

УДК 621.039

АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ ПЭЛ ПС СУЗ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Н.Н. Белаиш, А.В. Кушитым, В.Р. Татаринов, И.А. Чернов

(Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл» Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков)

Приведен анализ перспективных технических решений, направленных на увеличение ресурса и повышение работоспособности поглощающих элементов для поглощающих стержней системы управления и защиты ядерных энергетических реакторов. Рассмотрены вопросы физической эффективности, радиационной стойкости, совместимости поглощающих и конструкционных материалов. Показано, что наиболее перспективными поглощающими материалами для энергетических ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 являются: металлический гафний, гафнат диспрозия, титанат диспрозия, диборид гафния и их композиции с карбидом бора. Приведены и проанализированы преимущества и недостатки известных вариантов поглощающих элементов с комбинированными поглотителями.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения безопасности и экономичности эксплуатации ядерных энергетических установок в мире постоянно ведутся разработки, направленные на усовершенствование поглощающих элементов (ПЭЛ) поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) ядерных реакторов.

Как правило, все работы в этом направлении имеют комплексный характер и решают следующие задачи:

- увеличение длительности и надежности работы ПЭЛ за счет использования более совершенных конструкций, радиационно- и коррозионно-стойких поглощающих и конструкционных материалов;
- повышение физической эффективности ПЭЛ за счет использования новых поглощающих материалов и композиций;
- сохранение работоспособности и целостности ПЭЛ при возникновении аварийных ситуаций за счет увеличения жесткости конструкции и обеспечения совместимости между поглощающими и конструкционными материалами при повышенных температурах.

Задачей настоящей работы является исследование и анализ технических решений и разработок, направленных на увеличение ресурса и повышение работоспособности ПЭЛ ПС СУЗ ядерных энергетических реакторов, а также определение наиболее перспективных направлений в разработках ПЭЛ для реакторов типа ВВЭР–1000.

КОНСТРУКЦИИ ПЭЛ

Известные конструкции ПЭЛ энергетических водо-водяных реакторов условно можно разделить на три группы, имеющие следующие особенности:

- поглотитель изготовлен из однотипного материала и размещен внутри герметичной оболочки;
- поглотитель набран по высоте ПЭЛ из различных материалов и размещен внутри герметичной оболочки;

- поглотитель набран по высоте ПЭЛ из различных материалов, один из поглощающих материалов размещен внутри герметичной оболочки, а другой выполнен в виде стержня, соединенного с оболочкой.

Поглощающие элементы первой группы нашли широкое применение в первых поколениях энергетических водо-водяных реакторов. Их конструкция включала поглощающий материал, оболочку, загерметизированную верхней и нижней концевыми деталями и газосборник.

В ПЭЛ реакторов типа PWR в качестве поглотителя использовали сплав Ag-15%In-5%Cd в виде таблеток или стержней, а в реакторах ВВЭР порошок карбида бора с естественным содержанием ^{10}B . Используемые поглощающие материалы имеют ряд недостатков. В частности, основным недостатком ПЭЛ реактора ВВЭР-1000 является несоответствие мировому уровню срока службы: 2-3 года в режиме автоматического регулирования и 5 лет в режиме аварийной защиты, что связано с радиационными повреждениями как поглотителя так и материала оболочки.

В связи с этим, дальнейшим шагом в развитии ПЭЛ является разработка конструкций, в которых столб поглотителя нейтронов находится внутри герметичной оболочки и выполнен по высоте из двух частей (вторая группа). Верхняя часть ПЭЛ содержит поглотитель, имеющий с нейтронами n, α -реакцию, а в нижней части ПЭЛ содержится материал, имеющий с нейтронами n, γ -реакцию. В качестве поглотителя, имеющего с нейтронами n, α -реакцию, в большинстве случаев используется карбид бора, а в нижней части применяется металлический гафний, сплав серебра (Ag-15%In-5%Cd), титанат диспрозия ($\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$) или гафнат диспрозия ($\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$), причем высота столба данных поглотителей может составлять до 30 % от полной высоты поглотителя нейтронов [1].

Наличие в нижней части ПЭЛ поглощающих материалов, имеющих с нейтронами n, γ -реакцию позволяет существенно снизить распухание карбида бора и газовыделение за счет вывода его из областей с высокими потоками нейтронов при расположении стержня во время эксплуатации в верхней части активной зоны или над ней.

Известны конструкции ПЭЛ, разработанные для реакторов PWR [2], в которых верхняя часть столба поглотителя набрана из таблеток карбида бора, а нижняя из стержней гафния или сплава Ag-15%In-5%Cd (рис. 1а).

Для реакторов типа ВВЭР-1000 российские специалисты разработали ряд конструкций ПЭЛ, в которых верхняя и нижняя части столба поглотителя состоят из порошковых композиций. При этом в верхней части используется порошок карбида бора, а в нижней такие порошковые композиции, как титанат диспрозия, гафнат диспрозия или их смеси с порошком карбида бора [3]. Недостатком данных конструкций является меньшая физическая эффективность порошковых материалов, имеющих с нейтронами n, γ -реакцию.

Более совершенными в этом плане являются конструкции, в которых гафнат и титанат диспрозия используются в виде таблеток (рис. 1б).

Известны конструкции ПЭЛ в которых в качестве n, γ -поглотителя нейтронов применяется гафний [4, 5]. Преимущество таких ПЭЛ заключается в том, что гафний в сравнении с другими n, γ -поглотителями нейтронов (Dy, Ag, In, Cd) имеет большую физическую эффективность, лучшую коррозионную стойкость и более высокие температуры взаимодействия с материалами используемых оболочек.

Наиболее перспективными вариантами ПЭЛ являются такие, в которых часть столба в виде продольной конструкции расположена в оболочке с возможностью осевого перемещения относительно оболочки [5]. В результате жесткая продольная конструкция не допускает значительных деформаций столба.

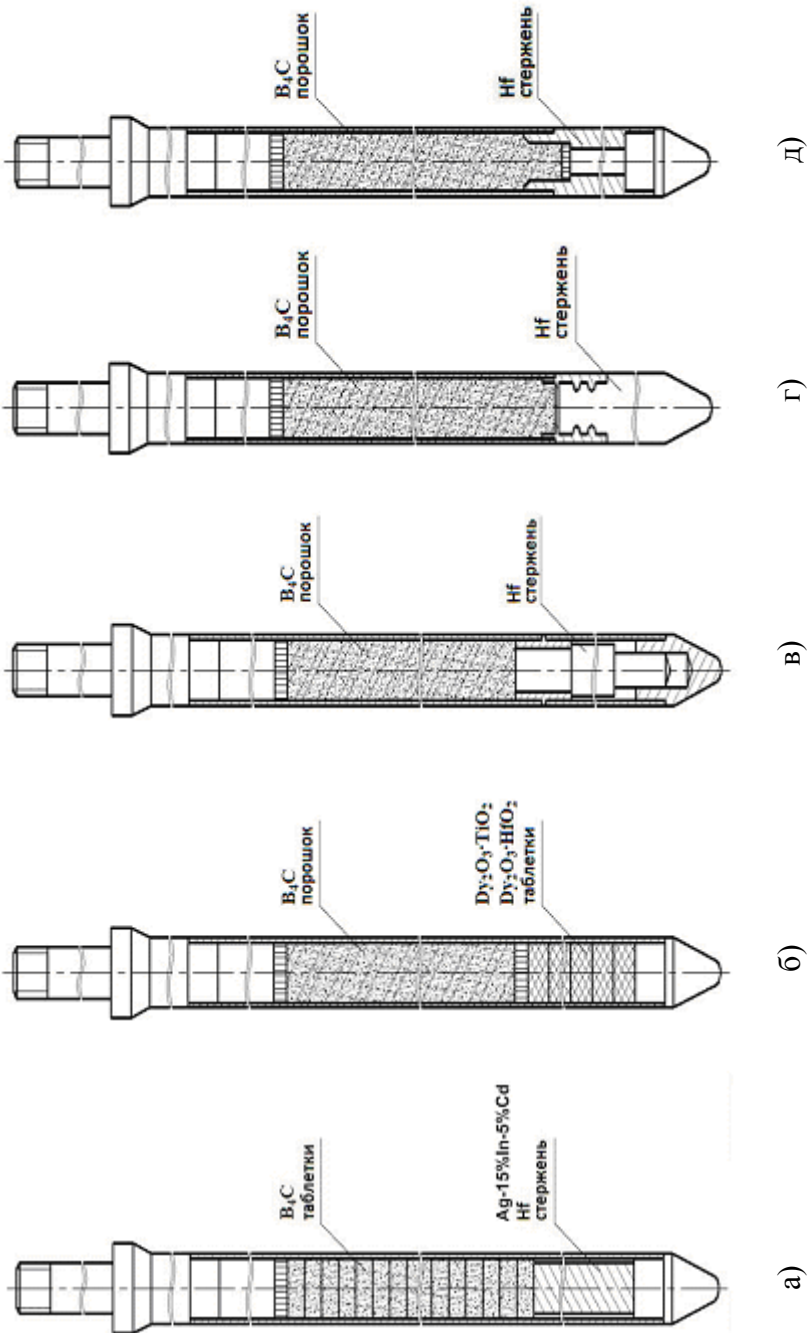


Рис. 1. Перспективные конструкции ПЭЛ

В работе [6] предложена конструкция, где оболочка по длине выполнена из двух секций, соединенных сваркой, а концевые части гафниевого стержня установлены во втулках, жестко соединенных с оболочкой. Свободное перемещение жесткой продольной конструкции внутри оболочки позволяет перераспределить нагрузку по всей ее длине.

В конструкции ПЭЛ (рис. 1в), приведенной в работе [7], секции оболочки соединены между собой через втулку, в которой гафниевый стержень жестко зафиксирован верхней частью. Нижний конец гафниевого стержня размещен в нижней концевой детали с зазором и центрируется в ней. Причем для достижения более высокого результата стержень может иметь центральный канал, а между материалом верхней части ПЭЛ и гафниевым стержнем может быть размещена дополнительная газопроницаемая вставка.

Варианты конструкции ПЭЛ третьей группы, в которых карбид бора размещен внутри герметичной оболочки, а гафний используется в виде стержня диаметром 8,2 мм, жестко соединенного с оболочкой, приведены на рис. 1г,д.

В вариантах ПЭЛ с оболочкой из нержавеющей стали или никелевого сплава ЭП–630У для соединения оболочки с гафниевым стержнем используется переходной элемент [8]. Для соединения переходного элемента с поглощающим стержнем на внешних боковых поверхностях обхватывающего участка концевой детали и охватываемой части гафниевого стержня формируют кольцевые выступы и канавки. Стержень размещают в переходной детали так, чтобы его кольцевые канавки были расположены напротив кольцевых выступов концевой детали, причем кольцевые канавки на гафниевом стержне изготавливают глубиной больше половины толщины оболочки [9]. Дальнейшим развитием описанной конструкции является выполнение переходного элемента стаканоподобной формы и его размещение днищем в охватываемом участке стержня или выполнение на поверхности переходного элемента пустотелого выступа, направленного внутрь оболочки. Такие изменения конструкции переходного элемента обеспечивают возможность создания неразрывного столба поглощающих материалов. При этом создаются условия, когда часть материала переходного элемента заменяется на поглощающий материал, что повышает физическую эффективность ПЭЛ.

Перспективным направлением повышения надежности ПЭЛ, в нижней части которых применяется гафний, является использование оболочек из сплавов на основе одного из переходных элементов (например, Zr, Ti, Nb), которые образуют с гафнием непрерывный ряд твердых растворов. Это позволяет повысить надежность работы поглощающего элемента за счет исключения образования легкоплавких фаз материала оболочки как с гафнием, так и с карбидом бора при высоких температурах, имеющих место в аварийных ситуациях [10]. В данных конструкциях оболочка соединяется непосредственно с гафниевым стержнем без использования переходного элемента. Наличие нижнего газосборника обеспечивает более интенсивный отвод гелия из зоны, заполненной карбидом бора, а, следовательно, и меньшее давление на внутреннюю поверхность оболочки при достижении высоких выгораний ^{10}B (рис. 1 д). Заполнение нижней части газосборника, расположенного внутри втулки из гафния, поглощающим материалом на основе бора, позволяет создать столб поглощающих материалов неразрывным.

В результате выполненного анализа можно отметить большое число предлагаемых ПЭЛ в которых используются комбинированные поглотители: в верхней части материалы, имеющие с нейтронами n, α -реакцию, а в нижней части материалы, имеющие с нейтронами n, γ -реакцию. По мнению авторов, наиболее высокими характеристиками физической эффективности и жесткостью конструкции

обладают варианты ПЭЛ в которых n, γ -поглотитель выполнен в виде стержня из гафния диаметром, равным диаметру оболочки, который жестко с ней соединен.

ПОГЛОЩАЮЩИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тенденции использования поглощающих и конструкционных материалов

В реакторах типа PWR в настоящее время в качестве поглощающего материала широко используют тройной сплав на основе серебра Ag- 15% In-5% Cd, а в качестве оболочечного – нержавеющей сталь SS304L [11].

Основное преимущество сплавов на основе серебра – наличие в одном материале трех компонентов с различной степенью поглощения тепловых и надтепловых нейтронов. Этим самым расширяется область энергий поглощаемых нейтронов.

К недостаткам данного сплава следует отнести:

- низкую температуру плавления (~ 800 °С);
- набухание при длительном реакторном облучении, приводящее к деформации и разрушению защитной оболочки;
- снижение физической эффективности вследствие быстрого выгорания кадмия;
- недостаточную физическую эффективность в жестком спектре нейтронов при использовании МОХ–топлива (смешанного уран–плутониевого топлива);
- накопление высокоактивных и долгоживущих радионуклидов ^{110}Ag с периодом полураспада 270 дней;
- сравнительно невысокую коррозионную стойкость.

В связи с этим специалисты предлагают заменить традиционно используемый сплав Ag-In-Cd на гафниевые сплавы [12].

Одними из наиболее перспективных сплавов на основе гафния считаются сплавы типа Hafaloy (Hafaloy, Hafaloy-M, Hafaloy-N, Hafaloy-NM). Они обладают высокой нейтронопоглощающей способностью, коррозионной стойкостью, хорошими механическими свойствами и обрабатываемостью. Их состав приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сплавов на основе гафния

Элемент	Концентрация легирующих элементов, % вес.			
	Hafaloy	Hafaloy-M	Hafaloy-N	Hafaloy-NM
Sn	0,1–1,5	0,1–1,5	0,1–1,5	0,1–1,5
O	0,03–0,2	0,03–0,2	0,03–0,2	0,03–0,2
Fe	0,01–0,15	0,01–0,15	0,01–0,15	0,01–0,15
Cr	0,01–0,15	0,01–0,15	–	–
Ni	< 0,10	< 0,10	–	–
Nb	–	–	0,2–1,0	0,2–1,0
Mo	–	0,01–0,2	–	0,01–0,2
Zr	0,02–2,0	0,02–2,0	0,02–2,0	0,02–2,0
Hf	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное

Легирующие сплавы на основе гафния оловом (Sn) и кислородом (O) увеличивает их пластичность и прочность. Железо (Fe), хром (Cr) и ниобий (Nb) повышают их коррозионную стойкость, а молибден (Mo) – прочность, износостойкость и склонность данных сплавов к механической обработке.

Специалистами Франции, с учетом использования МОХ–топлива в реакторах типа PWR, предложена замена в ПЭЛ системы регулирования и аварийной защиты тройного сплава Ag-In-Cd на диборид гафния (HfB_2). Физическая эффективность диборида гафния сопоставима с карбидом бора, а его объемное набухание значительно ниже [13]. Диборид гафния имеет высокую температуру плавления (~3380 °С), а также

более высокие, чем у V_4C , теплофизические и механические свойства [1]. Способы получения и перспективные составы HfV_2 приведены в работах [14-16].

Что касается оболочки ПЭЛ, то в реакторах типа PWR планируется заменить ее материал – сталь SS304 на сталь SS316 [17]. Перспективным считается использование на наружной поверхности оболочек защитных покрытий, например, из карбида хрома [18], а также использование оболочек из сплавов на основе циркония и гафния [11].

Российские специалисты, начиная с 1997 года, начали замену ПЭЛ в ПС СУЗ реакторов типа ВВЭР, в которых использовался в качестве поглотителя V_4C , а в качестве материала оболочки – сталь 06X18H10T, на ПЭЛ новой модификации. В новых ПЭЛ в верхней части используется порошок V_4C , а в нижней – порошок титаната диспрозия. В качестве материала оболочки применяется сплав ЭП-630У (Ni-42% вес. Cr-1% вес. Mo). В дальнейшем в конструкции ПЭЛ планируется использовать в качестве n, γ -поглотителей гафнат диспрозия как в виде порошка, так и в таблеточном варианте и металлический гафний.

Физическая эффективность поглощающих материалов

Наиболее оптимальным решением увеличения физической эффективности ПС СУЗ водо-водяных реакторов является увеличение сечения поглощения не только тепловых, но и надтепловых нейтронов. Такими качествами обладают материалы: сплав Ag-15% In-5% Cd, сплавы гафния, HfV_2 , EuB_6 , $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$, $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$.

Предпочтение отдается материалам, которые не образуют долгоживущих изотопов и которые при захвате нейтронов переходят в изотопы, имеющие значительные сечения поглощения нейтронов.

Расчеты снижения эффективности таких поглощающих материалов, как V_4C , $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$, Hf, сплав Ag-15% In-5% Cd при значениях диаметра $\sim 7,0$ мм в условиях длительной эксплуатации в активной зоне реактора ВВЭР-1000 в составе ТВС со средней энергонапряженностью свидетельствует о следующем:

- эффективность ПЭЛ на основе диспрозия и гафния после эксплуатации на протяжении 28000...30000 часов составляет приблизительно 87 %, а на основе бора – 70 % от исходного значения;
- эффективность ПЭЛ с гафнием и $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ близка и даже несколько выше эффективности ПЭЛ из сплава Ag-15% In-5% Cd.

Сравнение эффективности поглощения нейтронов в условиях работы реактора ВВЭР-1000 такими поглощающими материалами, как титанат диспрозия и гафний показало, что более перспективным в этом плане является гафний (таблица 2).

Таблица 2. Характеристика и эффективность поглощающих материалов [18]

№ п/п	Поглощающий материал	Химический состав	Плотность, г/см ³	Диаметр, мм	Эффективность в сравнении с V_4C	
					масса H_3BO_3 в 1 кг H_2O , г	значения эффективности
1	V_4C	100	1,63	6,99	–	1
					1,0	1
2	$Dy_2O_3 \cdot TiO_2$	Dy_2O_3 - 20% TiO_2	4,83	6,99	–	0,77±0,03
					1,0	0,85±0,04
3	Hf, прутки Ø 8,2 мм	по ТУ на ГФЕ-1	13,09	8,22	–	0,98±0,03
					1,0	1,04±0,05
4	Hf, прутки Ø 9,6 мм	по ТУ на ГФЕ-1	13,09	9,66	–	1,09±0,04
					1,0	1,26±0,06
5	Hf, труба Ø 8,2×1,0 мм	по ТУ на ГФЕ-1	13,09	8,16	–	0,69±0,02
					1,0	0,74±0,04

Это обусловлено тем, что гафний может быть использован в виде стержня диаметром, равным внешнему диаметру оболочки.

Опыт использования в реакторах других поглотителей в открытом виде (без оболочки) на сегодняшний день отсутствует. Поэтому если исходная эффективность ПЭЛ из гафния и титаната диспрозия с диаметром равным ~ 7 мм составляет 85 % от эффективности B_4C , то увеличение диаметра гафния до 8,2 мм уравнивает значение его эффективности с B_4C (таблице 2).

Радіаційна і корозійна стійкість

Сравнительная радиационная стойкость перспективных поглощающих материалов приведена на рис. 2. Из рисунка следует, что наиболее высокую размерную стабильность из представленных материалов имеют: металлический гафний, гафнат диспрозия и титанат диспрозия. Реакторное облучение приводит к упрочнению гафния и сплавов на его основе и одновременно снижает их пластичность вследствие повреждения структуры и образования радиационных дефектов.

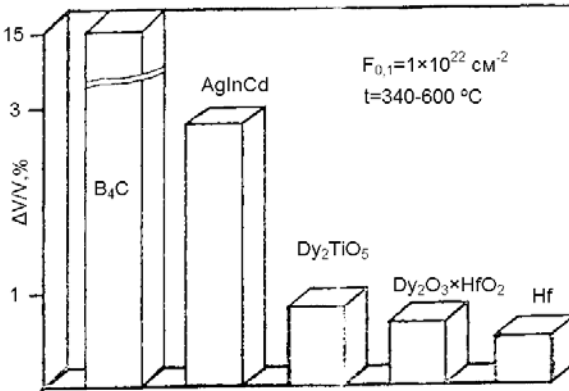


Рис. 2. Размерная стабильность поглощающих материалов после облучения в кластерных сборках реактора ВВЭР-1000 [11]

Облучение до флюенса нейтронов $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ приводило к увеличению предела прочности с 500 МПа до 800 МПа. Дальнейшее увеличение дозы не вызывало значительных изменений предела прочности. Относительное удлинение образцов снижалось с увеличением дозы облучения, но даже при флюенсе $7,2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ его значения превышали 2 % [11].

Предполагается, что при достижении флюенса нейтронов $7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) происходит насыщение материала радиационными дефектами. Об этом свидетельствует факт стабилизации значений микротвердости и предела прочности, которые при дальнейшем увеличении флюенса нейтронов практически не изменяются [11].

Облучение стимулирует в гафнии процессы выделения и распада вторых фаз, в том числе за счет накопления трансмутантных элементов, приводит к отжигу исходных линейных дислокаций, как в рекристаллизованных, так и в нерекристаллизованных областях. При этом происходит образование радиационных дефектов в виде дислокационных петель a - и c - типа.

Для гафния, как и для всех материалов с гексагональной плотноупакованной решеткой, является характерным анизотропное изменение размеров, связанное с

радиационным ростом. Однако эти изменения незначительные. Так, например, при максимальном флюенсе быстрых нейтронов $2,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) деформация радиационного роста не превышала 0,4 %.

Во всех случаях после реакторного облучения наблюдается уменьшение плотности гафния и увеличение объема кристаллической решетки. Рентгеноструктурные исследования образцов гафния марки ГФИ-1, легированного 0,6 % вес. Nb, после облучения в реакторе СМ при температуре 280...300 °С показали практически линейное увеличение объема кристаллической решетки, что составило около 1 % при достижении флюенса быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$). При этом происходило уменьшение плотности гафния приблизительно на 0,6 %.

По коррозионной стойкости в воде и в среде водяного пара гафний занимает первое место среди других поглощающих материалов. Испытания образцов гафния и циркалоя-4 в паре при температуре 500 °С и давлении 10,5 МПа показали, что сопротивление коррозионному повреждению гафния приблизительно в 10 раз выше сплавов циркония.

Титанат диспрозия имеет сравнительно высокую радиационную стойкость в широкой области повреждающей дозы при температурах облучения вплоть до 1500 °С. Особенно это характерно для титаната диспрозия с флюоритной структурой. После облучения до флюенса быстрых нейтронов $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при температуре 250...450 °С объем кристаллических решеток пирохлора, ромбической, гексагональной и флюоритной фаз увеличились соответственно на 2,7; 2,6; 1,2 и 0,3 %.

С увеличением флюенса нейтронов происходит и увеличение объема кристаллических решеток, которое для флюоритной структуры остается минимальным. После облучения до флюенса быстрых нейтронов $3,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при температуре 250...450 °С объем увеличился всего на 1,6 %. Таблетки титаната диспрозия при данных условиях облучения, если градиент температуры от центра до их поверхности не превышал 45...50 °С/мм, сохраняли форму, а увеличение их линейных размеров не превышало 1 %. При большем градиенте температуры термические напряжения будут превышать прочность материала, что может привести к появлению трещин, фрагментации и разрушению таблеток.

К недостаткам титаната диспрозия следует отнести трудности, связанные с получением единой флюоритной структуры. В процессе его производства необходимо строго придерживаться химического состава исходных компонентов (Dy_2O_3 и TiO_2), обеспечивать их полное взаимодействие при высокой температуре с получением однородной высокотемпературной флюоритной структуры. Для ее достижения необходимо применять дополнительную термическую обработку либо легирование (например, Mo или MoO_3). В противном случае материал титаната диспрозия может иметь до четырех структурных составляющих и иметь низкую коррозионную и радиационную стойкость [19].

Коррозионная стойкость в водных теплоносителях титаната диспрозия в значительной степени зависит от структурного состояния. Испытания в воде при давлении 0,1 МПа на протяжении 100 часов при температуре 100 и 340 °С таблеток оксида диспрозия, титаната и дититаната диспрозия показали, что таблетки с Dy_2O_3 при этих условиях полностью разрушились. Линейные размеры таблеток с Dy_2TiO_5 и $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ увеличились на 0,1 %, их состояние было оценено как коррозионно стойкое [19]. Линейная скорость окисления Dy_2TiO_5 по данным работы [19] не превышает 0,01 мм/год.

Гафнат диспрозия имеет более широкую область резонансного поглощения нейтронов по сравнению с титанатом диспрозия. Важным также является более высокая плотность и теплопроводность гафната диспрозия.

Твердые растворы типа флюорита образуются в сравнительно широкой области концентраций от 48 до 72 % мол. Dy_2O_3 . В области выше 85 % мол. Dy_2O_3 происходит образование твердых растворов с кубической решеткой, которая является производной от флюоритной структуры, поэтому они обладают высокой радиационной стойкостью из-за присутствия в их структуре большого количества стехиометрических вакансий.

Испытание в реакторах СМ и БОР подтвердили высокую радиационную стойкость материала и изделий с использованием таблеток и порошка $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$. Исследование таблеток гафната диспрозия после облучения в среде гелия до флюенса быстрых нейтронов $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ показали, что диаметр таблеток увеличился на 0,2...0,4 %, средний объем – на 0,6...0,8 %. Сохранилась структура флюорита, а параметр кристаллической решетки увеличился на 0,2 %, объем – на 0,65 %. В таблетках гафната диспрозия отсутствовали трещины, а структура практически не отличалась от исходной.

Оболочки ПЭЛ при эксплуатации в активной зоне реактора под действием нейтронного излучения теряют начальный запас пластичности, поддаются механическому воздействию расширяющего поглощающего сердечника, давлению газообразных продуктов деления при использовании n, α -поглотителей, вибрациям, эрозионному воздействию в процессе перемещения в направляющих каналах. Механическое влияние сердечника на оболочку приводит к ее деформации, величина которой может составлять 0,2...0,7 %, что считается критическим значением. При деформации выше 0,7...1,0 % происходит образование трещин в оболочке, что подтверждается экспериментально [15].

В зависимости от конструкции ПС СУЗ, толщины оболочки и условий эксплуатации максимально допустимый флюенс быстрых нейтронов для стали 06X18H10T может составлять $(1...4) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$). Использование хромоникелевого сплава ЭП-630У позволяет увеличить этот ресурс до флюенса $(1...2) \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$). Сплавы на основе циркония сохраняют пластичность на достаточно высоком уровне после облучения до дозы $\geq 4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что позволяет их рассматривать в качестве перспективных материалов для оболочек ПЭЛ.

Совместимость поглощающих и конструкционных материалов

Характер взаимодействия с оболочками ПЭЛ рассмотренных поглощающих материалов, таких как: V_4C ; $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$; $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$; Hf; сплав Ag-In-Cd в достаточной степени изучены.

Карбид бора вступает в химическое взаимодействие со стальными оболочками при температуре выше 600 °С. При температурах выше 1000 °С взаимодействие становится заметным, а при температуре 1200 °С наблюдается их эвтектическое взаимодействие. Этот факт приводит к образованию диффузионного слоя толщиной 400...500 мкм на большей части контактной поверхности и к локальному проплавлению оболочки в отдельных местах, что вызывает разгерметизацию ПЭЛ [11].

Образование интерметаллических фаз сопровождается перераспределением компонентов стали и заметным ухудшением ее механических свойств. При облучении возрастает скорость взаимодействия V_4C с оболочками из стали 06X18H10T и сплава ЭП-630У. Сплав Ag-15%In-5%Cd совместимый с оболочками из нержавеющей стали до температуры 800 °С, титанат и гафнат диспрозия совместимы

с аустенитними нержавеющейими сталями до температур 900...1000 °С, гафний совместим с ними до температуры 1200 °С [19].

Исследование совместимости карбида бора с оболочкой из циркониевых сплавов показали, что вплоть до температуры 1500 °С скорость взаимодействия между ними является незначительной. Данные, приведенные в работе [6], свидетельствуют, что в результате взаимодействия порошка карбида бора с оболочкой из циркониевого сплава циркалой-4 при температуре 1100 °С за 4 часа образовывается слой толщиной 5 мкм. При взаимодействии порошка карбида бора со сталью при этих же условиях толщина слоя взаимодействия составляла 181 мкм. Отсюда можно сделать вывод о более медленном взаимодействии карбида бора с цирконием по сравнению с нержавеющейими сталями. Совместимость других поглощающих материалов со сплавами циркония также является значительно лучшей в сравнении с нержавеющейими сталями.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование и анализ различных вариантов конструкций поглощающих элементов и выполнен сравнительный анализ технических решений, направленных на увеличение ресурса и повышение их работоспособности.

Установлено, что общими тенденциями для органов регулирования водородных энергетических ядерных реакторов является переход на n, γ -поглотители, комбинированное использование совместно с n, α -поглотителями, повышение физической эффективности используемых комбинаций материалов, использование поглощающих материалов с высокой температурой плавления и коррозионной стойкостью.

Проанализированы направления работ по повышению физической эффективности, радиационной стойкости, совместимости поглощающих и конструкционных материалов.

Показано, что наиболее перспективными поглощающими материалами для энергетических ядерных реакторов являются: металлический гафний, гафнат диспрозия, титанат диспрозия, диборид гафния и их композиции с карбидом бора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов В.М., Ряховских В.И., Пославский А.О., Пономаренко В.Б., Маковский В.Д., Осадчий А.И.; Лунин Г.Л., Бирюков Г.И., Васильченко И.Н. Регулирующий стержень ядерного реактора. Патент Российской Федерации №2077741 от 20.04.1997. G21C7/10, G21C7/24.
2. Патент США №4699756. 1985. G21C7/10
3. Чернышов В.М., Ряховских В.И., Пославский А.О., Пономаренко В.Б., Осадчий А.И., Маковский В.Д., Лунин Г.Л., Васильченко И.Н. Регулирующий стержень корпусного водоохлаждаемого ядерного реактора. Патент Российской Федерации №2101788 от 01.10.1998. G21C7/10.
4. Захаров А.В., Рисованный В.Д., Ключков Е.П. Поглощающий элемент органа регулирования атомного реактора. Патент Российской Федерации №2126181 от 25.07.1999. G21C7/10.
5. Чернышов В.М., Ряховских В.И., Пославский А.О., Пономаренко В.Б., Рисованный В.Д., Залетных Б.А., Осадчий А.И. Патент Российской Федерации №2077743 от 20.04.1997. G21C7/10.

6. Чернышов В.М., Пославский А.О., Рисованный В.Д., Ряховских В.И., Пономаренко В.Б., Залетных Б.А. Регулирующий стержень ядерного реактора. Патент Украины. №24734 от 30.10.1998. G21C7/10.
7. Белаш Н.Н., Чернов И.А. Поглощающий элемент ядерного реактора. Патент Украины. №31021 от 25.03.2008. G21C7/08.
8. Красноруцкий В.С., Татаринов В.Р., Чернов П.А. Поглощающий стержневой элемент ядерного реактора. Патент Украины №738 от 15.03.2001. G21C7/10.
9. Белаш Н.Н. Способ изготовления поглощающего стержневого элемента ядерного реактора. Патент Украины №69082 А от 16.08.2004, G21C 21/18, G21C 7/10.
10. Белаш Н.Н., Красноруцкий В.С., Михайлов Н.А. Поглощающий элемент ядерного реактора. Патент Украины № 11315 от 15.12.2005, G21C7/10.
11. Рисованный В.Д., Варлашова Е.Е., Фридман С.Р. Поглощающие материалы и органы регулирования реакторов ВВЭР-1000 и PWR. Состояние, проблемы и пути их решения. – Днепропетровск: ГНЦ РФ НИИАР. – 1998. – 54 с.
12. Патент США № WO/1994/028185. Hafnium alloys as neutron absorbers. Dec. 8. 1994.
13. Ковальченко М.С., Огородников В.В., Роговой Ю.И., Крайний А.Г. Радиационные повреждения тугоплавких соединений. – М.: Атомиздат. – 1979. – 160 с.
14. Neutron absorber material and method of manufacture. European Patent WO94/28556. Dec. 8. 1994.
15. Method for making neutron sbsorber material. United States Patent 6669893. Dec. 30. 2003.
16. Absorbent neutronic composite material and method for producing same. European Patent № WO/1999/036921. July. 22. 1999.
17. Рисованный В.Д., Варлашова Е.Е., Фридман С.Р., Пономаренко В.Б., Щеглов А.В. Сравнительные характеристики поглощающих кластерных сборок ВВЭР-100 и PWR // Атомная энергия. – Т. 84, № 6. – 1998.
18. Сборник докладов шестой российской конференции по реакторному материаловедению, том 1, г. Днепропетровск, 11–15 сентября 2000.
19. Рисованный В.Д., Клочков Е.П., Пономаренко В.Б. Гафний в ядерной технике. – Днепропетровск. – 1993.