

## Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с различными выгорающими поглотителями

Приведен обзор зависимости глубины выгорания ядерного топлива от используемых поглотителей, в качестве которых рассматриваются  $Gd_2O_3$ ,  $PuO_2$ , смесь трансурановых элементов.

**Ключевые слова:** водо-водяные энергетические реакторы, глубина выгорания, выгорающие поглотители, изотопный состав.

**С. В. Широков, В. В. Заець**

**Глибина вигорання ядерного палива ВВЕР з різними вигораючими поглиначами**

Наведено огляд залежності глибини вигорання ядерного палива від використовуваних поглиначів —  $Gd_2O_3$ ,  $PuO_2$ , суміші трансуранових елементів.

**Ключові слова:** водо-водяні енергетичні реактори, глибина вигорання, вигораючі поглиначі, ізотопний склад.

© С. В. Широков, В. В. Заец, 2011

Одними из наиболее распространенных реакторных установок для АЭС являются водо-водяные легководные. Подобные установки планируется использовать и в дальнейшем при строительстве АЭС в разных странах. Главными направлениями совершенствования топливного цикла реакторов данного типа является повышение глубины выгорания топлива и удлинение кампании реактора, что достигается существенным повышением обогащения топлива подпитки и использованием выгорающих поглотителей (на периферии активной зоны топливо выгорает значительно меньше, чем топливо, расположенное в центре и вблизи него, поэтому весь избыток реактивности свежего топлива, определяющий глубину выгорания, в начале кампании должен быть скомпенсирован введением поглотителей).

От обогащения зависит расход природного урана, количество единиц разделительных работ, а также глубина выгорания топлива, определяющая эксплуатационные расходы и расходы на изготовление новых твэлов. При увеличении обогащения выгорающий поглотитель снижает размножающие свойства активной зоны реактора в начале кампании до значения, которое может быть скомпенсировано СУЗ.

Выгорающие поглотители в реакторах ВВЭР не только улучшают использование урана: они нужны для контроля пика мощности и регулирования температурного коэффициента реактивности.

В статье представлены результаты сравнительных расчетных исследований выгорания топлива в условиях открытого и замкнутого ядерного топливного цикла. Расчеты проводились при стандартных параметрах ВВЭР-1000.

Компания Westinghouse в реакторах типа PWR использует интегральные выгорающие поглотители  $ZrB_2$ , чтобы уменьшить реактивность в начале операционных циклов [1] с помощью так называемых инертных ТВС, которые состоят из стальных или циркониевых стержней, размещаемых в центральной части активной зоны [2].

В качестве выгорающего поглотителя в топливо ВВЭР-1000 добавляется  $Gd_2O_3$ . Изотопный состав природного гадолиния и сечение поглощения тепловых нейтронов при энергии 0,0253 эВ отдельных изотопов приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1. Изотопный состав природного гадолиния и тепловое сечение поглощения

Изотоп	Массовая доля, %	$\sigma$ , барн
152	0,2	1070
154	2,18	92,3
155	14,8	60 000
156	20,47	1,7
157	15,65	254 000
158	24,84	2
160	21,86	0,8

Выгорание топлива в настоящей работе рассчитывали с помощью программы MCNP [4] и комплекса программ SCALE [5].

На рис. 1 показана зависимость коэффициента размножения ячеек  $K_{яч}$  как функция глубины выгорания  $W$ . Под

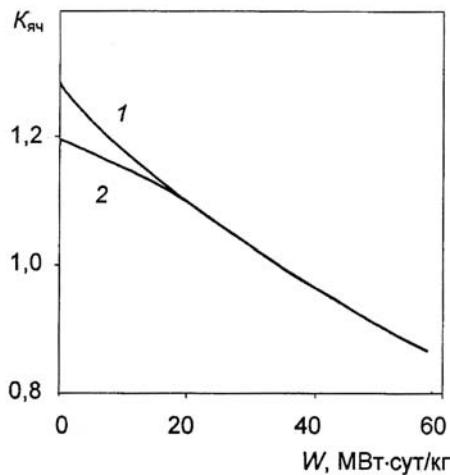


Рис. 1. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с  $Gd_2O_3$  (2) в качестве поглотителя

ячейкой подразумевается стандартная ТВС, содержащая 316 твэлов, 12 каналов для стержней СУЗ и центральную трубку. Расчетные кривые иллюстрируют изменение  $K_{яч}$  в течение кампании ВВЭР-1000. Кривая 1 соответствует загрузке в активную зону топлива, содержащего только  $UO_2$  обогащением 5 %, а кривая 2 — топлива, содержащего  $UO_2$  обогащением 5 % с добавлением в 12 твэлов каждой ТВС в качестве выгорающего поглотителя гадолиния в составе  $Gd_2O_3$  (3,7 % массы урана).

Поведение кривых на рис. 1 объясняется так. В начале кампании из смеси изотопов гадолиния преимущественно выгорают  $^{155}Gd$  и  $^{157}Gd$ . Их сечения обеспечивают выгорание со скоростью, превышающей скорость выгорания делящихся изотопов. В результате после начала работы реактора на номинальной мощности через относительно небольшой промежуток времени, соответствующий выгоранию топлива — 20 МВт-сут/кг, коэффициент размножения ячейки уменьшается до значения, совпадающего с коэффициентом без гадолиния.

При этом нечетные изотопы гадолиния  $^{155}Gd$  и  $^{157}Gd$  при захвате нейтронов переходят в стабильные  $^{156}Gd$  и  $^{158}Gd$ , сечения радиационного захвата которых в тепловой области малы. Таким образом, суммарное количество гадолиния в топливе в процессе кампании существует

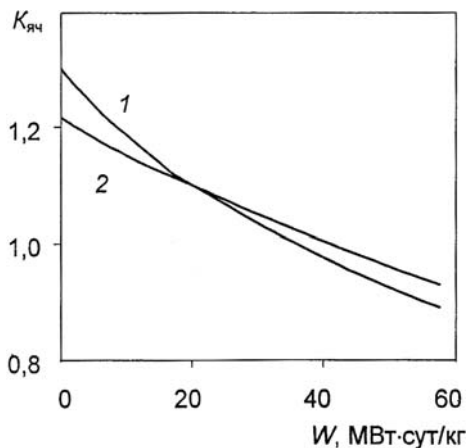


Рис. 2. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с  $PuO_2$  (2) в качестве поглотителя

венно не меняется. Дальнейшее уменьшение  $K_{яч}$  связано с выгоранием делящихся изотопов урана и плутония, что и обеспечивает проектную глубину выгорания топлива. Очевидно, что подобная схема не оптимальна из-за потерь нейтронов вследствие поглощения в  $^{155}Gd$  и  $^{157}Gd$ . Поэтому целесообразно исследовать возможность использования вместо смеси изотопов гадолиния в качестве выгорающего поглотителя другие элементы или соединения.

Рассмотрим динамику выгорания топлива в активной зоне ВВЭР-1000 при использовании  $PuO_2$  вместо  $Gd_2O_3$  (приведенные данные можно считать частным случаем смешанного оксидного топлива для ВВЭР-1000). В отличие от классического случая, в котором  $PuO_2$  добавляется в природный или отвалный уран,  $PuO_2$  вводится в обогащенный уран. Замена  $Gd_2O_3$  на  $PuO_2$  осуществляется лишь в условиях замкнутого топливного цикла, так как в этом случае предполагается, что топливный цикл включает в себя не только извлечение плутония из отработавшего топлива реакторов, но и надежные технологии для изготовления и обращения с твэлами в условиях высокой радиоактивности. Результаты расчетов приведены на рис. 2. Кривая 1, как и на рис. 1, описывает зависимость коэффициента размножения  $K_{яч}$  от выгорания при использовании в качестве топлива урана обогащением 5 %, кривая 2 — зависимость для случая, когда топливо начальной загрузки содержит смесь  $UO_2$  и  $PuO_2$  (**Pu — энергетический плутоний**).

Изотопный состав энергетического плутония при выгорании 60 МВт-сут/кг таков:

Изотоп	238	239	240	241	242
Масса в одной ТВС, кг	0,2	4	1,6	1	0,5

Для обоих вариантов обогащение урана 5 %, а количество  $PuO_2$  в топливе, которое обеспечивает равенство коэффициентов размножения при выгорании 20 МВт-сут/кг для первого и второго вариантов начальной загрузки активной зоны, составляет 1,6 % тяж. ат.

Из анализа расчетных кривых на рис. 2 следует, что замена гадолиния плутонием снижает реактивность активной зоны в начале кампании за счет поглощения нейтронов четными изотопами плутония и увеличивает глубину выгорания топлива в конце кампании в результате деления нечетных изотопов.

Последнее может быть использовано для снижения обогащения урана, используемого в качестве топлива, или уменьшения количества единиц разделительных работ, необходимых для изготовления загрузки ВВЭР-1000. При сохранении обогащения топлива увеличивается кампания топливной загрузки, а значит, уменьшается количество перегрузок отработавшего топлива в единицу времени работы реактора.

Изотопный состав и количество плутония, которое извлекается из отработавшего топлива энергетических реакторов, эксплуатируемых в условиях замкнутого топливного цикла, могут зависеть от состава загружаемого топлива. Поэтому выполнена серия расчетов выгорания топлива ВВЭР-1000, загрузка которого формировалась из отработавшего топлива первых пяти кампаний при удалении продуктов деления и добавлении  $^{235}U$  в целях компенсации выгоревшего  $^{235}U$  [3].

Согласно данным табл. 2 количество плутония, которое может быть извлечено из отработавшего топлива после очередной кампании, превышает количество плутония, извлекаемого после предыдущей кампании.

Таблица 2. Масса изотопов урана и плутония перед пятью кампаниями в расчете на одну ТВС, кг

Изотоп	Кампания				
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я
$^{235}\text{U}$	23,4	23	22,9	22,8	22,8
$^{236}\text{U}$	444,5	437,6	435,1	433,9	433,1
$^{238}\text{Pu}$		0,2	0,4	0,5	0,5
$^{239}\text{Pu}$		4	5,1	5,5	5,7
$^{240}\text{Pu}$		1,6	2,1	2,3	2,5
$^{241}\text{Pu}$		1	1,4	1,6	1,7
$^{242}\text{Pu}$		0,5	0,9	1,3	1,5
$\text{Pu, \%}$		1,6	2,1	2,4	2,6

Кривые на рис. 3 описывают зависимость коэффициента размножения  $K_{\text{яч}}$  от выгорания для пяти кампаний ВВЭР-1000, загрузка которых сформирована указанным способом. Эти кривые вместе с данными табл. 2 позволяют утверждать, что смесь изотопов плутония, которая получена из отработавшего топлива ВВЭР-1000, находящихся на различных стадиях своего жизненного цикла, может быть использована в качестве «выгорающего» поглотителя для вновь вводимых в эксплуатацию и действующих реакторов.

Отметим, что в случае использования гадолиния функции выгорающего поглотителя выполняются за счет относительно быстрого выгорания изотопов с большим сечением поглощения тепловых нейтронов. Такой же и даже больший эффект достигается за счет перехода в процессе кампании неделящихся четных изотопов плутония в делящиеся нечетные изотопы.

Кроме гадолиния и плутония, в качестве выгорающего поглотителя могут быть использованы нептуний, америций, кюрий — смесь трансурановых элементов, нарабатываемых в энергетических реакторах независимо от топливного цикла. Согласно расчетам их масса, нарабатываемая в ВВЭР-1000 за одну кампанию, после трех-

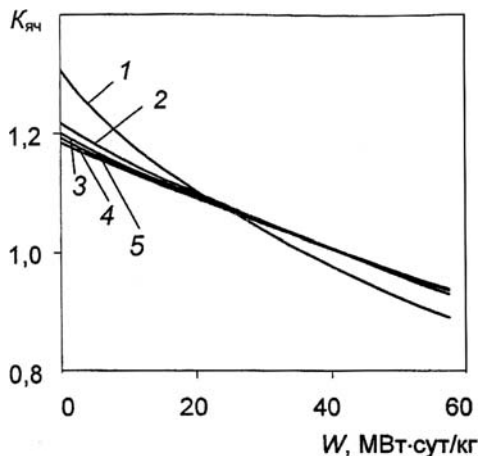


Рис. 3. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с  $\text{PuO}_2$  различного изотопного состава в качестве поглотителя (2–5)

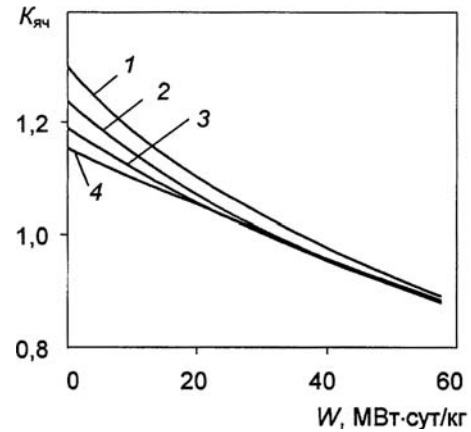


Рис. 4. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с добавлением Cm (2); Np, Am, Cm (3), Am, Cm (4) в качестве поглотителя в количестве 5 кг/т

летней выдержки составляет, кг/т топлива:  $^{237}\text{Np}$  — 1,13,  $^{241}\text{Am}$  — 0,49,  $^{243}\text{Am}$  — 0,24,  $^{244}\text{Cm}$  — 0,07. В условиях замкнутого топливного цикла изотопы нептуния, америция, кюрия при добавлении к начальной загрузке, как и в случае с изотопами плутония, позволяют обеспечить необходимый начальный коэффициент размножения. По мере захвата нейтронов и перехода в изотопы с большими сечениями деления они поддерживают деление, однако увеличения к концу кампании глубины выгорания топлива не происходит (рис. 4) [3].

Нептуний, америций, кюрий в основном являются долгоживущими  $\alpha$ -излучающими, т. е. обладают радиотоксичностью, наиболее опасной для человека [6]. Поэтому возможность их полезной утилизации в условиях замкнутого топливного цикла представляется привлекательной. Отметим, что количество этих нуклидов, нарабатываемых в настоящее время в энергетических реакторах, недостаточно для использования в качестве «выгорающего» поглотителя при планируемом масштабе сооружения АЭС с ВВЭР-1000.

В настоящей работе также рассмотрена возможность частичного использования ториевого цикла, в рамках которого  $^{232}\text{Th}$  после захвата нейтрона и последующего

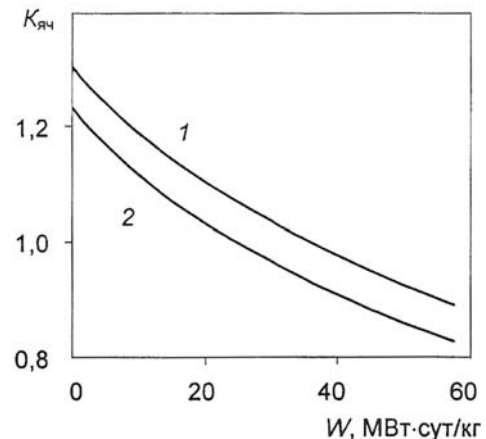


Рис. 5. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с  $\text{ThO}_2$  в качестве поглотителя (2)

радиоактивного распада превращается в делящийся  $^{233}\text{U}$ . К сожалению, расчеты показывают, что из-за малого сечения поглощения тепловых нейтронов в  $^{232}\text{Th}$  такой путь оказывается тупиковым. Кривые, соответствующие добавлению 10 % тория, показаны на рис. 5.

### Выводы

Расчетные исследования, связанные с увеличением глубины выгорания ядерного топлива ВВЭР-1000, показали следующее:

в условиях открытого топливного цикла использование природной смеси изотопов гадолиния в качестве выгорающего поглотителя является эффективным, хотя и не оптимальным способом достижения заданного выгорания топлива в ВВЭР-1000;

в условиях замкнутого топливного цикла добавление энергетического плутония к обогащенному урану, используемому в качестве топлива для ВВЭР-1000, в количестве 1,6 % тяж. ат. позволяет увеличить глубину выгорания топлива примерно на 0,5 МВт·сут/кг. Аналогичный результат может быть достигнут и при использовании иной смеси изотопов плутония;

в условиях замкнутого топливного цикла добавление к обогащенному урану всего набора изотопов нептуния, америция, кюрия, нарабатываемых в энергетических реакторах любого типа, позволяет поддерживать постоянный уровень радиотоксичности, определяемой долгоживущими  $\alpha$ -излучающими нуклидами, которые в противном случае накапливаются в долговременных хранилищах отработавшего топлива ядерных реакторов.

### Список литературы

1. *Seeker J.R., Erwin R.D.* 1990.  $\text{ZrB}_2$ : The Optimum Integral Fuel Burnable Absorber for PWRs. Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 62, p. 555, 556.
2. Vessel Fluence Reduction by Use of Inert Rod Cluster Assembly (IRCA). FRAGEMA, Lyon, France. P. 628–633. 21.D. T. Ingersoll. Status of Physics and Safety Analyses for the Liquid-Salt-Cooled Very High-Temperature Reactor (LS-VHTR). Oak Ridge. ORNL/TM-2005/218. 22. C. E. Sanders, John J. C. Wagner. Study of the effect of integral burnable absorbers for PWR bumup credit, ORNL/TM-2000/321, Oak Ridge National Laboratory (2001).
3. Бергельсон, Б. П. Глубина выгорания ядерного топлива с разными поглотителями / Б. П. Бергельсон, В. В. Белоног, А. С. Герасимов, Г. В. Тихомиров // Атомная энергия. — 2010. — Т. 109, вып. 3.
4. *Breitsmeister J.* MCNP — a General Monte Carlo *N*-Particle Transport Code. Version 4B. LA-12625-M, March 1997.
5. SCALE: a Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUGER/CR-0100, Rev. 4. ORNL/NUGER/CSD-2/R4, November 1993, v. I-III.
6. Бергельсон, Б. П. Эффективность трансмутации долгоживущей радиотоксичности в разных ядерных установках / Б. П. Бергельсон, С. А. Баллок // Атомная энергия. — 1996. — Т. 81, вып. 1.

Надійшла до редакції 23.03.2011 р.