

## НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ( $^{233}\text{U}$ - $\text{Th}$ - $^{238}\text{U}$ )- ТОПЛИВА В ЛЕГКОВОДНОМ РЕАКТОРЕ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

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

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



Рассматривается привлекательность использования (U-Th)-топлива в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Предполагается разбавлять  $^{233}\text{U}$  в  $^{238}\text{U}$  с целью повышения защищенности этого делящегося изотопа от несанкционированного использования. Сравнение различных топливных композиций осуществляется с точки зрения воспроизводства и достижимых выгораний; также сравниваются паразитные сечения поглощения. Рассмотрение проводится для случаев, когда в качестве конструкционного материала оболочки твэлов используется сплав на основе циркония, а также нержавеющая сталь.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы был предпринят ряд международных инициатив, в рамках которых рассматривались средне- и долгосрочные перспективы развития ядерной энергетики. Среди таких инициатив можно назвать проект «Международный форум “Поколение IV”», инициатором которого выступили США. В 2002 г. Консультативный комитет по исследованиям в области ядерной энергетики подготовил «технологический план действий» в отношении ядерных энергетических систем IV-го поколения. В результате для дальнейших совместных исследований и разработок были отобраны шесть инновационных концепций реакторных технологий и соответствующих технологий топливного цикла [1].

Одной из таких концепций является легководный реактор со сверхкритическими параметрами теплоносителя – высокотемпературный реактор, охлаждаемый водой под высоким давлением, с режимом работы выше термодинамической критической точки воды (Super-Critical Light Water Reactor (SCLWR)). По данному типу реактора уже начаты работы и предполагается, что в течение ближайших трех десятилетий такие реакторы могут быть введены в действие.

В ряде исследований [2, 3] рассмотрено использование обогащенного уранового, а также MOX-топлива в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Данная работа посвящена исследованию нейтронно-физических характеристик (U-Th)-топлива в таком легководном реакторе (здесь имеется в виду, что в ( $^{233}\text{U}$ -Th)-топливо гомогенно добавлен изотоп  $^{238}\text{U}$ ). Рассматривается привлекатель-

ность использования различных топливных композиций с точки зрения повышения глубины выгорания. Нужно отметить, что предложение размещать  $^{233}\text{U}$  в  $^{238}\text{U}$  с целью повышения защищенности этого делящегося изотопа было выдвинуто известным американским физиком, участником Манхэттенского проекта Т. Тейлором [4].

### **ОСОБЕННОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ**

В сверхкритическом легководном реакторе роль теплоносителя и замедлителя играет легкая вода под высоким давлением (25 МПа), которая прокачивается через активную зону снизу вверх. При таком высоком давлении легкая вода находится в закритическом состоянии: что позволяет создать значительный перепад температур теплоносителя по высоте активной зоны, и, соответственно, достичь высоких значений КПД реакторной установки (вплоть до 45%). Этот факт является одним из преимуществ такого легководного реактора.

В настоящее время существует две основные концепции сверхкритических легководных реакторов. Первая из них в определенном смысле является традиционной: твэлы в регулярной решетке, теплоноситель – в межтвэльном пространстве.

Однако по причине очень высоких температур теплоносителя на выходе из активной зоны, а, следовательно, низких плотностей, в верхней части активной зоны совсем немного основного замедляющего элемента – водорода. Таким образом, если образующийся в результате этого резонансный спектр нейтронов нежелателен по каким-либо соображениям (например, с точки зрения размножающих свойств топливной композиции), то можно использовать другую концепцию сверхкритического легководного реактора, в которой в этой области активной зоны внутри части твэлов вместо топлива разместить замедлитель (например, гидрид циркония или просто заполнить водой). В этом случае даже в верхней части активной зоны, где плотность основного замедлителя – легкой воды – низкая, за счет введения дополнительного замедлителя установится смягченный спектр нейтронов. Недостатком второй концепции по сравнению с первой является меньшее количество тепловыделяющих элементов при том же размере активной зоны, т.е. меньшее энерговыделение с единицы объема. В данной работе рассматривается первая концепция сверхкритического легководного реактора.

Концепция такого прямоточного реактора имеет свои недостатки: «... исключительно высокое приращение энтальпии и относительно малая теплоемкость перегретого пара, что приводит к высокой чувствительности к любым видам неравномерности подогрева теплоносителя. Сильное изменение плотности теплоносителя-замедлителя является причиной большой неравномерности тепловыделения ... высокая температура теплоносителя обуславливает применение в качестве оболочек твэлов сплавов с высоким содержанием никеля ... существенной проблемой для прямоточного реактора является достижение приемлемой температуры оболочек твэлов» [2].

В работе [2] предложены меры по преодолению перечисленных недостатков, одной из которых является использование микротвэлов, непосредственно охлаждаемых теплоносителем-замедлителем. В работе [3] рассмотрена двухходовая схема, когда сначала теплоноситель в периферийной части активной зоны опускается сверху вниз, перемешивается в нижнем коллекторе и направляется на дальнейший подогрев в центральной части.

Как уже отмечалось выше, в проекте сверхкритического легководного реактора теплоноситель имеет значительный перепад температур (следовательно, и плотности) по высоте активной зоны: от  $280^\circ\text{C}$  ( $0,78 \text{ г/см}^3$ ) на входе в активную зону до  $500^\circ\text{C}$  ( $0,09 \text{ г/см}^3$ ) на выходе из активной зоны. Кроме того, наблюдается резкое изменение плотности воды при температуре около  $380^\circ\text{C}$ . График зависимости плотности

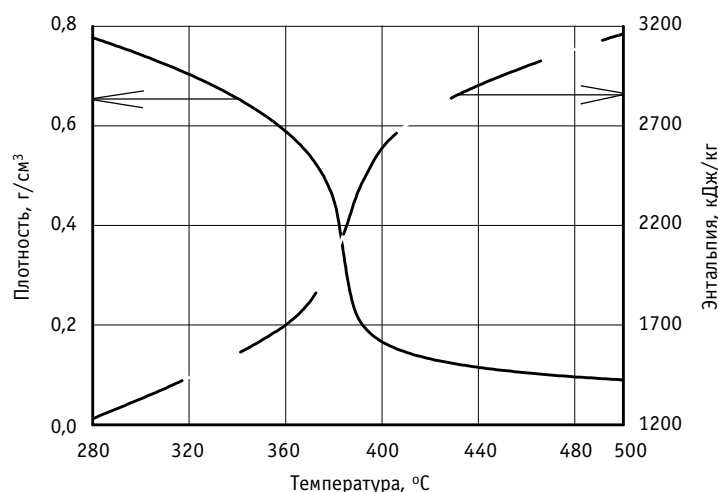


Рис. 1. Свойства воды при давлении 25 МПа

воды от температуры при давлении 25 МПа представлен на рис. 1.

Энтальпия, приращение которой по сути есть теплота, полученная системой, также очень неравномерно изменяется в рабочем диапазоне температур теплоносителя. Из графика зависимости энтальпии воды от температуры при давлении 25 МПа, также представленного на рис. 1, можно заключить, что в средней части активной зоны теплоноситель наиболее интенсивно охлаждает ТВЭЛы (наибольшее изменение энтальпии при нагреве воды на  $1^\circ\text{C}$ ).

Столь значительное и неравномерное изменение свойств воды в рабочем диапазоне температур может привести к сильному изменению нейтронно-физических свойств топливной композиции. Поэтому существует необходимость условного разделения активной зоны по высоте на несколько частей и изучение нейтронно-физических характеристик в каждой из них. Таковыми в данной работе выбраны три части: входной участок в активную зону (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 выходной участок из активной зоны ( $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ ).

### НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $^{233}\text{U}$ И $^{239}\text{Pu}$ , А ТАКЖЕ $^{232}\text{Th}$ И $^{238}\text{U}$ В СПЕКТРЕ НЕЙТРОНОВ В SCLWR

В работе рассматриваются топливные композиции с фиксированным содержанием  $^{233}\text{U}$  и различным содержанием  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ . В табл.1 представлены отношения сечения захвата к сечению деления ( $\sigma_c/\sigma_f = \alpha$ ) при плотностях теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,72; 0,4$  и  $0,1 \text{ г/см}^3$ . Были выбраны следующие топливные композиции: на основе  $^{232}\text{Th}$  (4%  $^{233}\text{U}$  + 96%  $^{232}\text{Th}$ ), на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  (4%  $^{233}\text{U}$  + 48%  $^{232}\text{Th}$  + 48%  $^{238}\text{U}$ ) и на основе  $^{238}\text{U}$  (4%  $^{233}\text{U}$  + 96%  $^{238}\text{U}$ ).

Как видно из представленных данных, отношение сечения захвата к сечению деления для конкретного делящегося изотопа (величина  $\alpha$ ) слабо зависит как от состава топливной композиции, так и от плотности теплоносителя, и составляет:

$$\alpha(^{233}\text{U}) \approx 0,12 \div 0,14, \alpha(^{239}\text{Pu}) \approx 0,55 \div 0,65.$$

Причем величина  $\alpha$  для  $^{239}\text{Pu}$  примерно в четыре раза больше, чем для  $^{233}\text{U}$ . Отсюда следует, что, хотя по числу нейтронов деления  $^{239}\text{Pu}$  имеет преимущество по сравнению с  $^{233}\text{U}$ :

$$\nu_f(^{233}\text{U}) \approx 2,52, \nu_f(^{239}\text{Pu}) \approx 2,89,$$

в действительности же в рассматриваемых спектрах нейтронов  $^{233}\text{U}$  оказывается мно-

Таблица 1

**Отношение сечения захвата к сечению деления:  $\sigma_c / \sigma_f = \alpha$**

Доля в топливе, %		$\gamma_{т/н} = 0,72 \text{ г/см}^3$		$\gamma_{т/н} = 0,4 \text{ г/см}^3$		$\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$	
$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{233}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{233}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{233}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$
96	0	$\frac{7}{59} = 0,12$	$\frac{70}{123} = 0,57$	$\frac{4,6}{35} = 0,13$	$\frac{43}{72} = 0,60$	$\frac{1,5}{11} = 0,14$	$\frac{7,8}{12} = 0,65$
48	48	$\frac{5,5}{44} = 0,13$	$\frac{47}{84} = 0,56$	$\frac{3,4}{24} = 0,14$	$\frac{23}{39} = 0,59$	$\frac{0,86}{6,4} = 0,14$	$\frac{4,4}{7,1} = 0,62$
0	96	$\frac{6}{48} = 0,13$	$\frac{48}{87} = 0,55$	$\frac{3,6}{25} = 0,14$	$\frac{21}{36} = 0,58$	$\frac{1,3}{9,2} = 0,14$	$\frac{2,4}{4,2} = 0,57$

го выгоднее  $^{239}\text{Pu}$  по размножающим свойствам при всех топливных композициях и для всех плотностей теплоносителя:

$$v_{eff} = \frac{v_f}{1 + \sigma_c / \sigma_f} = \frac{v_f}{1 + \alpha} \Rightarrow \begin{cases} v_{eff}(^{233}\text{U}) \approx 2,22 \\ v_{eff}(^{239}\text{Pu}) \approx 1,82. \end{cases} \quad (1)$$

При более высоком числе вторичных нейтронов на 1 акт деления ( $v_f$ ) у  $^{239}\text{Pu}$  по сравнению с  $^{233}\text{U}$ , число вторичных нейтронов на 1 нейтрон, поглощенный в данном нуклиде ( $v_{eff}$ ), существенно выше у  $^{233}\text{U}$  именно по причине небольших величин  $\alpha$  по сравнению с плутонием. Тот факт, что  $^{233}\text{U}$  выглядит предпочтительнее  $^{239}\text{Pu}$  по размножающим свойствам даже при плотности теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ , свидетельствует о том, что в верхней части активной зоны устанавливается все же достаточно смягченный спектр нейтронов.

На основании приведенных данных можно было бы предположить, что топливная композиция с 4%  $^{233}\text{U}$  и 96%  $^{232}\text{Th}$  может оказаться предпочтительнее композиций с 4%  $^{233}\text{U}$  и смесью тория и урана или только  $^{238}\text{U}$ . Для дальнейшего подтверждения или опровержения данного предположения рассмотрим зависимость сечения поглощения  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  от энергии нейтронов. Данная зависимость в интервале от 1 эВ до 1 кэВ представлена на рис. 2.

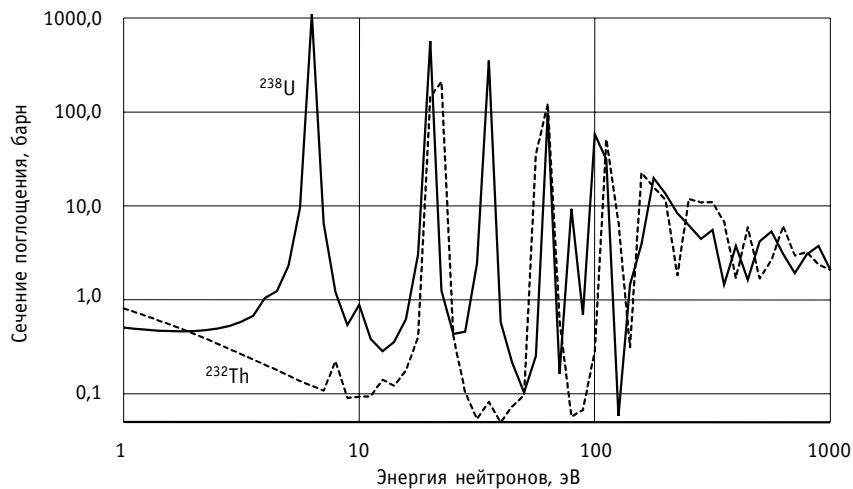


Рис. 2. Зависимости сечения поглощения для  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  от энергии нейтронов

Как видно, часть резонансов  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  не пересекается между собой. Поэтому при использовании топливной композиции на основе смеси тория и урана, решетка резонансов будет более плотная, чем при использовании топлива на основе только тория или только урана. Более плотная решетка резонансов означает, что большее число нейтронов будет испытывать при замедлении захват на сырьевых нуклидах ( $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ ) и соответственно приводить к большему накоплению делящихся нуклидов ( $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ).

### СРАВНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДСТВА

Зависимости накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в расчете на одно деление изображены на рис. 3. Для случая плотности теплоносителя  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$  рассматривается топливная композиция следующего состава: 4%  $^{233}\text{U}$  + 96% [ $^{232}\text{Th}$  +  $^{238}\text{U}$ ] $\text{O}_2$ . График зависимости суммарного накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в расчете на одно деление имеет куполообразную форму: наблюдается максимум воспроизводства, когда в качестве топлива используется смесь  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ .

Суммарный коэффициент воспроизводства  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  выражается на основе баланса нейтронов следующей формулой:

$$KB_{\text{U3+Pu9}} = \frac{v_{\text{eff}}^{\text{U3}}}{K_{\infty}} - 1 + \Delta KB_f - \Delta KB_{\text{конструкция + т/н}}, \quad (2)$$

где

$$\Delta KB_f = \frac{\left( \frac{1}{k_{\infty}} v_f - 1 \right) \cdot \sum_f^{\text{Th+U8}} \int \phi \cdot dV \cdot dE \cdot d\Omega}{\sum_{cf}^{\text{U3}} \int \phi \cdot dV \cdot dE \cdot d\Omega}, \quad (3)$$

$$\Delta KB_{\text{конструкция + т/н}} = \frac{\sum_c^{\text{Zr+H+FP}} \int \phi \cdot dV \cdot dE \cdot d\Omega}{\sum_{cf}^{\text{U3}} \int \phi \cdot dV \cdot dE \cdot d\Omega}. \quad (4)$$

В рамках данного рассмотрения, когда зафиксировано содержание делящегося  $^{233}\text{U}$  в топливе, преимущество смешанного топлива по сравнению с топливными композициями на основе только  $^{232}\text{Th}$  или только  $^{238}\text{U}$  с точки зрения воспроизводства во многом объясняется поведением коэффициента размножения  $K_{\infty}$  в зависимости от состава топлива. Эта зависимость представлена на рис. 4 для плотности теплоносителя  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$ . Меньшие значения коэффициента размножения для топливной композиции на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  означают большие значения первого члена в правой части формулы (2), т.е. больше нейтронов используется для захвата в сырьевых нуклидах и повышения коэффициента воспроизводства.

Кроме того, в результате проведенных расчетов было выяснено, что для топлива на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  доля нейтронов, захватываемых в конструкции и теплоносителе меньше по сравнению с топливными композициями на основе только  $^{232}\text{Th}$  или только  $^{238}\text{U}$ ; во многом благодаря более плотной решетке резонансов для смеси топлива. Данные обстоятельства обуславливают более высокий суммарный коэффициент воспроизводства  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  для такого топлива.

При рассмотрении аналогичных зависимостей накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в расчете на одно деление от содержания  $^{238}\text{U}$  в топливе для  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,4$  и  $0,1 \text{ г/см}^3$  можно заключить, что при каждой плотности теплоносителя имеется определенная топливная композиция на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ , которая обеспечивает большее воспроизводство, чем топливо на основе только тория или только урана. Отметим, что в слу-

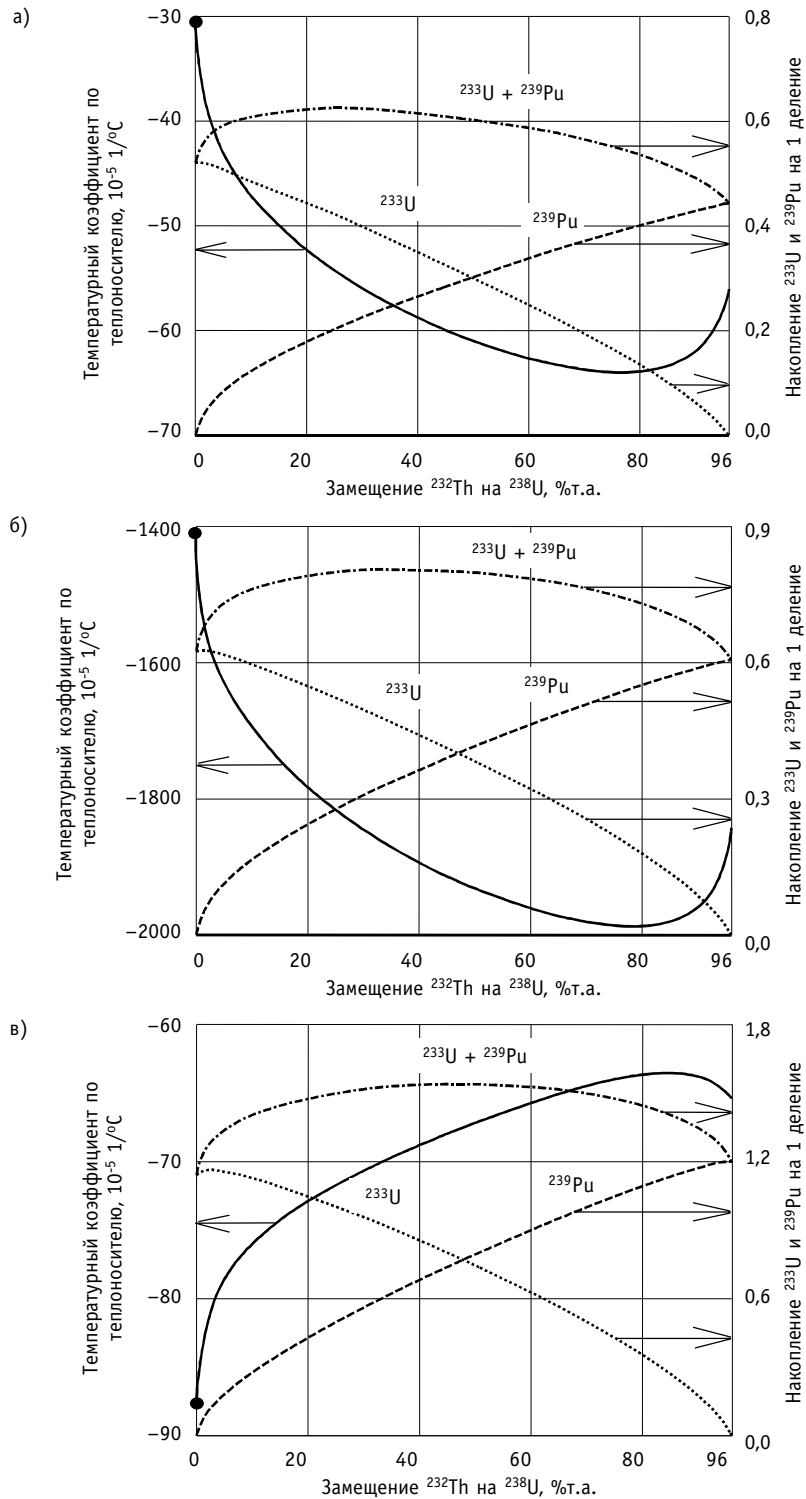


Рис. 3. Зависимости ТКР и накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  (в расчете на одно деление) от доли вводимого  $^{238}\text{U}$ : а)  $\gamma_{T/n} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ; б)  $\gamma_{T/n} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ; в)  $\gamma_{T/n} = 0,1 \text{ г/см}^3$

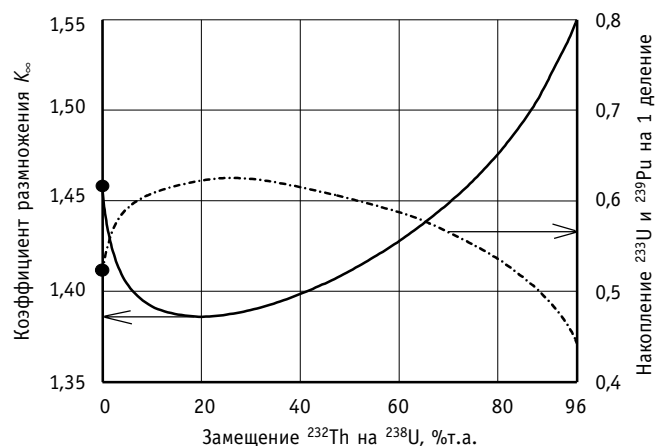


Рис. 4. Зависимость  $K_{\infty}$  и накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  (в расчете на одно деление) от доли вводимого  $^{238}\text{U}$  для случая  $\gamma_{\text{T/H}} = 0,72 \text{ г/см}^3$

чае  $\gamma_{\text{T/H}} = 0,1 \text{ г/см}^3$  в качестве топливной композиции рассматривалась следующая: 10%  $^{233}\text{U}$  + 90% [ $^{232}\text{Th}$  +  $^{238}\text{U}$ ] $\text{O}_2$ . Повышенное обогащение по  $^{233}\text{U}$  было выбрано с целью получения приблизительно такой же величины  $K_{\infty}$  как для больших плотностей теплоносителя.

Из представленных на рис. 3 зависимостей температурного коэффициента реактивности (ТКР) от доли вводимого  $^{238}\text{U}$  в топливо видно, что ТКР принимает отрицательные значения при всех рассматриваемых топливных композициях и плотностях теплоносителя. Это является благоприятным фактором, положительно влияющим на внутреннюю самозащищенность реактора. Заметим, что в центральной части активной зоны плотность теплоносителя изменяется наиболее резко, поэтому ТКР при  $\gamma_{\text{T/H}} = 0,4 \text{ г/см}^3$  имеет столь большие по модулю величины.

Как упоминалось ранее,  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  имеют различные размножающие свойства, выражающиеся в различных значениях числа вторичных нейтронов на один нейтрон, поглощенный в данном нуклиде —  $\nu_{\text{eff}}$ . Поэтому простое сложение скорости накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  не совсем корректно, ведь эти нуклиды имеют различную ценность с точки зрения поддержания критичности. Для учета данного факта, ветвь накопления ядер  $^{233}\text{U}$  на одно деление умножим на  $\nu_{\text{eff}}(^{233}\text{U})$ , а ветвь накопления ядер  $^{239}\text{Pu}$  на одно деление — на  $\nu_{\text{eff}}(^{239}\text{Pu})$ . Полученные зависимости накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  с учетом размножающих свойств представлены на рис. 5 (для  $\gamma_{\text{T/H}} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ).

Как следует из этого рисунка, график зависимости суммарного накопления в расчете на одно деление с учетом различных  $\nu_{\text{eff}}$ , также имеет куполообразную форму. Однако максимум смещен в сторону меньших содержаний  $^{238}\text{U}$  в топливе (больших содержаний  $^{232}\text{Th}$ ). Это отражает тот факт, что размножающие свойства  $^{233}\text{U}$  выше размножающих свойств  $^{239}\text{Pu}$ . При рассмотрении случаев с плотностью теплоносителя  $\gamma_{\text{T/H}} = 0,4$  и  $0,1 \text{ г/см}^3$  можно отметить аналогичную ситуацию: наиболее привлекательным с точки зрения воспроизводства следует признать топливо на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  (причем предпочтительным с точки зрения размножения нейтронов является топливо, в котором содержание  $^{232}\text{Th}$  к  $^{238}\text{U}$  относится как 3:1).

### СРАВНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ $K_{\infty}$ СО ВРЕМЕНЕМ

Для различных топливных композиций были проведены расчеты изменения бесконечного коэффициента размножения нейтронов  $K_{\infty}$  в процессе выгорания. Рассмотрены три варианта топлива: на основе  $^{232}\text{Th}$ , на основе  $^{238}\text{U}$  и топливо на основе смеси

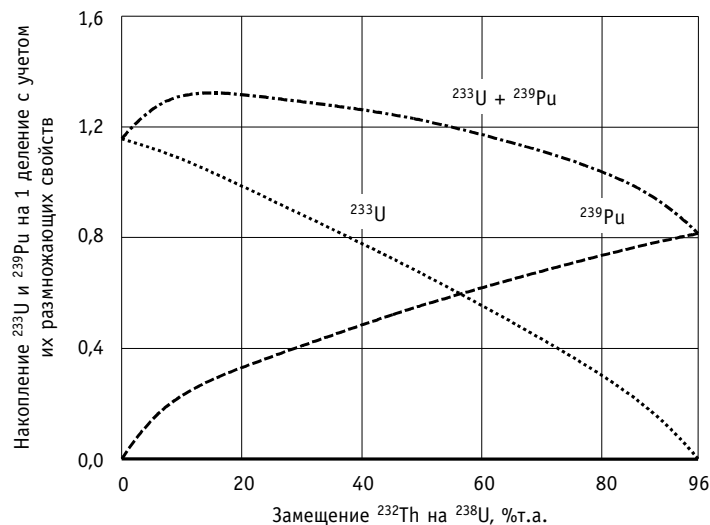


Рис. 5. Зависимость накопления  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  на одно деление с учетом их  $\nu_{\text{eff}}$  от доли вводимого  $^{238}\text{U}$  для случая  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$

$^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ . Содержание делящегося нуклида  $^{233}\text{U}$  подобрано таким образом, чтобы в начальный момент времени  $K_{\infty}$  всех топливных композиций были одинаковы. В случае топлива на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ , их содержания относятся как 3:1 (оптимальный вариант, обеспечивающий максимальное выгорание).

Графики изменения  $K_{\infty}$  со временем для всех трех топливных композиций в случае плотности теплоносителя  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$  представлены на рис. 6. Как видно, быстрее других падает  $K_{\infty}$  топлива на основе  $^{238}\text{U}$ . Действительно, по причине лучших размножающих свойств  $^{233}\text{U}$  по сравнению с  $^{239}\text{Pu}$ , у топливной композиции на основе тория  $K_{\infty}$  падает не так быстро. Привлекательнее всего выглядит топливо на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ : в этом случае достижимое выгорание больше примерно в 1,3 раза, чем для топлива на основе тория, и в 1,75 раза, чем для топлива на основе урана.

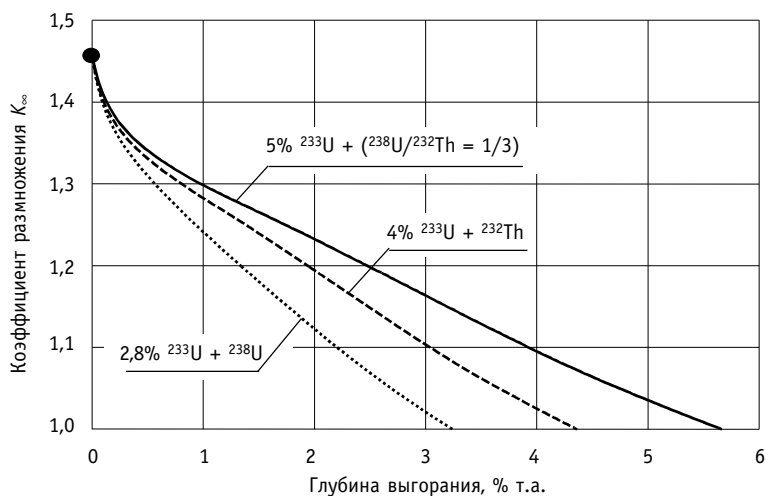


Рис. 6. Зависимость  $K_{\infty}$  от глубины выгорания для случая  $\gamma_{\text{т/н}} = 0,72 \text{ г/см}^3$



При случаях плотности теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,4$  и  $0,1$  г/см<sup>3</sup> картина по существу не меняется. Таким образом, данный график подтверждает привлекательность топливной композиции на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  (в отношении 3:1) как топлива, обеспечивающего достижение повышенного выгорания по сравнению с топливными композициями на основе только тория или только урана.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ В КАЧЕСТВЕ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ ТВЭЛОВ И ТВС

Проведенное ранее рассмотрение нейтронно-физических характеристик выполнено в предположении о том, что материалом оболочки твэлов является традиционно используемый в легководных реакторах сплав на основе циркония и ниобия. Однако, как отмечается в работе [2], высокая температура теплоносителя, при которой использование циркония становится невозможным, «обуславливает применение в качестве оболочки твэлов сплавов с высоким содержанием никеля, что существенно ухудшает характеристики топливного цикла». Поэтому для рассматриваемого U-Th топлива отдельно был изучен вопрос о влиянии на нейтронно-физические характеристики перехода с циркониевого на стальное покрытие.

С помощью расчетного комплекса SCALE-4.3 [5] получены усредненные по спектру нейтронов сечения поглощения теплоносителем и конструкционными материалами. Полученные результаты для плотностей теплоносителя  $\gamma_{т/н} = 0,72$ ,  $0,4$  и  $0,1$  г/см<sup>3</sup>, а также для различных топливных композиций, представлены в табл. 2 (конструкционный материал – Zr + 1%Nb) и в табл. 3 (конструкционный материал – нержавеющая сталь, включающая в себя хром, железо и никель). Рассмотрены следующие топливные композиции: на основе  $^{232}\text{Th}$  (4%  $^{233}\text{U}$  + 96%  $^{232}\text{Th}$ ), на основе  $^{238}\text{U}$  (количество  $^{233}\text{U}$  для каждой  $\gamma_{т/н}$  подобрано таким образом, что  $K_0$  в начальный момент времени совпадает с первым случаем, т.е. с топливом на основе тория), а также смесь  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  (количество  $^{233}\text{U}$  подобрано аналогичным образом, а  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  находятся в отношении 3:1), т.е. для каждой плотности теплоносителя  $K_\infty$  в начальный момент времени у всех рассматриваемых топливных композиций одинаково. Как и ранее, в случае  $\gamma_{т/н} = 0,1$  г/см<sup>3</sup> в качестве топливной композиции рассматривалась следующая: 10%  $^{233}\text{U}$  + 90%  $^{232}\text{Th}$ . Повышенное обогащение по  $^{233}\text{U}$  было выбрано с

Таблица 2

#### Сечения поглощения теплоносителем (H<sub>2</sub>O) и конструкцией (Zr + 1%Nb)

Топливо	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>			$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>			$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>		
	H <sub>2</sub>	Zr	Nb	H <sub>2</sub>	Zr	Nb	H <sub>2</sub>	Zr	Nb
$^{232}\text{Th}$	0,026	0,043	0,40	0,014	0,040	0,40	0,0012	0,035	0,36
$^{238}\text{U}$	0,036	0,047	0,42	0,018	0,042	0,40	0,0013	0,035	0,37
$^{232}\text{Th} + ^{238}\text{U}$ (3:1)	0,022	0,042	0,39	0,010	0,039	0,39	0,0009	0,034	0,34

Таблица 3

#### Сечения поглощения теплоносителем (H<sub>2</sub>O) и конструкцией (нержавеющая сталь)

Топливо	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>				$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>				$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>			
	H <sub>2</sub>	Cr	Fe	Ni	H <sub>2</sub>	Cr	Fe	Ni	H <sub>2</sub>	Cr	Fe	Ni
$^{232}\text{Th}$	0,024	0,22	0,18	0,32	0,013	0,13	0,11	0,18	0,0012	0,028	0,020	0,030
$^{238}\text{U}$	0,029	0,26	0,22	0,38	0,015	0,15	0,12	0,20	0,0013	0,029	0,021	0,031
$^{232}\text{Th} + ^{238}\text{U}$ (3:1)	0,021	0,19	0,16	0,27	0,010	0,10	0,08	0,14	0,0009	0,026	0,018	0,026

целью получения примерно такой же величины  $K_{\infty}$  как для больших плотностей теплоносителя.

На основании данных табл. 2 и 3 можно видеть, что для всех плотностей теплоносителя  $\gamma_{т/н}$  сечения поглощения как теплоносителя, так и конструкционных материалов в случае использования топлива на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  меньше, чем в случае использования топливных композиций на основе только тория или только урана (во многом это обусловлено более плотной решеткой резонансов для смеси топлива). Данное заключение справедливо в обоих случаях – когда в качестве конструкционного материала используется  $\text{Zr} + 1\%\text{Nb}$  или нержавеющая сталь.

В качестве конструкционного материала оболочек твэлов в реакторах типа ВВЭР используется сплав на основе циркония по причине низкого сечения поглощения им нейтронов. Стоит отметить, что при низкой плотности теплоносителя ( $\gamma_{т/н} = 0,1 \text{ г/см}^3$ ) в случае использования топлива на основе смеси тория и урана, усредненные микросечения поглощения элементов стальной оболочки оказываются меньше, чем для оболочки из циркониевого сплава.

Другим паразитным поглощением нейтронов является поглощение продуктами деления. В связи с тем, что анализ сечений поглощения всех продуктов деления представляется чрезвычайно трудоемким процессом, были рассчитаны сечения поглощения «эффективных» продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  с помощью программы GETERA [6]. Таким образом, сделано допущение: вместо продуктов деления  $^{233}\text{U}$  рассматривались продукты деления от  $^{235}\text{U}$ . В табл. 4 приведены сечения поглощения продуктов деления  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  на начало кампании для топливных композиций на основе  $^{232}\text{Th}$ , на основе  $^{238}\text{U}$  и смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  ( $\gamma_{т/н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ).

Таблица 4

**Сечения захвата продуктами деления  
 $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  на начало кампании  
( $\gamma_{т/н} = 0,72 \text{ г/см}^3$ ), барн**

Топливо	Конструкционный материал оболочки твэлов и ТВС			
	Zr + 1%Nb		Нержавеющая сталь	
	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$
$^{232}\text{Th}$	7,5	9,6	7,3	9,4
$^{238}\text{U}$	8,5	10,6	8,0	10,1
$^{232}\text{Th} + ^{238}\text{U}$ (3:1)	6,6	8,5	6,4	8,3

Отсюда следует, что сечения поглощения продуктами деления в случае использования топлива на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  меньше, чем в случае использования топливных композиций на основе только тория или только урана. Опять же, это относится к обоим случаям – когда в качестве конструкционного материала используется  $\text{Zr} + 1\%\text{Nb}$  или нержавеющая сталь.

Проведем сравнение коэффициента воспроизводства (КВ)  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  при использовании различных топливных композиций и различных конструкционных материалов ( $\text{Zr} + 1\%\text{Nb}$  и нержавеющая сталь). В табл. 5 представлены КВ, которые являются по сути накоплением ядер в расчете на одно деление, а в табл. 6 – эффективный коэффициент размножения нейтронов (КВ\*) с учетом последующего сжигания накапливаемых делящихся нуклидов.

Из приведенных данных видна общая тенденция увеличения воспроизводства с уменьшением плотности теплоносителя. Наименее привлекательным с точки зрения накопления ядер в расчете на одно деление (табл. 5) является топливо на основе тория. Однако, если учитывать «воспроизводство» нейтронов от последующего сжи-

Таблица 5

**КВ для различных топливных композиций**

Топливо	Конструкционный материал оболочки твэлов и ТВС					
	Zr + 1%Nb			Нержавеющая сталь		
	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>
<sup>232</sup> Th	0,464	0,552	0,560	0,483	0,582	0,587
<sup>238</sup> U	0,481	0,609	0,645	0,485	0,632	0,668
<sup>232</sup> Th + <sup>238</sup> U (3:1)	0,483	0,575	0,592	0,526	0,637	0,621

Таблица 6

**КВ\* с учетом размножающих свойств для различных топливных композиций**

Топливо	Конструкционный материал оболочки твэлов и ТВС					
	Zr + 1%Nb			Нержавеющая сталь		
	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>
<sup>232</sup> Th	1,031	1,219	1,249	1,072	1,283	1,306
<sup>238</sup> U	0,890	1,104	1,156	0,891	1,140	1,196
<sup>232</sup> Th + <sup>238</sup> U (3 : 1)	1,011	1,186	1,254	1,097	1,313	1,314

гания накапливаемых нуклидов (табл. 6), то уже топливо на основе урана имеет наиболее низкие КВ (среди рассматриваемых композиций), по причине меньших  $\nu_{eff}^{(239)\text{Pu}}$  по сравнению с  $\nu_{eff}^{(233)\text{U}}$ . Для случая, когда в качестве конструкционного материала используется нержавеющая сталь, наибольшие значения КВ\* с учетом размножающих свойств имеет топливо на основе смеси <sup>232</sup>Th и <sup>238</sup>U. Это обусловлено более плотной решеткой резонансов, чем при использовании топлива на основе только тория или только урана. Более плотная решетка резонансов означает, что большее число нейтронов будет испытывать при замедлении захват на сырьевых нуклидах; уменьшится потеря нейтронов в результате поглощения конструкцией и теплоносителем (т.е. уменьшится последний член в правой части формулы (2)).

Отметим, что значения  $K_{\infty}$  для случая использования Zr+1%Nb в качестве конструкционного материала оболочки твэлов больше соответствующих значений  $K_{\infty}$  в том случае, когда оболочки твэлов выполнены из нержавеющей стали. Соответственно первый член в формуле (2), а, значит, и эффективный КВ\* нейтронов, оказывается меньше при использовании циркониевых оболочек твэлов. Таким образом, соответствующие значения эффективных КВ\* нейтронов для Zr + 1%Nb и стальной оболочки являются несопоставимыми по причине различных  $K_{\infty}$ .

Для рассматриваемых топливных композиций с помощью расчетного комплекса SCALE-4.3 получены достижимые выгорания (табл. 7) для случая использования не-

Таблица 7

**Достижимые выгорания, % т.а.  
(к/м – нержавеющая сталь)**

Топливо	$\gamma_{т/н} = 0,72$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,4$ г/см <sup>3</sup>	$\gamma_{т/н} = 0,1$ г/см <sup>3</sup>
<sup>232</sup> Th	3,02	2,68	11,47
<sup>238</sup> U	2,70	2,51	7,73
<sup>232</sup> Th + <sup>238</sup> U (3:1)	4,37	3,8	13,91

ржавеющей стали в качестве конструкционного материала оболочек твэлов и ТВС.

Переход от циркониевой оболочки к стальной не изменил картину: по причине лучших размножающих свойств  $^{233}\text{U}$  по сравнению с  $^{239}\text{Pu}$  достижимые выгорания топлива на основе тория выше, чем топлива на основе урана. А привлекательнее всего выглядит топливо на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ : благодаря более низким сечениям поглощения в теплоносителе и конструкционных материалах, а также более высоким, по сравнению с другими топливными композициями, коэффициентам воспроизводства нейтронов с учетом размножающих свойств накапливающихся делящихся нуклидов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы нейтронно-физические характеристики ( $^{233}\text{U}$ - $\text{Th}$ - $^{238}\text{U}$ )-топлива в условиях легководного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя.

При всех рабочих плотностях теплоносителя в сверхкритическом реакторе (плотность теплоносителя изменяется от 0,78 до 0,09 г/см<sup>3</sup>)  $^{233}\text{U}$  остается заметно выгоднее, чем  $^{239}\text{Pu}$  по размножающим свойствам:  $\nu_{\text{eff}}(^{233}\text{U}) = 2,22$ ;  $\nu_{\text{eff}}(^{239}\text{Pu}) = 1,82$ .

Показано, что использование топливной композиции на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  обеспечивает достижение более глубоких выгораний, нежели топливо на основе только тория или только урана. Предпочтительным с точки зрения максимального воспроизводства и достижения глубокого выгорания, оказывается топливо, в котором содержание  $^{232}\text{Th}$  к  $^{238}\text{U}$  имеет отношение 3:1.

Сечения поглощения нейтронов теплоносителем, конструкционными материалами и продуктами деления в случае использования топлива на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  меньше, чем в случае использования топливных композиций на основе только тория или только урана. Данное заключение справедливо в обоих случаях – когда в качестве конструкционного материала используется  $\text{Zr} + 1\%\text{Nb}$  и когда используется нержавеющая сталь. Переход от циркониевой оболочки к стальной не изменяет картину: более привлекательным остается топливо на основе смеси  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ .

## Литература

1. *Перера Юдит* Стимулирование инноваций. Страны рассчитывают на преимущества ядерной энергетики следующего поколения/Бюллетень МАГАТЭ 46/1, июнь 2004 г.
2. *Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Фальковский Л.Н. и др.* Перспективы создания прямоточного корпусного реактора с перегревом пара//Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып. 3.
3. *Глебов А.П., Клушин А.В.* Реактор с быстро-резонансным спектром нейтронов, охлаждаемый водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя//Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып. 5.
4. *Feiveson H.A.* In Memoriam – Ted Taylor. – Science and Global Security, 13: 117–128, 2005.
5. "SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses of Licensing Evaluation," NUREG/CR-0200, ORNL / NUREG / CSD-2 / RS (1997).
6. *Belousov N., Bychkov S., Marchuk Y. et al.* GETERA Code for Cell and Poly-Cell Calculations and Capabilities/Proceedings of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, Charleston Sheraton, Charleston, SC, USA, March 8-11, 1992. – V. 2. – P. 516-523.

Поступила в редакцию 11.09.2006