

УДК 621.039.56

## ЛЕГКОВОДНЫЙ РЕАКТОР СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И $(\text{Th-U})\text{O}_2$ ТОПЛИВОМ: УМЕНЬШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ ПО ТЕПЛОНОСИТЕЛЮ

**Е.Г. Куликов, А.Н. Шмелев, Г.Г. Куликов**

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),  
г. Москва*



Осуществляется поиск путей подавления температурного коэффициента реактивности (ТКР) в центральной части активной зоны легководного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя. С этой целью предлагается добавление небольших количеств  $^{241}\text{Am}$ , который способен значительно уменьшить ТКР по величине. Демонстрируется возможность обеспечить отрицательные и небольшие по величине ТКР во всех частях активной зоны на протяжении всей кампании.

### ВВЕДЕНИЕ

Созданный в 2001 г. международный форум «Generation IV» выдвинул инновационные концепции реакторных технологий. Соглашение, подписанное участниками этого форума, предусматривает создание шести типов реакторов нового поколения. Среди них значится легководный реактор, охлаждаемый водой с сверхкритическими параметрами [1].

Одним из основных преимуществ такого реактора является высокое значение коэффициента полезного действия, которое может достигать 45% [2]. Теплоноситель – легкая вода – имеет значительный перепад температур по высоте активной зоны: от 280 на входе в активную зону до 500°C на выходе из активной зоны (в ряде работ рассматривается температура теплоносителя на выходе из активной зоны ~ 530÷550°C [3] и даже 625°C [2]). Плотность и энтальпия легкой воды в этом диапазоне температур представлены на рис. 1 (теплоноситель находится под давлением 25 МПа).

Подогрев теплоносителя составляет более 200°C, а его плотность изменяется от 0,78 до 0,09 г/см<sup>3</sup>. Причем в области температур 360÷390°C плотность теплоносителя изменяется особенно быстро: от 0,6 до 0,2 г/см<sup>3</sup>. Такие сильные изменения плотности теплоносителя, которые приходятся на центральную часть активной зоны, способны вызывать значительные изменения реактивности, что ухудшает безопасность реактора [4]. Это является серьезной проблемой легководного

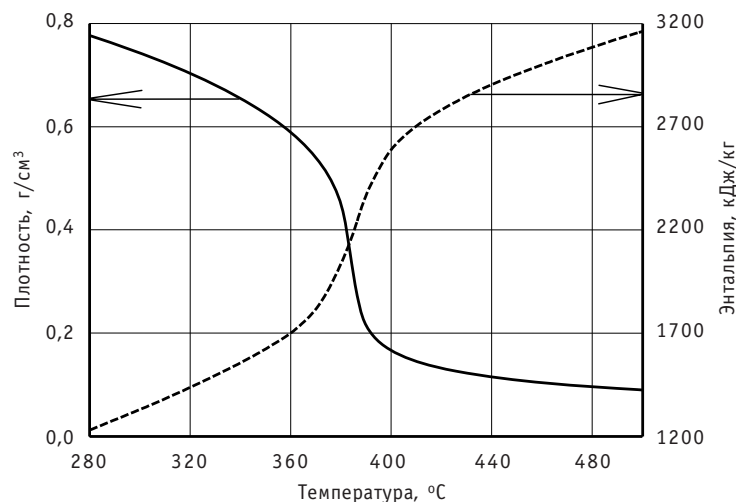


Рис. 1. Свойства воды при давлении 25 МПа

реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя. В настоящей работе осуществляется поиск путей ее решения за счет изменения нуклидного состава топлива.

В работе [2] уже рассматривалось использование  $UO_2$ -, а также МОХ-топлива в таком реакторе. В [5] показано, что смешанное  $(Th-U)O_2$  топливо в сверхкритическом легководном реакторе оказывается предпочтительнее топлива на основе только тория или только урана с точки зрения воспроизводства и достижимых выгораний. В этой связи здесь рассматривается именно смешанное  $(Th-U)O_2$  топливо.

Следуя далее [5], условно разделим активную зону реактора по высоте на три части: нижняя часть со средней плотностью теплоносителя  $\gamma_{Т/Н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ , центральная часть ( $\gamma_{Т/Н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ) и верхняя часть активной зоны ( $\gamma_{Т/Н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ ). Заметим, что при таком рассмотрении параметры теплоносителя в нижней части активной зоны схожи с условиями охлаждения в реакторе типа ВВЭР.

Как отмечено выше, из-за резкого изменения плотности теплоносителя в центральной части активной зоны возможен значительный по величине коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, в дальнейшем именуемый как температурный коэффициент реактивности (ТКР). Проведем рассмотрение постепенно для всех выделенных частей активной зоны по высоте, начиная с нижней.

В [3] упоминается, что коэффициент реактивности по плотности теплоносителя является одной из проблем сверхкритических легководных реакторов и способен привести к нестабильности реакторной установки; в [2] предполагается обеспечить отрицательные величины основных коэффициентов реактивности за счет выбора шага решетки, обогащения топлива и прокачки теплоносителя в различных направлениях. Однако ничего не говорится о величинах ТКР, которые как будет показано далее, могут быть весьма существенными.

### ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ( $\gamma_{Т/Н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ )

Во всех последующих расчетах ТКР вычисляется следующим образом: определяется уменьшение коэффициента размножения, отвечающее 10-процентному уменьшению плотности теплоносителя и используется известная формула вида:

$$\text{TKP} = \frac{K_{\infty} - K'_{\infty}}{T - T'}, \quad (1)$$

где  $K_{\infty}$  – коэффициент размножения при исходной температуре теплоносителя;  $K'_{\infty}$  – коэффициент размножения при температуре теплоносителя, соответствующей 10-процентному уменьшению его плотности;  $T$  – исходная температура теплоносителя;  $T'$  – температура теплоносителя, соответствующая 10-процентному уменьшению его плотности.

Как видно из рис. 2 (а), ТКР зависит от доли  $^{238}\text{U}$  в смешанном  $(\text{Th-U})\text{O}_2$  топливе. Так, при использовании топлива на основе тория, ТКР достаточно заметно уменьшается по модулю. Таким образом, вводимая доля  $^{238}\text{U}$  может являться одним из механизмов воздействия на величину ТКР.

Выберем топливную композицию, ориентируясь не на величину ТКР, а на достижение максимальных выгораний. В [5] показано, что топливная композиция, в которой отношение доли  $^{232}\text{Th}$  к доле  $^{238}\text{U}$  составляет около 3:1, обеспечивает максимальное воспроизводство и наибольшие значения выгорания (по сравнению с топливными композициями, в которых доли  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  другие или один из нуклидов отсутствует в принципе).

В той же работе для нижней части активной зоны (средняя плотность теплоносителя  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ) предлагается использовать топливную композицию следующего состава: 5%  $^{233}\text{U}$  + 23,8%  $^{238}\text{U}$  + 71,2%  $^{232}\text{Th}$  (отношение доли  $^{232}\text{Th}$  к доле  $^{238}\text{U}$  составляет как раз 3:1).

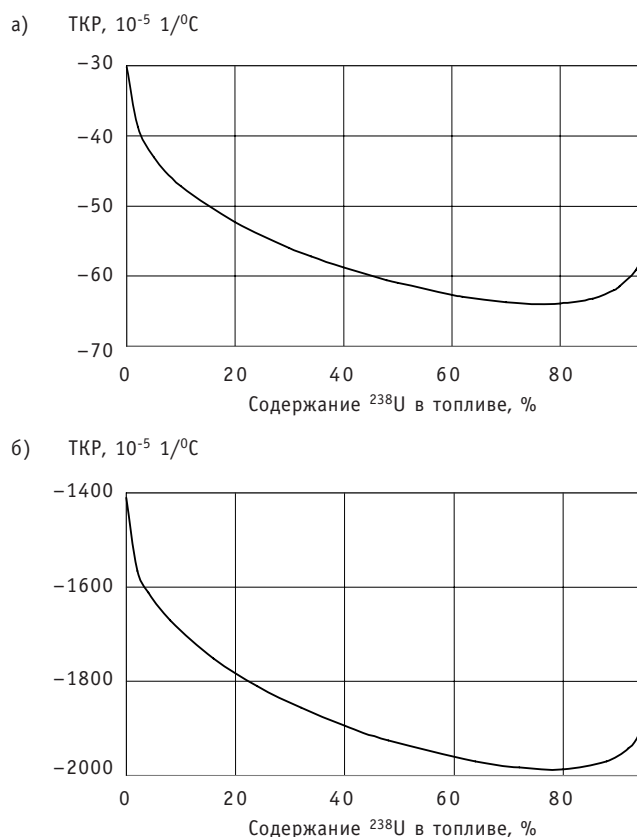


Рис. 2. ТКР для топливной решетки реактора, охлаждаемой теплоносителем с плотностью  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$  (а) и  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,4 \text{ г/см}^3$  (б)

Таблица 1

**Изменение ТКР в процессе выгорания для нижней части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ; 5%  $^{233}\text{U}$  + 23,8%  $^{238}\text{U}$  + 71,2%  $^{232}\text{Th}$ )**

Время, дни	ТКР, $10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
0	-55
30	-51
217	-52
582	-40
947	-22
1130 (5.67 % т.а.)	-12

Изменение ТКР в процессе выгорания для рассматриваемой топливной композиции представлено в табл. 1.

Как видно из представленных данных, ТКР в нижней части активной зоны по мере выгорания топлива уменьшается по модулю, оставаясь при этом отрицательным. По величине он сопоставим с этим коэффициентом для традиционных легководных реакторов [6]. Перейдем к рассмотрению центральной части активной зоны.

#### **ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ( $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ )**

Существенный перепад плотности теплоносителя в центральной части активной зоны при небольшом изменении его температуры приводит к значительным величинам ТКР. Это наглядно видно из рис. 2 (б), на котором изображен ТКР для топливной решетки реактора, охлаждаемой теплоносителем с плотностью  $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$  (что соответствует условиям охлаждения в центральной части активной зоны и резкому изменению плотности теплоносителя с температурой).

Если в нижней части активной зоны 10-процентное изменение плотности теплоносителя происходит при изменении его температуры на  $30^\circ\text{C}$ , то для центральной части активной зоны изменение температуры теплоносителя всего на  $1^\circ\text{C}$  способно вызвать почти такое же 10-процентное изменение его плотности. Поэтому, как видно из рис. 2, ТКР по модулю в центральной части активной зоны (б) почти в 30 раз превосходит ТКР в нижней части активной зоны (а).

В последующих расчетах рассматривается топливо с содержанием  $^{232}\text{Th}$  к  $^{238}\text{U}$  равное 3:1, как топливо, позволяющее достичь наибольших выгораний: 5,7%  $^{233}\text{U}$  + 23,6%  $^{238}\text{U}$  + 70,7%  $^{232}\text{Th}$ . Для случая использования данной топливной композиции в табл. 2 представлено изменение ТКР в процессе выгорания.

Как видно, по мере выгорания ТКР по модулю постепенно снижается. Тем не менее, даже на конец кампании его величина на порядок превосходит значения ТКР, характерные для нижней части активной зоны реактора.

На рис. 2 демонстрируется существенное, но, на наш взгляд, недостаточное уменьшение ТКР при использовании топлива, содержащего в своем составе торий. Дальнейшее уменьшение ТКР по модулю в центральной части активной зоны реактора может достигаться посредством коррекции нуклидного состава смешанного  $(\text{Th-U})\text{O}_2$  топлива путем введения специально выбранных нуклидов. В табл. 3 приведены результаты расчетов по влиянию на ТКР добавления в состав топлива 1% т.а. ряда актинидов. В этих расчетах средняя плотность теплоносителя ( $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ) соответствовала диапазону температур в области критической точки, а исходное топливо имело следующий состав: 5,7%  $^{233}\text{U}$  + 23,6%  $^{238}\text{U}$  + 70,7%  $^{232}\text{Th}$ .

Таблица 2

**Изменение ТКР в процессе выгорания для центральной части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ;  $5,7\% {}^{233}\text{U} + 23,6\% {}^{238}\text{U} + 70,7\% {}^{232}\text{Th}$ )**

Время, дни	ТКР, $10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
0	-1823
30	-1651
219	-1582
589	-1240
959	-864
1145 (5,43 % т.а.)	-671

Таблица 3

**Влияние на ТКР добавления в состав топлива 1% т.а. различных актинидов, ( $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ )**

Добавляемый изотоп, + 1% т.а.	$\Delta \text{ТКР} = \text{ТКР} (+1\% \text{ т.а.}) - \text{ТКР} (0\%),$ $10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ в расчете на +1% т.а.	Добавляемый изотоп, + 1% т.а.	$\Delta \text{ТКР} = \text{ТКР} (+1\% \text{ т.а.}) - \text{ТКР} (0\%),$ $10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ в расчете на +1% т.а.
${}^{232}\text{Th}$	-3	${}^{240}\text{Pu}$	643
${}^{231}\text{Pa}$	308	${}^{241}\text{Pu}$	-10
${}^{232}\text{U}$	151	${}^{242}\text{Pu}$	76
${}^{233}\text{U}$	34	${}^{241}\text{Am}$	853
${}^{234}\text{U}$	49	${}^{242\text{m}}\text{Am}$	-858
${}^{235}\text{U}$	2	${}^{243}\text{Am}$	97
${}^{236}\text{U}$	-46	${}^{242}\text{Cm}$	-39
${}^{238}\text{U}$	-8	${}^{243}\text{Cm}$	-166
${}^{237}\text{Np}$	103	${}^{244}\text{Cm}$	-2
${}^{238}\text{Pu}$	393	${}^{245}\text{Cm}$	-546
${}^{239}\text{Pu}$	99		

Добавление в топливо именно актинидов рассматривалось по двум причинам: во-первых, это тяжелые ядра, способные в конечном итоге разделиться и привести тем самым к выделению энергии; а во-вторых, они могут превратиться в денатурирующие элементы.

Положительные значения  $\Delta \text{ТКР}$  означают, что результатом введения 1% т.а. соответствующего изотопа является увеличение ТКР по величине (уменьшение по модулю отрицательного ТКР, т.е. в рассматриваемом случае – подавление неблагоприятного эффекта). Наибольшее влияние по увеличению ТКР оказывает добавление  ${}^{231}\text{Pa}$ ,  ${}^{240}\text{Pu}$  и  ${}^{241}\text{Am}$ .

Напротив, отрицательные значения  $\Delta \text{ТКР}$  означают, что результатом введения 1% т.а. соответствующего изотопа является уменьшение ТКР по величине (увеличение по модулю отрицательного ТКР, т.е. в рассматриваемом случае – усиление неблагоприятного эффекта, наблюдаемого в центральной части активной зоны). Наибольшее влияние по уменьшению ТКР оказывает добавление  ${}^{242\text{m}}\text{Am}$ ,  ${}^{243}\text{Cm}$  и  ${}^{245}\text{Cm}$ .

Таким образом, для подавления сильноотрицательных величин ТКР в центральной части активной зоны целесообразно вводить  ${}^{241}\text{Am}$ , как изотоп, введение которого способно в наибольшей мере увеличить ТКР. Однако его введение приводит также к заметному снижению коэффициента размножения: добавление 1% т.а.  ${}^{241}\text{Am}$  в состав топлива снижает  $k_\infty$  на величину  $\Delta k_\infty = 0,244$ . Поэтому для сохране-

ния прежней величины выгорания необходимо повысить обогащение топлива по  $^{233}\text{U}$  с 5,7% до 10%.

Выделять америциевую фракцию предполагается из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора типа ВВЭР. Изотопный состав ОЯТ реактора типа ВВЭР представлен в табл. 4.

Таблица 4

**Состав ОЯТ реактора типа ВВЭР**

Изотоп	Содержание, %	Изотоп	Содержание, %
$^{235}\text{U}$	1,39	$^{242}\text{Pu}$	0,04
$^{236}\text{U}$	0,50	$^{241}\text{Am}$	0,004070
$^{238}\text{U}$	90,09	$^{242\text{m}}\text{Am}$	0,000088
$^{237}\text{Np}$	0,05	$^{243}\text{Am}$	0,009127
$^{238}\text{Pu}$	0,016	$^{242}\text{Cm}$	0,001095
$^{239}\text{Pu}$	0,64	$^{243}\text{Cm}$	0,000028
$^{240}\text{Pu}$	0,20	$^{244}\text{Cm}$	0,002450
$^{241}\text{Pu}$	0,15	$^{245}\text{Cm}$	0,000098

Как видно из представленных данных, содержание  $^{242\text{m}}\text{Am}$  чрезвычайно мало по сравнению с содержанием  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$ . Поэтому в дальнейшем будем предполагать, что в топливо добавляется америциевая фракция, выделяемая из ОЯТ реактора ВВЭР (содержание  $^{243}\text{Am}$  в 2,25 раза больше, чем содержание  $^{241}\text{Am}$ ), а содержанием  $^{242\text{m}}\text{Am}$  при этом пренебрегаем. Заметим, что влияние  $^{243}\text{Am}$  на величину ТКР слабее почти на порядок, по сравнению с  $^{241}\text{Am}$ .

В результате расчетов была подобрана следующая топливная композиция: 2,3% $^{241}\text{Am}$  + 5,175% $^{243}\text{Am}$  + 10% $^{233}\text{U}$  + 20,625% $^{238}\text{U}$  + 61,9% $^{232}\text{Th}$ . Изменение величины ТКР в процессе выгорания представлено в табл. 5. При этом более детально было оценено изменение ТКР в первые сутки работы топлива, когда накопление продуктов деления, сильно отравляющих реактор, способно вывести ТКР в положительную область значений.

Таким образом, за счет введения небольших количеств  $^{241}\text{Am}$  величина ТКР может быть уменьшена более чем на порядок; при этом ТКР сохраняется по величине отрицательным в течение всей кампании топлива.

Таблица 5

**Изменение ТКР в процессе выгорания для центральной части активной зоны ( $\gamma_{\text{T/н}} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ; 2,3%  $^{241}\text{Am}$ +5,175%  $^{243}\text{Am}$ +10%  $^{233}\text{U}$ +20,625%  $^{238}\text{U}$ +61,9%  $^{232}\text{Th}$ )**

Время, дни	ТКР, $10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
0	-76
2	-16
5	-14
10	-17
20	-29
30	-28
284	-132
784	-143
1284	-90
1476 (6,12% т.а.)	-43

### ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ( $\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см<sup>3</sup>)

В работе [5] в верхней части активной зоны со средней плотностью теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,1$  г/см<sup>3</sup> предлагается использовать топливную композицию с повышенным обогащением по <sup>233</sup>U с целью получения примерно такой же величины коэффициента размножения, как и для больших плотностей теплоносителя. Рассмотрим следующую топливную композицию: 11,8% <sup>233</sup>U + 22% <sup>238</sup>U + 66,2% <sup>232</sup>Th. Отметим, что, как и ранее, содержание <sup>232</sup>Th к содержанию <sup>238</sup>U относится как 3:1 для достижения наибольших выгораний. Характер изменения ТКР в процессе выгорания для указанной топливной композиции представлен в табл. 6.

Таблица 6

**Изменение ТКР в процессе выгорания для верхней части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,1$  г/см<sup>3</sup>; 11,8% <sup>233</sup>U + 22% <sup>238</sup>U + 66,2% <sup>232</sup>Th)**

Время, дни	ТКР, 10 <sup>-5</sup> 1/°C
0	-30
30	-28
277	-21
762	-10
1247	-1
1732	+7
2217	+15
2702	+1
2945	+23

Можно видеть, что примерно первую половину кампании ТКР принимает отрицательные значения, в то время как вторую половину кампании – положительные. Подчеркнем, что в нижней части активной зоны ТКР на протяжении всей кампании отрицателен при использовании исходного топлива, а в центральной части активной зоны этого можно добиться, как показано выше, путем добавления небольших количеств <sup>241</sup>Am.

Таким образом, незначительные положительные величины ТКР в верхней части активной зоны, наблюдаемые ближе к концу кампании, могут и не ухудшать в целом безопасность реактора. Это может быть связано с тем, что у верхнего края активной зоны должен быть благоприятный отрицательный эффект реактивности, обусловленный увеличением утечки нейтронов при уменьшении плотности теплоносителя (который в данном рассмотрении не учитывается).

Тем не менее, продемонстрируем возможность подавления ТКР в верхней части активной зоны в отрицательную область. Для этого, как и ранее, рассмотрим влияние на ТКР добавления 1% т.а. ряда актинидов. Подобные данные для  $\gamma_{т/н} = 0,1$  г/см<sup>3</sup> приведены в табл. 7.

Можно видеть, что введение подавляющего большинства нуклидов приводит к увеличению ТКР, о чем свидетельствуют положительные величины  $\Delta$ ТКР. Снизить ТКР способно введение лишь <sup>232</sup>Th, <sup>242m</sup>Am, <sup>243</sup>Cm и <sup>245</sup>Cm. Однако влияние введения тория на ТКР сравнительно мало, а прочие перечисленные нуклиды труднодоступны в существенных количествах.

Единственным решением проблемы представляется уменьшение доли <sup>233</sup>U в топливе. Действительно, поскольку добавление 1% <sup>233</sup>U приводит к повышению ТКР

Таблица 7

**Влияние на ТКР добавления в состав топлива 1% т.а. различных актинидов, ( $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ )**

Добавляемый изотоп, + 1% т.а.	$\Delta \text{ТКР} = \text{ТКР} (+1\% \text{ т.а.}) - \text{ТКР} (0\%), 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ в расчете на +1% т.а.	Добавляемый изотоп, + 1% т.а.	$\Delta \text{ТКР} = \text{ТКР} (+1\% \text{ т.а.}) - \text{ТКР} (0\%), 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ в расчете на +1% т.а.
$^{232}\text{Th}$	-0,3	$^{240}\text{Pu}$	12,1
$^{231}\text{Pa}$	8,7	$^{241}\text{Pu}$	3,6
$^{232}\text{U}$	5,2	$^{242}\text{Pu}$	3,7
$^{233}\text{U}$	3,7	$^{241}\text{Am}$	13,5
$^{234}\text{U}$	5,4	$^{242m}\text{Am}$	-2,2
$^{235}\text{U}$	3,8	$^{243}\text{Am}$	9,8
$^{236}\text{U}$	3,0	$^{242}\text{Cm}$	2,5
$^{238}\text{U}$	0,0	$^{243}\text{Cm}$	-4,7
$^{237}\text{Np}$	8,1	$^{244}\text{Cm}$	3,5
$^{238}\text{Pu}$	4,8	$^{245}\text{Cm}$	-1,1
$^{239}\text{Pu}$	5,6		

на  $3,7 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ , то уменьшение его содержания способно вызвать примерно такое же снижение ТКР. Отметим, что при этом также уменьшается доля  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции, что тоже является благоприятным моментом с точки зрения защищенности такой топливной композиции.

Проведенные расчеты показали, что при использовании следующей топливной композиции ( $6,75\% ^{233}\text{U} + 23,25\% ^{238}\text{U} + 70\% ^{232}\text{Th}$ ) ТКР принимает отрицательные значения на протяжении всей кампании и достигает нулевого значения к концу кампании (табл. 8).

Таблица 8

**Изменение ТКР в процессе выгорания для верхней части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ ;  $6,75\% ^{233}\text{U} + 23,25\% ^{238}\text{U} + 70\% ^{232}\text{Th}$ )**

Время, дни	ТКР, $10^{-5} 1/^\circ\text{C}$
0	-55
30	-51
223	-38
549	-20
876	-6
1039 (5,21% т.а.)	0

**ЗАЩИЩЕННОСТЬ  $(\text{Th-U})\text{O}_2$  ТОПЛИВА В ЛЕГКОВОДНОМ РЕАКТОРЕ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Уделим внимание вопросу защищенности предложенных выше топливных композиций для сверхкритического легководного реактора. Напомним, что МАГАТЭ признает материал, в котором доля  $^{235}\text{U}$  в урановой фракции не более 20%, материалом, непригодным для изготовления эффективного ядерного взрывного устройства. Как известно, уран с 12-процентным обогащением по  $^{233}\text{U}$  по своим размножающим свойствам примерно соответствует урану с 20-процентным обогащением по  $^{235}\text{U}$ . Поэтому критерием защищенности материала, в котором присутствует  $^{233}\text{U}$ , является не превышение его доли в урановой фракции 12%.

Рассмотрение проведем применительно к каждой из выделенных частей актив-



ной зоны. Так, в нижней части активной зоны (средняя плотность теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ) предложено использовать топливную композицию следующего состава:  $5\%^{233}\text{U} + 23,8\%^{238}\text{U} + 71,2\%^{232}\text{Th}$ . Для такой топливной композиции доля  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции снижается с 17% для свежего топлива до 9% для отработавшего.

В центральной части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ) необходимость компенсации негативного влияния  $^{241}\text{Am}$  на реактивность путем использования топлива с большим обогащением по  $^{233}\text{U}$  привела к тому, что доля  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции для свежего топлива составляет 33%, а для ОЯТ – 23%.

В топливной композиции, используемой в верхней части активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ ), доля  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции для свежего топлива составляет 22%, а для ОЯТ – 19,3%.

Защищенность таких топливных композиций с содержанием  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции более 12% является направлением дальнейших исследований. В качестве такой защиты будет рассматриваться введение  $^{232}\text{U}$ , который не может быть отделен с помощью химических методов от урановой фракции. Как показано в работах [7, 8], введение  $^{232}\text{U}$  позволит повысить защищенность урановой фракции с высоким содержанием  $^{233}\text{U}$ .

Еще одним способом обеспечить защищенность предложенных топливных композиций является изменение отношения содержания  $^{232}\text{Th}$  к  $^{238}\text{U}$  с 3:1 (как топлива, обеспечивающего максимальное выгорание) в сторону больших содержаний  $^{238}\text{U}$ . Это приведет к определенному снижению выгорания, однако понизится также доля  $^{233}\text{U}$  в урановой фракции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность подавить ТКР в центральной части активной зоны легководного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя более чем на порядок (до значений, характерных для традиционных легководных реакторов) путем введения небольших количеств  $^{241}\text{Am}$ . Кроме того продемонстрирована возможность обеспечить отрицательные значения ТКР в верхней части активной зоны на протяжении всей кампании топлива.

## Литература

1. <http://www.gen-4.org/>
2. Kuznetsov Yu. Pressure Tubes Supercritical Water Reactors: Some Advantages and Problems/10<sup>th</sup> International Sac Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century (24-27 September, 2007, Nizhny Novgorod, Russia).
3. Dragunov Yu., Ryzhov S., Nikitenko M et. al. Water-Cooled reactors with Supercritical Parameters (SC WWR) – Prospective Reactors of the 4-th Generation/10<sup>th</sup> International Sac Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century (24-27 September, 2007, Nizhny Novgorod, Russia).
4. Feasibility Study of Super-Critical Light-Water Cooled Reactor For Electric Power Production. Thermal-Hydraulic Analysis of Supercritical Water Reactor (SCWR) Core. Nuclear Energy Research Initiative (NERI). Final Report, June 2004.
5. Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Куликов Г.Г. Нейтронно-физические характеристики ( $^{233}\text{U}$ -Th- $^{238}\text{U}$ )-топлива в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2.
6. Украинцев В.Ф. Эффекты реактивности в энергетических реакторах: Учебное пособие. – Обнинск, 2000.
7. Kang Jungmin and von Hippel Frank N. U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233 in Spent Fuel//Science & Global Security. – V. 9. – P. 1-32.
8. Gilfoyle G.P. and Parmentola J.A. Using Nuclear Materials To Prevent Nuclear Proliferation//Science & Global Security. – V. 9. – P. 81-92.

Поступила в редакцию 20.12.2007

**УДК 621.039.5**

*Some Neutron-Physical and Thermo-Hydraulic Characteristics of Improved Facility MASTER \Yu.A. Kazansky, V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev, V.A. Barshevtsev, V.A. Belugin, S.L. Dorokhov, A.A. Kazantsev, A.V. Levchenko, Yu.D. Levchenko, D.M. Titov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 4 tables, 7 illustrations. – References – 5 titles.*

Current paper results in technical improvement of self-contained small power reactor MASTER for heat supply.

The main directions of the facility improvement are: decrease of uranium enrichment below 20% to satisfy the international requirements for non-proliferation of nuclear materials; increase of thermal power to reduce the cost of produced power; decrease of expensive beryllium content in the reactor core; application of innovative passive methods of power self-control during burnup.

Present feasibility study demonstrates much better neutron-physical and thermo-hydraulic characteristics of improved facility MASTER in comparison with previous variant [1].

**УДК 621.039.56**

*Supercritical Light-Water Reactor with (Th-U)O<sub>2</sub> Fuel: How to Suppress Temperature Reactivity Coefficient \E.G. Kulikov, A.N. Shmelev, G.G. Kulikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 9 pages, 8 tables, 2 illustrations. – References – 8 titles.*

The search of ways to suppress temperature reactivity coefficient (TRC) in the central part of supercritical light-water reactors core is realized. It is proposed to add little amounts of <sup>241</sup>Am into the fuel: <sup>241</sup>Am is able to increase the values of TRC considerably. It is demonstrated the possibility to guarantee negative and not big in magnitude values of TRC in the whole supercritical light-water reactors core during entire campaign.

**УДК 621.039.543.6**

*Neutron Radiation of Irradiated MOX-fuel with Different Burn up \I.V. Shamanin, P.M. Gavrilov, S.V. Bedenko, V.V. Martynov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 3 tables. – References – 10 titles.*

All basic nucleus processes, which brings to forming the field of the neutron radiation of irradiated in reactor WWER-1000 MOX-fuel, are considered. Contributions of the spontaneous fissions, reactions ( $\gamma, n$ ) and ( $\alpha, n$ ) occurring in the fuel matrix in to the total neutron radiation of irradiated fuel are determined. There are founded causes of significant differences between neutron radiation of irradiated standard and MOX-fuel when the same burn up.

**УДК 621.039.543.6**

*Neutron Radiation of Spent Nuclear Fuel with Rised Burn-up \I.V. Shamanin, P.M. Gavrilov, S.V. Bedenko, V.V. Martynov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 2 illustrations. – References – 12 titles.*

Designs for the WWER-1000 spent fuel transportation container were made for a burn up degree no more then 40 MWd/kg. Even now burn up degree for the some spent fuel assemblies more then above mentioned. Activity of a spent fuel is increased with a burn up degree. But containers were designed with safety factor two for the gamma-irradiation. So there is no worry about radiation safety connected with this part of radiation from spent fuel. The  $\alpha$ - and  $\beta$ -irradiations have much less penetrability than gamma one and could be ignored. But neutron irradiation degree is still a question and shielding from this type of radiation has to be proved.

All nuclear processes resulting to neutron generation within a spent fuel are examined. Total neutron intensity per weight unit of WWER-1000 spent fuel caused by ( $\alpha, n$ ) reactions, ( $\gamma, n$ ) reactions and spontaneous fissions of uranium and transuranium nucleus proceeding were determined.