

3. **Абрамов Б.Д.** Некоторые модификации теории связанных реакторов. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 5, с. 337—345.
4. **Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф.** Связанные реакторные системы импульсного действия. М.: Энергоатомиздат, 2003.
5. **Абрамов Б.Д.** Некоторые вопросы классификации и оценки погрешностей метода ОРУК определения реактивности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Вып. 3. Динамика и безопасность ядерных энергетических установок, 2004, с. 3—13.
6. **Абрамов Б.Д.** К концепции метода ОРУК измерения реактивности. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2006, № 4, с. 13—23.
7. **Абрамов Б.Д., Матвеев Ю.В., Пивоваров В.А.** Развитие методов контроля реактивности на основе многоточечных уравнений нейтронной кинетики реактора: Препринт ФЭИ-3171, 2009.

Поступила в Редакцию 29.12.09

УДК 621.039

ГЛУБИНА ВЫГОРАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР С РАЗНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ

*Бергельсон Б.Р., Белоног В.В., Герасимов А.С. (ИТЭФ, г. Москва),
Тихомиров Г.В. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)*

Основными источниками энергии для АЭС, которые эксплуатируются и сооружаются в настоящее время, являются водо-водяные легководные реакторы. Подобные установки планируется использовать и в дальнейшем при строительстве АЭС в разных странах вне зависимости от специфики национальных планов развития ядерной энергетики. В статье представлены результаты сравнительных расчетных исследований выгорания топлива в условиях открытого и замкнутого ядерного топливного цикла. Расчеты проводились при стандартных параметрах ВВЭР-1000.

Обогащение урана, используемого в качестве топлива, является основным, хотя и не единственным показателем экономической эффективности АЭС с ВВЭР-1000. От обогащения зависит расход природного урана, количество единиц разделительных работ, а также, что, по-видимому, наиболее важно, глубина выгорания топлива, определяющая эксплуатационные расходы и расходы на изготовление новых твэлов.

Главная цель научно-технических разработок, касающихся топливного цикла энергетических реакторов, — это увеличение глубины выгорания топлива. Обычно оно достигается путем повышения начального обогащения и использования выгорающих поглотителей. При увеличении обогащения выгорающий поглотитель снижает размножающие свойства активной зоны реактора в начале кампании до значения, которое может быть скомпенсировано системой СУЗ. В качестве выгорающего поглотителя в

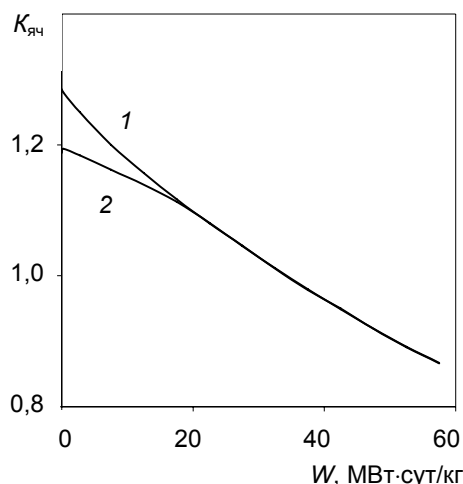
топливо ВВЭР-1000 добавляется Gd_2O_3 . Изотопный состав природного гадолиния и сечение поглощения тепловых нейтронов при энергии 0,0253 эВ отдельных изотопов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Изотопный состав природного гадолиния и тепловое сечение поглощения

Изотоп	Массовая доля, %	σ , б
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 [1] и комплекса программ SCALE [2].

На рис. 1 показана зависимость коэффициента размножения ячейки $K_{яч}$ как функция глубины выгорания W . Под 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 — в активную зону загружается топливо, содержащее только UO_2 обогащением 5%, кривая 2 — в активную зону загружается топливо, содержащее UO_2 обогащением 5%, в 12 твэлов каждой ТВС добавляется в качестве выгораю-

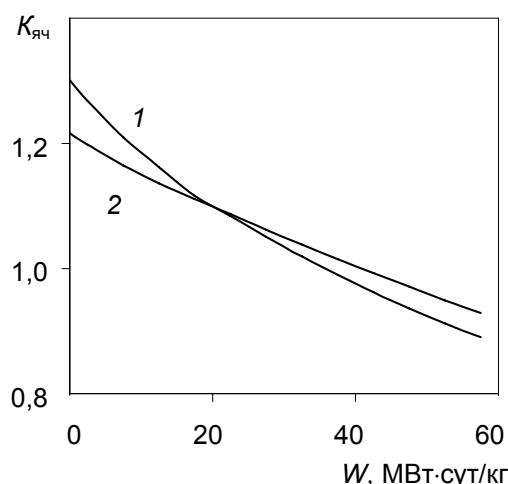


Р и с. 1. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с Gd_2O_3 в качестве поглотителя (2)

щего поглотителя гадолиний в виде Gd_2O_3 (3,7% массы урана).

Поведение кривых на рис. 1 объясняется следующим образом. 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 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 существенно не меняется. Дальнейшее уменьшение реактивности $K_{яч}$ 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 $^{155,157}Gd$. 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 рассматривать как частный случай смешанного оксидного топлива для ВВЭР-1000). В отличие



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

от классического, в котором PuO_2 добавляется в природный или отвалный уран, PuO_2 вводится в обогащенный уран. Замена Gd_2O_3 на PuO_2 осуществима 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 — ту же зависимость для случая, когда топливо начальной загрузки содержит смесь UO_2 и PuO_2 , где Pu — энергетический плутоний. Изотопный состав плутония представлен в табл. 2. Для обоих вариантов обогащение урана 5%, 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.

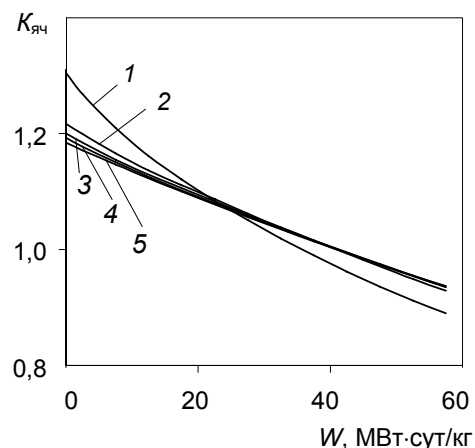
Таблица 2. Изотопный состав энергетического плутония при выгорании 60 МВт·сут/кг

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

Из анализа расчетных кривых на рис. 2 следует, что замена гадолиния на плутоний 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. При последнем утверждении, конечно, не принимаются во внимание проблемы, которые могут возникнуть в процессе изготовления сердечников твэлов из отработавшего топлива реакторов, и надежность этих твэлов при большом выгорании. Однако авторы исходят из того, что эти и подобные проблемы должны быть решены при переходе от открытого к замкнутому топливному циклу.

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 была проведена 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 .

Согласно данным табл. 3 количество плутония, которое может быть извлечено из отрабо-



Р и с. 3. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с PuO_2 различного изотопного состава в качестве поглотителя (2—5)

тавшего топлива после очередной кампании, превышает количество плутония, извлекаемого после предыдущей кампании.

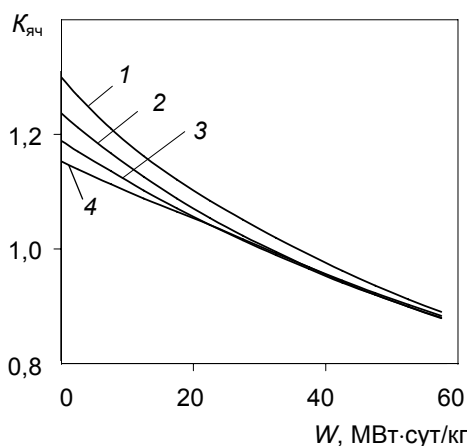
Кривые на рис. 3 описывают зависимость коэффициента размножения $K_{яч}$ от выгорания для пяти кампаний ВВЭР-1000, загрузка которых сформирована указанным способом. Эти кривые вместе с данными табл. 3 позволяют утверждать следующее. Смесь изотопов плутония, которая получена из отработавшего топлива ВВЭР-1000, 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 3-летней выдержки составляет, кг/т топлива: ^{237}Np 1,13, ^{241}Am 0,49, ^{243}Am 0,24, ^{244}Cm 0,07 [3]. В условиях замкнутого топливного цикла изотопы нептуния, америция, кюрия при добавлении к начальной загрузке, как и в случае с изотопами плутония, позволяют обеспечить необходимый

Т а б л и ц а 3. 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}U	23,4	23	22,9	22,8	22,8
^{236}U	444,5	437,6	435,1	433,9	433,1
^{238}Pu		0,2	0,4	0,5	0,5
^{239}Pu		4	5,1	5,5	5,7
^{240}Pu		1,6	2,1	2,3	2,5
^{241}Pu		1	1,4	1,6	1,7
^{242}Pu		0,5	0,9	1,3	1,5
Pu, %		1,6	2,1	2,4	2,6



Р и с. 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

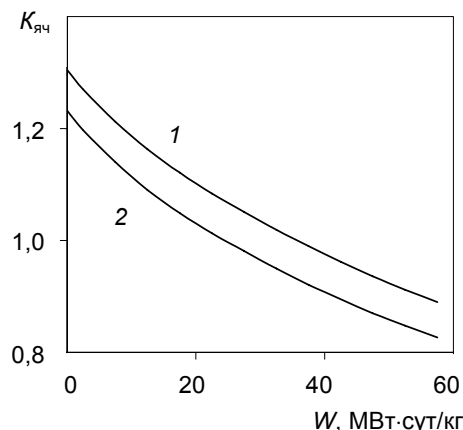
начальный коэффициент размножения. По мере захвата нейтронов и перехода в изотопы с большими сечениями деления они поддерживают деление. Однако увеличения к концу кампании глубины выгорания топлива не происходит. Соответствующие кривые на рис. 4 описывают этот процесс.

Необходимо отметить, что нептуний, америций, кюрий в основном являются долгоживущими α -излучающими, т.е. обладают радиотоксичностью, наиболее опасной для человека [4]. 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 была также рассмотрена возможность частичного использования ториевого цикла, в рамках которого ^{232}Th после захвата нейтрона и последующего радиоактивного распада превращается в делящийся ^{233}U . К сожалению, расчеты показывают, что из-за малого сечения поглощения тепловых нейтронов в ^{232}Th такой путь оказывается тупиковым. Кривые, соответствующие добавлению 10% тория, показаны на рис. 5.

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 спо-



Р и с. 5. Выгорание топлива ВВЭР-1000 без поглотителя (1) и с ThO_2 в качестве поглотителя (2)

собом 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 α -излучающими нуклидами, которые в противном случае накапливаются в долговременных хранилищах отработавшего топлива ядерных реакторов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Briesmeister J. MCNP — a General Monte Carlo N -Particle Transport Code. Version 4B. LA-12625-M, March 1997.
2. SCALE: a Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUGER/CR-0200, Rev. 4. ORNL/NUGER/CSD-2/R4, November 1993, v. I—III.
3. Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Киселев Г.В., Тихомиров Г.В. Сценарии трансмутации долгоживущих радионуклидов. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 4, с. 271—277.
4. Бергельсон Б.Р., Балюк С.А. Эффективность трансмутации долгоживущей радиотоксичности в разных ядерных установках. — Там же, 1996, т. 81, вып. 1, с. 66—68.

Поступила в Редакцию 17.06.2010