

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1982.
2. Крицкий В.Г., Стяжкин П.С., Березина Ю.А. и др. Влияние качества теплоносителя на эксплуатационную надежность элементов оборудования АЭС с РБМК-1000. — Теплоэнергетика, 2000, № 7, с. 2—9.
3. Прозоров В.В. Защита от коррозии перлитной стали в стояночных и переходных режимах ЯЭУ. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 3, с. 162—166.
4. Прозоров В.В., Вологодина Г.П. Предпусковая подготовка поверхностей оборудования АЭС, выполненного из сталей перлитного класса. — Теплоэнергетика, 1987, № 9, с. 38—40.
5. Прозоров В.В. Оксидирование перлитных сталей в нитратных растворах. — Защита металлов, 1987, т. 23, № 2, с. 289—292.
6. Солонин М.И., Прозоров В.В., Лысенко А.А. и др. Оксидирование перлитных сталей в нитритных растворах. — Там же, 2002, т. 38, № 5, с. 524—527.

Поступила в Редакцию 26.09.03

УДК 621.039.526

ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОГО ВЫЖИГАНИЯ АМЕРИЦИЯ И НЕПТУНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА

Елисеев В.А., Поплавская Е.В. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейтунского)

Наиболее острой проблемой, связанной с функционированием ядерной энергетике, является накопление высокоактивных отходов. Быстрые реакторы с натриевым теплоносителем могут их эффективно утилизировать, поскольку именно они, обладая высокоэнергетическим спектром и высокой плотностью потока нейтронов, способны выжигать наиболее долгоживущую и опасную часть отходов — америций и нептуний, которые выделяются при переработке топлива тепловых реакторов (в топливе ядерных реакторов образуется также кюрий, но в настоящее время целесообразным считается его выдерживать в течение длительного времени). Известны различные способы выжигания америция и нептуния в быстрых реакторах: добавление в топливо традиционных активных зон быстрых реакторов, использование специализированных активных зон с топливом без ^{238}U , содержащим плутоний или ^{235}U и допустимое по условиям ядерной безопасности количество америция и нептуния, или облучательных устройств, которые размещаются на периферии обычной активной зоны. Общим недостатком указанных способов является относительно невысокая глубина их выжигания, что требует многократной повторной переработки. В то же время обращение с ними, т.е. переработка и рефабрикация топлива дороги из-за их высокой активности и тепловыделения [1—3]. Поэтому большой интерес представляет однократное глубокое выжигание (до 90% тяж. ат.) с последующим захоронением в геологические формации без переработки, что позволяет избежать их рециклирования.

В статье рассмотрен способ глубокого выжигания америция и нептуния в специальных сборках, которые состоят из элементов, содержащих выжигаемые нуклиды в инертной матрице, и элементов с гидридом циркония. Расчетно-теоретические исследования показали, что, разместив такие сборки в активной зоне БН-800

со смешанным уран-плутониевым топливом, можно достичь выгорания 90—95% тяж. ат. и более за две-три кампании (2,5—3,5 года). Такой реактор позволяет утилизировать до 110 кг америция и нептуния в год. Особо отметим, что выгоревшие сборки содержат в основном продукты деления и 5—10% остаточного количества различных актиноидов (Pu, Am, Cm и др.). Их можно непосредственно захоранивать в геологические структуры без промежуточной дорогостоящей переработки. Для большей надежности захоронения в качестве материала инертной матрицы, в которую помещаются америций и нептуний, можно использовать камнеподобное топливо. Эта топливная композиция, стойкая к выщелачиванию при захоронении в геологических формациях, представляет собой соединение шпинели ($MgAl_2O_4$) и некоторых других инертных материалов с оксидами плутония и транс-плутониевых элементов.

Расчетно-теоретические исследования. Исследовался реактор типа БН-800 с оксидным уран-плутониевым топливом с активной зоной, расширенной до 702 ТВС (в проектном варианте активной зоны 565 ТВС). Основные характеристики такого реактора следующие [4]:

Высота активной зоны, см . . .	88
Число органов СУЗ . . .	30
Размер ТВС под ключ × толщина стенки, мм . . .	94,5×2,5
Шаг установки ТВС, мм . . .	100
Число твэлов в ТВС . . .	127
Диаметр твэла × толщина оболочки, мм . . .	6,6×0,4
Объемная доля топлива . . .	0,388
Кампания ТВС, эф. сут . . .	3×140

В исследуемой модели активной зоны часть ТВС с оксидным топливом заменяли выжигательными сборками, элементы которых содержали только AmO_2 или NpO_2 в инертной (камнеподобной) матрице и замедлитель. Эти сборки размещали в регулярном порядке по всей активной зоне (расширенная активная зона позволяет разместить 133 сборки). Расчеты проводили по трехмерной диффузионной программе TRIGEX с библиотекой констант БНАБ-93 и системой их подготовки CONSYST. Выгорание топлива рассчитывали по программе CARE [5—8]. Для уточняющих расчетов использовали программу TWODANT с P_1 - и S_{16} -приближениями.

Исследовали зависимость выгорания от соотношения количества америция, нептуния и инертной матрицы в выжигательной сборке и влияние замедлителя (гидрида циркония) на выгорание. Состав выжигательныхборок в первых расчетных оценках гомогенизировали, при этом количество америция и нептуния в них варьировали в широких пределах — от 100% (~25 кг на сборку) до 0,1% (25 г на одну сборку). Из табл. 1 и рис. 1 можно видеть, что соотношение количества америция и инертного материала в выжигательных сборках не существенно влияет на выгорание (рис. 1, кривая 1). Это связано с незначительным изменением их сечений вследствие резонансных блокировок. В то же время масса выгоревших материалов с увеличением загрузки америция и нептуния возрастает, достигая максимума при 100%-ной загрузке (кривая 3).

Таблица 1. Выгорание америция и нептуния в зависимости от их содержания в выжигательной сборке за 840 сут (в скобках за 420 сут), % тяж. ат.

Содержание в топливной композиции, %	Масса в сборке, кг	Am + матрица	Am + замедлитель	Np + матрица	Np + замедлитель
0,1	0,025	25,2 (11)	98,6 (88,3)	24,1 (10,5)	99,4 (94,3)
0,5	0,125	24,7(10,8)	98,4 (86,1)	23,3 (10,2)	99,4 (93,9)
1	0,25	24,3 (10,7)	98,2 (84,3)	23,1 (10,1)	99,3 (93,1)
5	1,25	23,1 (10,1)	92,8 (62,3)	22,2 (9,8)	96,9 (78,2)
10	2,5	22,1 (9,7)	79,1 (44)	21,5 (9,4)	91,1 (58,1)
20	5	20,8 (9,1)	56,8 (28)	20,0 (9)	65,3 (32,1)
30	7,5	19,8	42,8	19,2	43,9
50	12,5	18,7	29,3	18,3	25,6
70	17,5	17,9	22,3	17,7	20,1
80	20	17,6	20,1	17,5	18,8
100	25	17	17	17,1	17,1

Использование в выжигательных сборках сильного замедлителя (гидрида циркония) приводит к возрастанию выгорания америция и нептуния до 98—99% тяж. ат. при их малом содержании (кривая 2). Это происходит из-за смягчения нейтронного спектра в сборках и многократного возрастания сечений взаимодействия выжигаемых нуклидов.

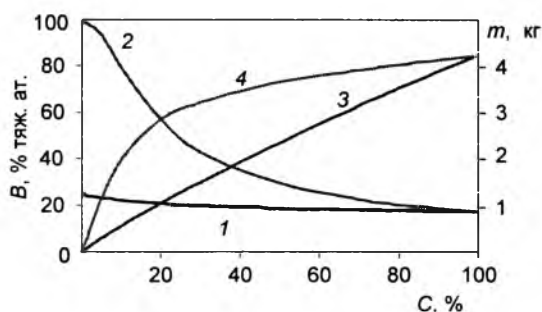
Увеличение загрузки в выжигательные сборки с замедлителем приводит к ужесточению спектра, уменьшению сечений захвата, и, следовательно, снижению выгорания. В предельном случае, когда в выжигательные сборки загружены только америций и нептуний (без матрицы или замедлителя), спектр в них становится быстрым и выгорание снижается до 17% тяж. ат. Это позволяет сделать следующие предварительные выводы:

если требуется выжигать максимальное количество (глубина выгорания при этом не важна), их содержание в выжигательных сборках должно быть максимально возможным (см. рис. 1, кривые 3, 4);

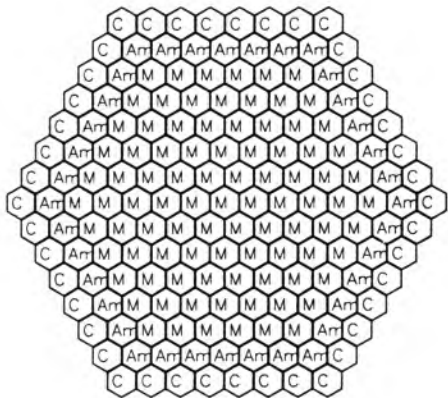
достижение глубокого выгорания (свыше 90% тяж. ат.) за сравнительно небольшой период времени возможно только при их сильном разбавлении замедлителем;

длительность облучения выжигательных сборок может составлять одну, две или три кампании (420, 840 или 1260 эф. сут), в последнем случае радиационные повреждения их чехлов составят ~160 смещ./ат., что допустимо при использовании перспективной стали ферритно-мартенситного класса.

Возможные конструкции выжигательных сборок. Реальная конструкция выжигательных сборок предполагает гетерогенное размещение замедлителя и



Р и с. 1. Зависимость выгорания и массы выгоревшего америция от его содержания в матрице (замедлителе) при времени облучения 2х420 сут (две кампании)



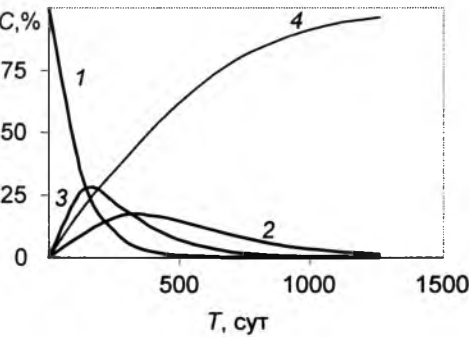
Р и с. 2. Модель выжигательной сборки

обычными ТВС с оксидным топливом (на рисунке не показаны). Граничные условия такой модели зеркальные. Содержание америция и нептуния в элементах выжигательных сборок варьировали от 10 до 35% их максимальной загрузки (т.е. ~0,71—2,5 кг тяж. ат. на сборку). Расчетные исследования такой конструкции проводили как в диффузионном приближении по программе ТРИГЕКС, так и в транспортном по программе TWODANT.

Исследования в целом подтвердили результаты предварительных оценок с гомогенизированными выжигательными сборками. За две кампании (840 эф. сут) в БН-800 действительно можно достичь выгорания ~80% тяж. ат. при загрузке 2,5 кг на одну выжигательную сборку или около 90% тяж. ат. при загрузке 0,71 кг на одну сборку. За три кампании (1260 сут) те же показатели могут быть увеличены до 90—94 и 96—98% соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Выгорание америция и нептуния в зависимости от их загрузки в выжигательную сборку при времени облучения 840 сут

Нуклид	Загрузка, кг	Выгорание, % тяж. ат.
²⁴¹ Am	0,71	87
	2,5	79
²³⁷ Np	0,71	93
	2,5	86



Р и с. 3. Изменение изотопного состава америция при трансмутации

нуклидов. Иллюстрация одного из возможных вариантов такой конструкции с потвэльным описанием представлена на рис. 2. Центральная часть сборки, состоящая из 91 ячейки с гидридом циркония (ячейки «М»), окружена одним рядом из 36 ячеек с америцием и нептунием (ячейки «Am») в инертной матрице. Материал матрицы безразличен, им может быть камнеподобное топливо. Крайний ряд (42 ячейки «С») моделирует чехол выжигательной сборки и зазор между ТВС. Эти ячейки состоят только из стали и натрия. Каждая выжигательная сборка окружена

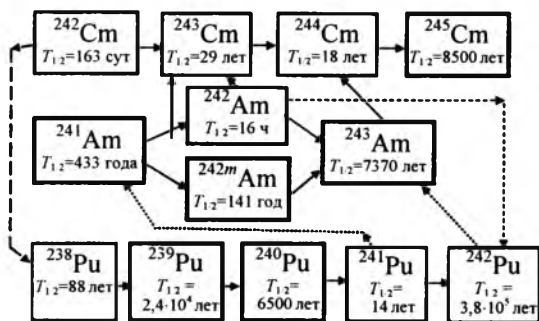
Выжигание америция. На рис. 3 (кривая 1) можно видеть, что америций утилизируется в течение первой кампании за 420 сут. Однако 40% америция к этому моменту переходит в другие нуклиды, в основном ²⁴²Cm и ²³⁸Pu (кривые 2, 3), поэтому выгорание составляет всего ~60% тяж. ат. (кривая 4). Схема основных изотопных переходов америция показана на рис. 4.

За вторую кампанию выгорание возрастает до 90% тяж. ат. Оставшиеся после

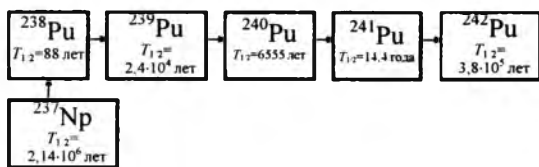
этого актиноиды (~9% тяж. ат.) состоят в основном из ^{238}Pu и ^{244}Cm , которые и определяют остаточную α -активность (на долю ^{238}Pu приходится 40% активности, ^{244}Cm — 47%). Количество невыгоревших актиноидов можно уменьшить еще вдвое (т.е. до 4% тяж. ат.), если облучать топливо еще одну, третью кампанию. Однако в этом случае возникает вопрос о том, что является приоритетом: выжигание америция и нептуния до 96% тяж. ат. для снижения радиотоксичности захораниваемых актиноидов (Cm, Bk, Cf) или сохранение времени выжигания, равного двум кампаниям, но увеличение объема выжигаемых материалов.

Выжигание нептуния. Нептуний сначала превращается в ^{238}Pu , который затем последовательно переходит в более высокие изотопы плутония (рис. 5). Процесс его выгорания (рис. 6, кривая 1) происходит быстрее, чем в случае с ^{241}Am . Невыгоревшая часть актиноидов представлена в основном ^{238}Pu и ^{239}Pu (кривые 2, 3), америция и кюрия в этом случае образуется в 2—3 раза меньше.

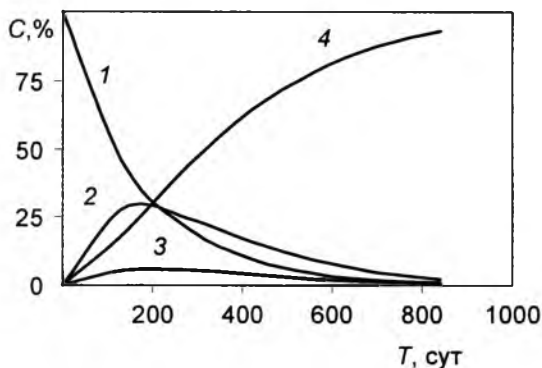
На результирующую глубину выгорания влияет не только время облучения и загрузка выжигаемых нуклидов, но и способ их расположения в выжигательных сборках (табл. 3). Наиболее эффективен вариант с расположением выжигаемых нуклидов на периферии сборки, замедлителя — в виде сплошной центральной втулки (тогда его помещается вдвое больше). В этом случае все предыдущие оценки глубины выгорания следует увеличить на 7% тяж. ат.



Р и с. 4. Схема основных изотопных переходов при трансмутации ^{241}Am



Р и с. 5. Схема основных изотопных переходов при трансмутации ^{237}Np



Р и с. 6. Изменение изотопного состава нептуния при трансмутации

Т а б л и ц а 3. Зависимость выгорания ^{241}Am от способов его расположения в сборке

Расположение	Выгорание, % тяж. ат.
Внешний ряд элементов с америцием, внутренние ряды — с замедлителем	87
Элементы с америцием и замедлителем расположены в шахматном порядке	91
Внешний ряд элементов с америцием, замедлитель — в центральной втулке	94

Выравнивание тепловыделения по активной зоне. Введение в активную зону выжигательныхборок с замедлителем приводит к возникновению локальных

всплесков тепловыделения в соседних ТВС (табл. 4). Однако это явление можно устранить, если облицевать чехлы выжигательных сборок фольгой из кадмия (толщиной $\sim 0,2$ мм), поглощающей тепловые нейтроны. Расчеты по программе TWODANT показали, что всплески тепловыделения в этом случае могут быть снижены до 10% номинальных, что приемлемо. На выгорание актиноидов кадмиевая фольга не влияет.

Т а б л и ц а 4. Зависимость всплеска тепловыделения от способа расположения америция и замедлителя (вариант с $0,71$ кг ^{241}Am на сборку)

Расположение замедлителя	Всплеск тепловыделения, %	Всплеск тепловыделения с кадмиевой фольгой, %
В центральной втулке	200	30 (10)
В трубках (твэлах)	60 (40)	30 (10)
В шахматном порядке	45	20

*В скобках рассчитано по программе TWODANT, остальные — по программе ТРИГЕКС.

Натриевый пустотный эффект реактивности. Натриевый пустотный эффект реактивности рассматривался для наихудшего случая (с загрузкой $2,5$ кг америция или нептуния на сборку) для различных состояний активной зоны: начало, конец микрокампании и начальная загрузка выжигательных сборок (табл. 5). Гипотетический максимальный положительный натриевый пустотный эффект реактивности при осушении как ТВС, так и выжигательных сборок $0,5\beta_{\phi}$ наблюдается только в случае начальной загрузки активной зоны, в которую помещены свежие выжигательные сборки. В дальнейшем он имеет только отрицательные значения.

Т а б л и ц а 5. Натриевый пустотный эффект реактивности, β_{ϕ}

Состояние активной зоны	Область осушения	
	ТВС	ТВС и выжигательные сборки
Начальная загрузка	-2,5	0,5
Начало микрокампании (350 сут)	-2,5	-1,5
Конец микрокампании (490 сут)	-4	-2

Авторы выражают благодарность В.И. Матвееву за полезную критику и плодотворные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурьевский И.В., Елисеев В.А., Кривицкий И.Ю. и др. Концептуальные исследования использования ROX-топлива в быстрых натриевых энергетических реакторах: Препринт ФЭИ-2958, 2002. 33 с.
2. Кривицкий И.Ю., Тихомиров А.В., Бурьевский И.В. Влияние учета гетерогенной структуры облучательных устройств с замедлителем на процесс трансмутации актиноидов в быстром реакторе. — В сб.: DISNAI-2002, Литва, Висагинас, 1—7 июля 2002, с. 181—190.
3. Матвеев В.И., Кривицкий И.Ю., Елисеев В.А. и др. Использование быстрых натриевых реакторов для эффективной утилизации плутония и младших актиноидов. — В сб.: Российский научно-технический форум «Ядерные реакторы на быстрых нейтронах», Обнинск, 8—12 декабря 2003, с. 74—75.

4. Казачковский О.Д., Матвеев В.И., Елисеев В.А., Цибуля А.М. Перспективы использования МОХ-топлива в быстрых реакторах с натриевым охлаждением. — Там же, с. 66—67.
5. Серегин А.С. Аннотация программы ТРИГЕКС для малогруппового нейтронно-физического расчета реактора в трехмерной геометрии. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1983, вып. 4(32), с. 34—36.
6. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. — Там же. Сер. Ядерные константы, 1996, вып. 1, с. 59—98.
7. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Поляков А.Ю., Цибуля А.М. Аннотация программы CONSYST. — Там же, 1999, вып. 2, с. 148—150.
8. Кочетков А.Л. Программа CARE — расчет изотопной кинетики, радиационных и экологических характеристик ядерного топлива при его облучении и выдержке: Препринт ФЭИ-24316, 1995. 14 с.

Поступила в Редакцию 17.09.03

УДК 621.039.586.531.78.781

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АЭС НА ОСНОВЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ В НИХ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Трофимов А.И., Трофимов М.А., Худаско В.В. (ИАТЭ)

Целостность металла оборудования в значительной мере зависит от его напряженного состояния. Измерение напряженного состояния относится к мероприятиям ранней диагностики оборудования АЭС, когда еще не произошло разрушения целостности металла. Контроль напряжений в металле позволяет сократить объем контроля целостности металла, что важно для оборудования первого контура АЭС, где ограничен допуск персонала.

Обычно напряженное состояние металла оборудования АЭС определяют тензометрическим методом, основанным на измерении деформации поверхностного слоя объекта. О внутренних напряжениях при использовании данного метода можно судить лишь косвенно. Метод тензометрии не может применяться для определения остаточных напряжений. Внутренние напряжения в конструкционных материалах в настоящее время измеряют магнитным, ультразвуковым и рентгеновским методами, каждый из которых также имеет ограниченную область применения.

В настоящей статье рассмотрен бесконтактный метод измерения напряженного состояния металла оборудования АЭС, основанный на возникновении в металлах э.д.с. при ударных нагрузках [1]. Предложенный метод не имеет ограничений в областях применения, обладает высокой чувствительностью и позволяет определять напряженное состояние металла при малых гидродинамических и тепловых ударных нагрузках. С его помощью можно контролировать как состояние металла, так и гидродинамические и тепловые удары в элементах оборудования АЭС.

В исследованиях [2] возникновение э.д.с. связывали с ионно-инерционным явлением, заключающимся в возникновении стороннего электрического тока в проводниках при ударных нагрузках. Дальнейшие исследования показали, что значительно больший эффект возникновения электрического сигнала при ударных нагрузках наблюдается в парах металлов за счет термоэлектрического явления и диффузии электронов перед фронтом ударной волны [1]. При ударных нагрузках