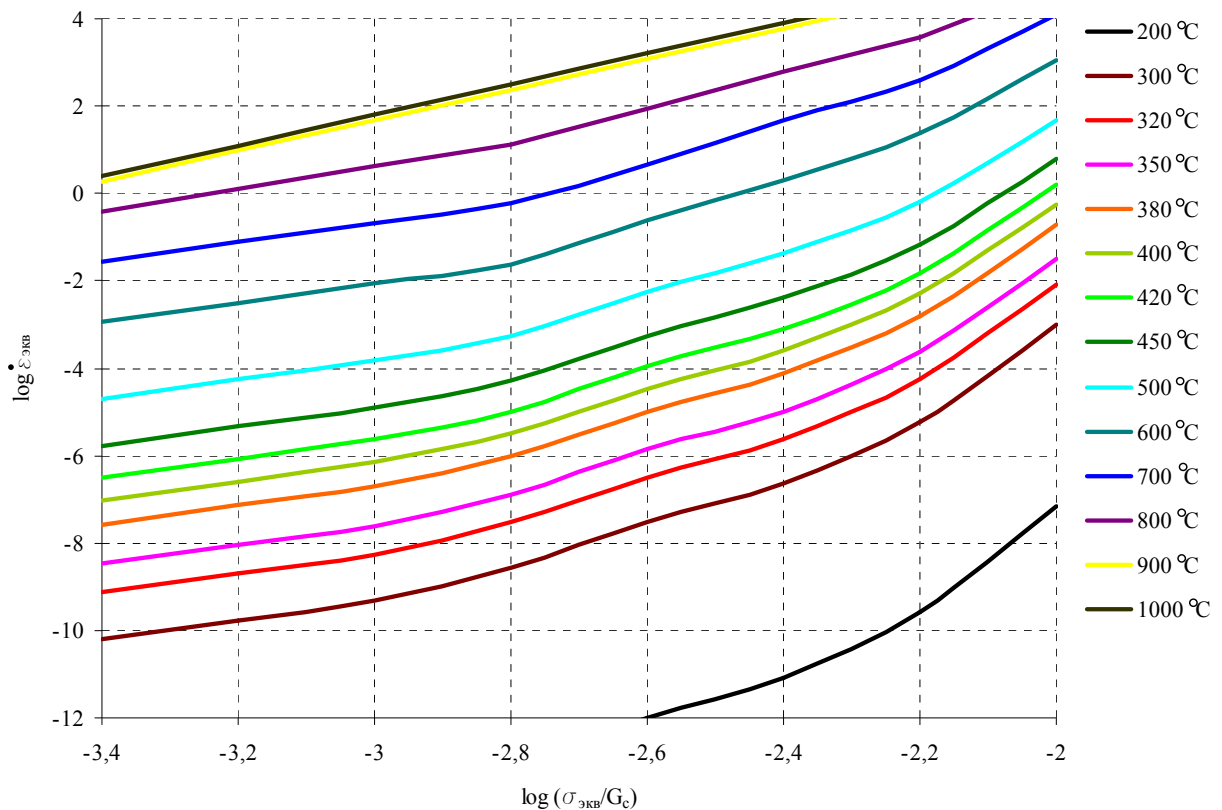


Рис. 1 – Расчётные зависимости эквивалентной скорости ползучести $\dot{\epsilon}_{\text{экв}}$ от относительного эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}} / G_c$ для температур от 200 до 1000 °С

В работе [3] для расчета ползучести при высоких температурах (от 610 °С) рассматривается также система формул:

1) для $(\alpha + \beta)$ -области при температуре от 610 до 910 °С, массовая доля β -фазы менее 10 %;

$$\dot{\epsilon}_{\text{экв}} = 5,01 \cdot 10^{11} \cdot \sigma_{\text{экв}}^{2,55} \cdot \exp(-35000 / T) \quad (15)$$

1) для $(\alpha + \beta)$ -области при температуре от 610 до 910 °С, массовая доля β -фазы более 10 %;

$$\dot{\varepsilon}_{\text{экв}} = 4,01 \cdot 10^5 \cdot \sigma_{\text{экв}}^{22} \cdot \exp(-18000 / T) \quad (16)$$

2) для β -области при температуре выше 910 °C

$$\dot{\varepsilon}_{\text{экв}} = 9,4 \cdot 10^2 \cdot \sigma_{\text{экв}}^{4,5} \cdot \exp(-18000 / T) \quad (17)$$

В рамках настоящей работы проведено сравнение результатов, полученных по формулам (8)-(17), с результатами испытания макета УТВС в режиме температурной имитации аварии с потерей теплоносителя на стенде испытаний ТВС в аварийных режимах, проведенных в ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Для тестирования формул (8)-(17) выполнены расчеты раздутия оболочки твэла методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS [4].

Температура твэла принималась равной средней температуре по центральной части ТВС во время испытаний. В расчете рассмотрено следующее изменение температуры ТВС:

- разогрев от 400 до 650 °C в течении 5 ч;
- выдержка при температуре 650 °C в течении 6 ч;
- охлаждение от 650 до 400 °C в течении 3 ч.

Нагружение осуществлялось давлением, прикладываемым к внутренней поверхности твэлов. Изменение внутреннего объема твэла при разогреве не учитывалось.

На рисунке 2 представлены результаты расчета перемещений и деформаций оболочки твэла в процессе испытаний по высокотемпературному нагружению УТВС, полученные с использованием формул (9)-(14).

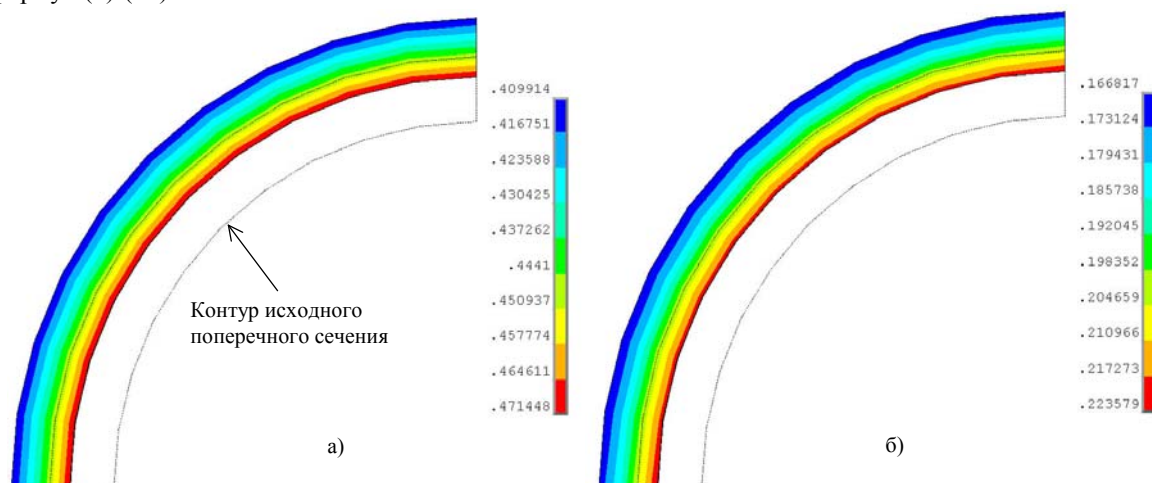


Рис 2 – Распределение радиальных перемещений (а) в мм и окружных остаточных деформаций (б) в %

По результатам расчета по формулам (9)-(12) наружный диаметр твэла увеличился до 9,92 мм, что хорошо согласуется с результатами испытаний по раздутию оболочек.

Полученные результаты показывают, что для расчетов высокотемпературной деформации оболочек твэлов при температурах порядка 650 °C и больших временах нагружения наиболее пригодными являются формулы (9)-(14). При этом наилучшее совпадение с экспериментом дает зависимость (12), что косвенно свидетельствует о преобладании β -фазы в условиях эксперимента. Другие зависимости не позволяют описать ползучесть сплава Э110 в этих условиях качественно.

2.2 Радиационные ползучесть и рост сплавов Э110 и Э635

2.2.1 Радиационная ползучесть сплавов Э110 и Э635

Для расчета скорости радиационной ползучести сплава Э110 в работе [3] предлагаются формулы

$$\dot{\varepsilon}_{pn} = 2,34 \cdot 10^{-18} \cdot f \cdot \sigma_{\text{экв}} \cdot \exp(-6000 / T) \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pn} = 1,05 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot \sigma_{\text{экв}} \cdot \exp(-13000 / T) \quad (19)$$

Для расчета скорости радиационной ползучести сплава Э635 в работе [3] предлагаются формулы

$$\dot{\varepsilon}_{pn} = 0,361 \cdot 10^{-18} \cdot f \cdot \sigma_{\text{экв}} \cdot \exp(-6000 / T) \quad (20)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pn} = 0,233 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot \sigma_{\text{экв}} \cdot \exp(-13000 / T) \quad (21)$$

где f - поток быстрых нейтронов, $1/(c \cdot \text{см}^2)$.

2.2.2 Радиационный рост сплавов Э110 и Э635

В [3] даны зависимости радиационного роста от флюенса быстрых нейтронов для сплава Э110:

1) при флюенсе $\Phi \leq 210^{22} \text{ см}^{-2}$

$$\varepsilon_{pp} = 10^{23} \cdot \Phi \quad (22)$$

2) при флюенсе $\Phi > 210^{22} \text{ см}^{-2}$

$$\varepsilon_{pp} = 6,7 \cdot 10^{23} \cdot (\Phi - 2 \cdot 10^{22}) \quad (23)$$

В [3] даны зависимости радиационного роста от флюенса быстрых нейтронов для сплава Э635:

$$\varepsilon_{pp} = 0,48 \cdot 10^{23} \cdot \Phi \quad (24)$$

2.2.3 Сравнение зависимостей для расчета радиационного роста и ползучести

Тестирование зависимостей (18)-(24) выполнялось путем расчета изменения длины направляющих каналов в ходе эксплуатации по программе FAME_N1, разработанной в ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

В результате расчетов УТВС по программе FAME_N1 с использованием формул (18), (22), (23) получено, что направляющие каналы УТВС укорачиваются, а при использовании формул (19), (22), (23) направляющие каналы удлиняются. Полученные результаты можно подтвердить аналитическими расчетами.

Удлинение направляющих каналов в процессе эксплуатации для УТВС противоречит результатам послереакторных исследований. Это объясняется тем, что для сплава Э110 скорость радиационной и термической ползучести преобладают над скоростью радиационного роста. Следовательно, можно сделать вывод, что комбинация формул (18), (22), (23) более адекватно описывает радиационную ползучесть циркониевых сплавов при расчете продольной деформации твэлов и направляющих каналов по сравнению с комбинацией формул (19), (22), (23) на примере расчета УТВС, где направляющие каналы сделаны из сплава Э110.

На рисунке 3 приведены результаты расчета изменения длины направляющего канала для ТВС различных конструкций, полученные по программе FAME_N1 с использованием формул (18), (20), (22)-(24). Полученные результаты не только качественно, но и количественно согласуются с данными послереакторных исследований.

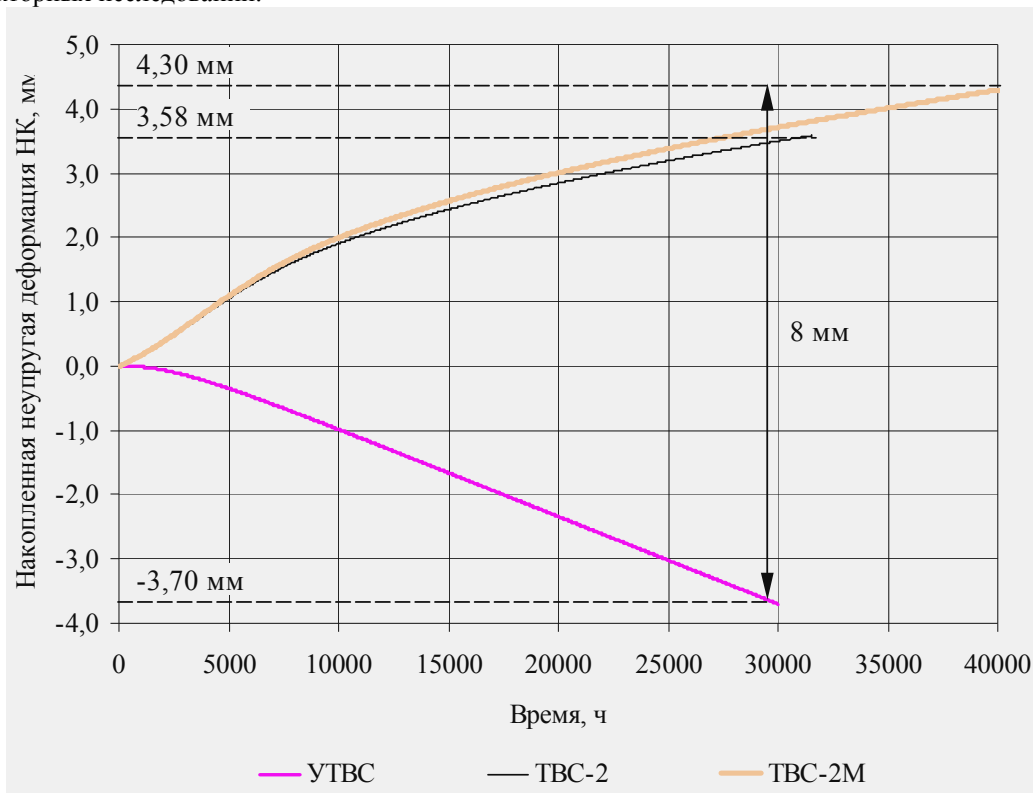


Рис. 3 – Результаты расчетов изменения средней длины направляющих каналов для УТВС, ТВС-2 и ТВС-2М

Заключение

В работе проведен анализ и обобщение данных по механическим и тепло-физическим свойствам циркониевых сплавов Э110 и Э635.

В данной работе приводятся данные для сплавов Э110 и Э635, позволяющие определить:

- теплопроводность;
- удельную теплоемкость;
- коэффициент термического расширения;
- модуль Юнга;
- коэффициент Пуассона;

Приведены данные по скорости термической и радиационной ползучести сплавов Э110 и Э635, а

также соотношения, позволяющие оценить радиационный рост этих сплавов. С помощью расчетного анализа выполнена оценка предлагаемых формул для использования их при расчетах термомеханического поведения ТВС различных конструкций в режимах нормальной эксплуатации, а также в условиях высокотемпературной ползучести твэльных оболочек. По результатам расчетного анализа даны рекомендации по выбору формул, описывающих радиационный рост и радиационную ползучесть, а также температурную ползучесть циркониевых сплавов.

Для повышения достоверности результатов расчетов термомеханического поведения и прочности ТВС необходимо провести ревизию доступных на данный момент свойств циркониевых сплавов и сформировать единую отраслевую базу данных по материалам. При этом необходимо иметь данные по свойствам материалов для всей номенклатуры заготовок из циркониевых сплавов, используемых в конструкции ТВС.

Результаты работы могут быть использованы при проведении расчетов на прочность тепловыделяющих сборок и их элементов в проектных режимах, как в условиях нормальной эксплуатации, так и при проектных авариях.

Благодарности

Автор выражает благодарность руководителю работы Д.Н. Пузанову, а также С.А. Кушманову, Д.В. Кузнецову, В.М. Махину и П.Б. Докину за ценные рекомендации и конструктивную критику.

Список литературы

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. Москва, Энергоатомиздат, 1989
2. Пирогов Е.Н., Алымов М.И., Артюхина Л.Л. Ползучесть сплава Н-1 в области полиморфного превращения. Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 4, с.293-294.
3. Кузнецов Д.Н. и др. Ключевые свойства циркониевых сплавов, определяющие прочность и геометрическую стабильность бесчехловых ТВС. Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы ядерной техники». ВНИИНМ, Туапсе, 26 сентября – 2 октября, 2010
4. Программный комплекс для ПЭВМ. Программный комплекс для решения термомеханических задач методом конечных элементов. ANSYS, ANSYS Mechanical, v 7.1, CADFEM GmbH, 2003.
5. Программа для ПЭВМ. Расчет термомеханического поведения одиночной бесчехловой тепловыделяющей сборки в нормальных условиях эксплуатации FAME_N1. Отчет о верификации, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2009