

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПЭЛ ПС СУЗ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 С КАРБИДОМ БОРА

*С.Р. Фридман, В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, В.Г. Топорова
ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия*

Вперше проведені реакторні випробування негерметичних макетів пел з карбідом бора показали можливість створення та експлуатації погликаючих елементів з вузлами негерметичності. Проведено аналіз результатів досліджень та представлені завдання на найближчі роки. В першу чергу це зміна у регламенті роботи реакторів з метою накопичення докладної інформації про роботу кожної кластерної збірки, створення математичної моделі для оперативної оцінки поточного стану пелів ПС СУЗ у залежності від параметрів експлуатації, для чого необхідно проведення регулярних матеріалознавчих досліджень ПС СУЗ, що відпрацювали, з-поміж представницьких щодо досягнутих параметрів експлуатації, а також упровадження перспективних конструкцій пелів з підвищеними ресурсними характеристиками. Після реакторні дослідження штатних пелів і макетів включали: вимірювання деформації, вимірювання кількості гелію під оболонкою, вивчення структурного стану поглинача. Показано, що Росія має реальні можливості створення ПС СУЗ реакторів ВВЕР-1000 з ресурсними характеристиками, що перевищують встановлені в теперішній час.

Впервые проведенные реакторные испытания негерметичных макетов пэл с карбидом бора показали возможность создания и эксплуатации поглощающих элементов с узлами негерметичности. Проведен анализ результатов исследований и представлены задачи на ближайшие годы. В первую очередь это изменение в регламенте работы реакторов с целью накопления подробной информации о работе каждой кластерной сборки, создание математической модели для оперативной оценки текущего состояния пэлов ПС СУЗ в зависимости от параметров эксплуатации, для чего необходимо проведение регулярных материаловедческих исследований отработавших ПС СУЗ из числа представительных по достигнутым параметрам эксплуатации, а также внедрение перспективных конструкций пэлов с повышенными ресурсными характеристиками. После реакторные исследования штатных пэлов и макетов включали: измерение деформации, измерение количества гелия под оболочкой, изучение структурного состояния поглотителя. Показано, что в России имеются реальные возможности создания ПС СУЗ реакторов ВВЭР-1000 с ресурсными характеристиками, превышающими установленные в настоящее время.

For the first time conducted reactor tests of unpressurized breadboards of Absorber elements with carbide of boron have shown a capability of creation and exploitation of absorptive elements with clusters of air-tightness. The analysis of results of researches is given and the problems for the proximate years are shown. First of all this change in the rules of activity of reactors with the purpose of upbuilding the in-depth information about activity of each cluster assembly, creation of a mathematical model for an operating estimation of a current condition of Absorber elements of Control and Safety system depending on parameters of exploitation, for what is necessary realization regular material researches of the completed of Absorber elements of Control and Safety system from among representative on the reached parameters of exploitation, and also intrusion of perspective designs of Absorber elements with the heightened resource characteristics. The researches of nominal Absorber elements after reactor and breadboards actuated: measurement of deformation, measurement of quantity of helium under a cladding, analysis of a structural condition of absorber. Is shown, that in Russia there are substantial capabilities of creation of Absorber elements of Control and Safety system of VVER-1000 reactors with the resource characteristics superior established now.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие реакторов на тепловых нейтронах с водой под давлением (ВВЭР-1000) связано с повышением эффективности, ресурса и надежности работы ПС СУЗ как в штатных так, и в за-проектных условиях эксплуатации. Решение этих проблем позволит не только улучшить технико-экономические показатели работы реактора, но и существенно снизить количество радиоактивных отходов в виде подлежащих захоронению отработавших изделий. До настоящего времени ресурс штатных

пэлов с В₄С устанавливается заводом изготовителем как гарантированный календарный срок службы изделий в реакторе. При этом он составляет 1...2 года в режиме автоматического регулирования (АР) и 5...7 лет в режиме аварийной защиты. Как показывают исследования [1-2], большинство изделий после эксплуатации в течение назначенного срока могут еще длительное время эксплуатироваться в реакторе, полностью обеспечивая требования по надежности и эффективности.

В качестве основного поглощающего материала в ПС СУЗ реакторов ВВЭР-1000 благодаря высоко-

му сечению поглощения и превосходным физико-химическим свойствам применяется карбид бора. Однако многочисленные экспериментальные данные о его поведении под облучением носят противоречивый характер. Объясняется это большой зависимостью поведения карбида бора от состава, плотности, технологии изготовления и условий реакторного облучения. С практической точки зрения необходимо изучать радиационные свойства карбида бора в конкретных конструкциях при облучении в известных условиях.

В ГНЦ РФ НИИАР проводятся работы, цель которых - изучение состояния поглощающих элементов после эксплуатации в штатных реакторах ВВЭР-1000 и получение физико-технических характеристик карбида бора как основного поглощающего материала реакторов ВВЭР-1000. В настоящей статье представлены обобщенные результаты исследований и рекомендации, выработанные с их помощью.

1. ПОГЛОЩАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА И УСЛОВИЯ ИХ РАБОТЫ В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

В органах СУЗ реакторов ВВЭР-1000 применяются унифицированные поглощающие сборки (ПС СУЗ) кластерного типа, конструкция которых включает 18 пэлов длиной (4222 ± 3) мм (рис.1). Длина столба поглотителя составляет 3800 мм. Над столбом поглотителя находится газосборник, заполненный гелием при атмосферном давлении. Пэлы закреплены верхним концом на траверсе специальной формы («снежинка»), а нижние концы свободны и при эксплуатации перемещаются в направляющих трубах из стали 06X18H10T внутри тепловыделяющих сборок. Внутренний диаметр направляющей трубы 11,0 мм, а радиальный зазор с оболочкой пэлов 2,8 мм. Через направляющие трубы протекает теплоноситель (вода) со скоростью 2 м/с при давлении около 15 МПа и температуре около 300°C . Максимальная плотность потока нейтронов в реакторе ВВЭР-1000: тепловых – $2,19 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, быстрых – $6,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3]. Функциональное назначение пэлов - осуществлять регулирование реактора во всем диапазоне мощности и производить быстрый останов реактора, поэтому ПС СУЗ могут работать как в режиме автоматического регулирования (АР), так и в режиме аварийной защиты (АЗ). Всего в реакторе ВВЭР-1000 имеются 61 кластерная сборка. Из них 10 работают в режиме АР, а остальные 51 - в режиме АЗ. В процессе их эксплуатации возможно изменение режима эксплуатации.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ШТАТНЫХ ПС СУЗ ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

Исследовались ПС СУЗ после эксплуатации 2...4 года в режиме АР и 2...7 лет в режиме АЗ в реак-

торах ВВЭР-1000 на ЗапАЭС, КалАЭС и НВ АЭС. Оценка состояния поглощающих элементов по внешнему виду указывает, что среди повреждающих факторов отсутствуют коррозионные эффекты, внешние механические воздействия, истирание оболочек. Эти выводы подтвердили вихретоковая дефектоскопия и металлографические исследования оболочек.

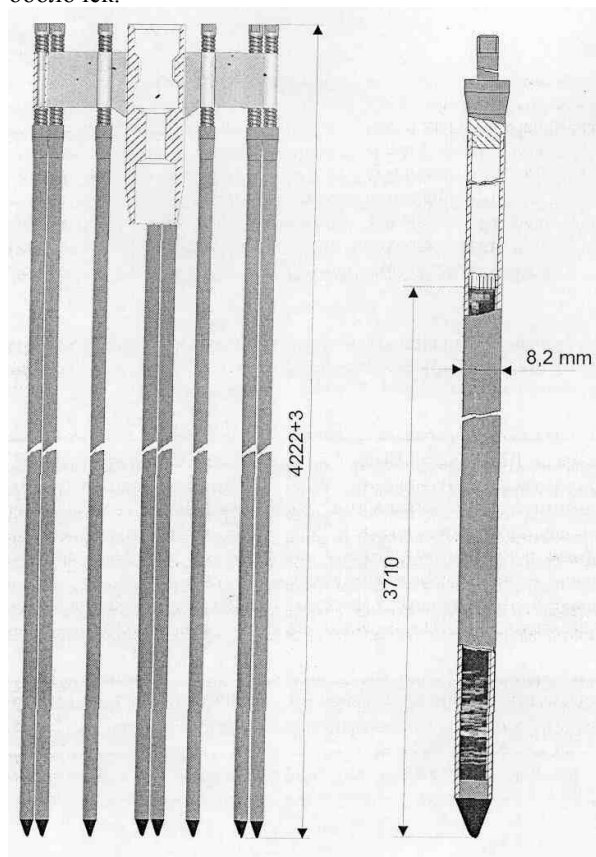


Рис.1. Конструкция штатной кластерной сборки и поглощающего элемента с порошком В₄С реактора ВВЭР-1000

Увеличение диаметра оболочек пэлов было отмечено только после эксплуатации ПС СУЗ на НВ АЭС в режиме АР в течение 3 лет (0,7 %) и АЗ в течение 7 лет (2 % с разгерметизацией оболочек).

Выгорание изотопа ^{10}B очень неравномерно по высоте пэлов. Наиболее это характерно для ПС СУЗ, эксплуатировавшихся в режиме АЗ. Заметные величины выгорания изотопа ^{10}B для режима АР отмечаются на нижнем конце пэлов длиной 1000...1500 мм, а для АЗ – 300...400 мм. Отмечается высокая неравномерность выгорания по сечению сердечника. Максимальная средняя за год скорость выгорания изотопа ^{10}B не превышала 5%. Проведенные измерения усредненного по сечению сердечника выгорания изотопа ^{10}B в пэлах с В₄С, отработавших в режиме АЗ, показали, что темп выгорания в них существенно отличается: от 2,5 %/год (ЗапАЭС, 2 года) и 5 %/год (КалАЭС, 6 лет) до 11 %/год (НВ АЭС, 7 лет) (табл.1) [1-2].

Состояние сердечника из порошка карбида бора изменяется с увеличением выгорания ^{10}B . При выго-

ранях до 20...25 % порошок сохраняет сыпучесть, а при более высоких выгораниях образует спекшуюся твердую массу, что наблюдалось при разделке

нижних концов пэлов ПС СУЗ КалАЭС и НВ АЭС после эксплуатации как в режиме АР, так и АЗ до выгораний более 25 %.

Таблица 1

Некоторые характеристики эксплуатации исследованных ПС СУЗ на основе карбида бора [1-2]

Место эксплуатации	НВ АЭС	НВ АЭС	НВ АЭС	ЗапАЭС	КалАЭС	НВ АЭС
Режим эксплуатации	АР	АР	АР	АЗ	АЗ	АЗ
Календарное время эксплуатации, лет	2	3	3	1	6	7
Эффективное время эксплуатации, эф.-сут	491	793	819	284	-	2030
Максимальное, среднее по сечению пэла выгорание ^{10}B , %	32,5	42,6	53,2	3,5	25...30	77
Максимальное увеличение диаметра оболочки пэлов, %	0	0	0,7	0	0	2 разр. оболочки

Гелий, образующийся при выгорании ^{10}B , частично выделяется из зерен B_4C , диффундируя через кристаллит к свободной поверхности, и частично осаждается на дислокациях и границах зерен B_4C , вызывая его набухание. Как показали результаты измерений давления газа под оболочкой, только до 5 % выделившегося гелия поступает в газосборник в верхней части пэлов. Основная доля гелия остается в нижней части пэлов под оболочкой. Рассчитанное максимальное внутреннее давление в газосборнике не превышало при нормальных условиях 0,3 МПа, а при рабочей температуре эксплуатации (350°C) 0,6 МПа.

Свойства материала оболочки из стали 06Х18Н10Т свидетельствует о заметном снижении ее пластичности в нижних концах пэлов. Однако пластичность оболочки не снизилась до критических значений. Минимальные значения равномерного относительного удлинения составили при температурах 20 и 350°C соответственно 17...20% и 5...6%. Максимальное увеличение микротвердости в нижней части пэлов составило ~ 30 % (с 1800 до 2380 МПа). Взаимодействие оболочки с карбидом бора отсутствует [3].

Существует отчетливая корреляция между выгоранием изотопа ^{10}B в сердечнике и изменением свойств оболочки и сердечника по длине пэлов, распределением наведенной гамма-активности, флюенсом быстрых и тепловых нейтронов.

3. ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ ПЭЛОВ С КАРБИДОМ БОРА В РЕАКТОРЕ СМ

3.1. Конструкция макетов

Конструкция макетов пэл представлена на рис.2. Они состоят из оболочек из хромоникелевого сплава ХНМ (42 % Cr, 1 % Mo, 0,01 % C, Ni – основа) диаметром 8,2 мм с толщиной стенки 0,465, заполненных порошком или таблетками карбида бора. К концам оболочки приварены заглушки. Между столбом

поглотителя и свободной полостью, предназначенной для сбора газа, находится никелевая сетка. Высота макета около 100 мм. Проводилось облучение и негерметичных конструкций макетов пэлов с узлами негерметичности, представляющими непровар в сварном шве или отверстие в оболочке различной формы.

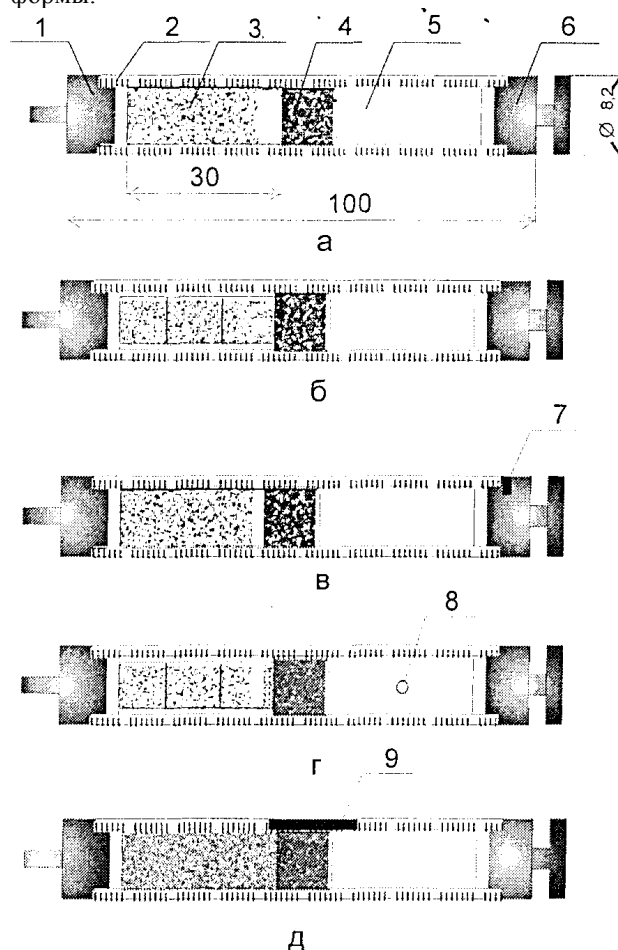


Рис.2. Конструкция макетов ПЭЛ с порошком (а) и с таблетками (б) карбида бора: 1, 6 – концевые детали; 2 – оболочка; 3 – поглощающий сердечник; 4

– никелевая сетка; 5 – газосборник; 7,8,9 – узлы негерметичности

3.2. Реакторные испытания

Макеты испытывали в исследовательском реакторе СМ. Максимальная тепловая мощность реактора - 100 МВт. Максимальная плотность потока нейтронов: тепловых – $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, быстрых – $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$).

Облучательное устройство 2631, представляющее сборку сепаратного типа из шести периферийных трубок, предназначенных для размещения макетов пэлов и центральной несущей трубки, было загружено в канал № 5, снабженный водяной петлей. Конструкция облучательного устройства разборная, что позволяет периодически производить ревизию образцов. Единоновременно в облучательное устройство загружается 24 макета пэл длиной около 100 мм (рис.3).

Было проведено 7 этапов облучения, после каждого из которых проводилась ревизия макетов. Время облучения составило до 300 эф. суток, достигнутое максимальное выгорание $^{10}\text{В}$ в $\text{В}_4\text{С}$ - более 50 %, флюенс нейтронов – $8,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$).

3.3. Послеректорные исследования

Все макеты до выгорания изотопа $^{10}\text{В}$ 25...30% сохранили форму и целостность. Максимальное увеличение диаметров оболочек макетов с таблетками не превышало 0,3 % при среднем по сечению выгорании изотопа $^{10}\text{В}$ около 30 %. При тех же выгораниях макеты пэлов с порошком $\text{В}_4\text{С}$ изменений диаметров не обнаружили. При выгораниях более 50 % деформация макетов с таблетками составила $(4,0 \pm 0,2) \%$, с порошком 0,7 %.

Таблица 2
Деформация герметичных макетов ПЭЛ

Выгорание $^{10}\text{В}$, %	Поглощающий сердечник	
	Порошок $\text{В}_4\text{С}$	Таблетки $\text{В}_4\text{С}$
Менее 30%	0	~ 0.3%
Более 50%	0.7	$(4.0 \pm 0.2)\%$

До выгорания 20...25 % изотопа $^{10}\text{В}$ порошок $\text{В}_4\text{С}$ практически не меняет своего структурного состояния. Происходит незначительное спекание порошка, он свободно высыпается из оболочки. Пористость практически соответствует исходной. Отсутствует механическое воздействие на оболочку макета. Выше 25 % выгорания изотопа $^{10}\text{В}$ происходит заметное спекание порошка. С ростом выгорания оно увеличивается. При 35...40 % выгорания $^{10}\text{В}$ порошок превращается в монолитный сердечник. В структуре сердечника отсутствуют трещины, пористость снижается, прочность соответствует прочности таблетки. Сердечник оказывает силовое воздей-

ствие на оболочку. Монолитный сердечник полностью заполняет сечение, радиальный зазор отсутствует. Сердечник имеет более плотную структуру, чем у таблетки, меньше его пористость, количество каналов в виде трещин, пор, пузырей, что сдерживает газовыделение под оболочку.

Различное поведение макетов с таблетками и порошком может быть связано с различным газовыделением в макетах. С выгоранием изотопа $^{10}\text{В}$ газовыделение из $\text{В}_4\text{С}$ увеличивается (рис.4). В макетах с таблетками оно выше, чем в макетах с порошком, при этом скорость газовыделения приблизительно одинакова.

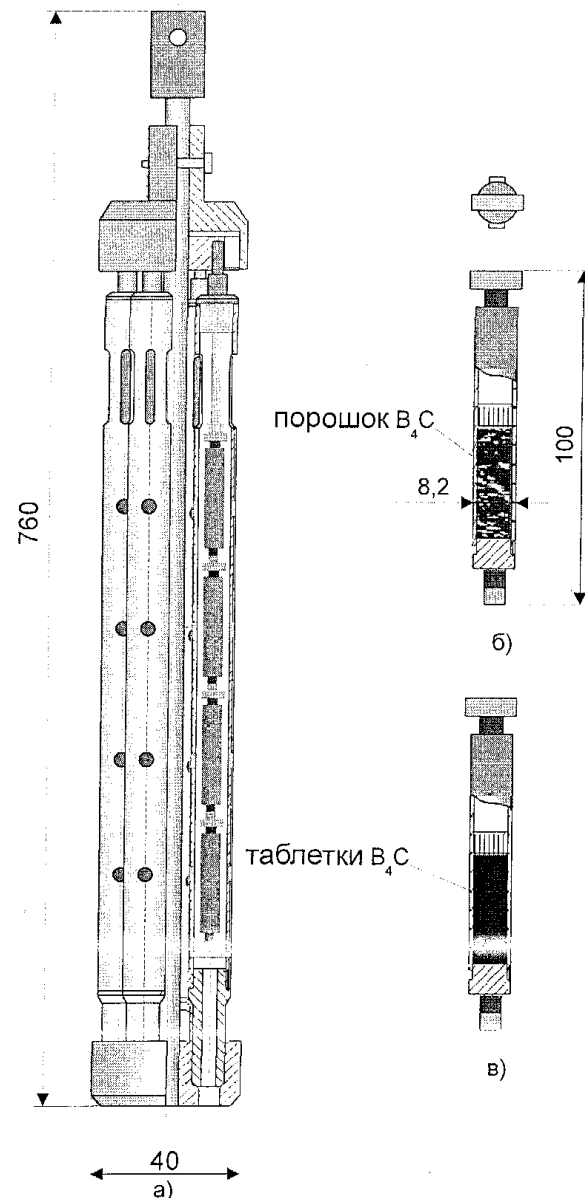


Рис.3. Схема облучательного устройства (а) и макетов пэлов с порошком (б) и таблетками (в) карбида бора

Материаловедческие исследования негерметичных макетов показали, что они сохранили форму и целостность, повреждений в виде трещин, отложе-

ний, а также изгибы отсутствовали. Внешний вид герметичных и негерметичных макетов не отличался. Увеличения диаметров не произошло, что указывает на отсутствие газового давления в негерметичных макетах.

Кратковременные механические характеристики материала оболочки из сплава ХНМ после облучения до максимального флюенса быстрых нейтронов $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0.1 \text{ МэВ}$) сохранились на высоком уровне, превышающем допустимые критерии по механическим свойствам для поглощающих элементов реакторов ВВЭР-1000.

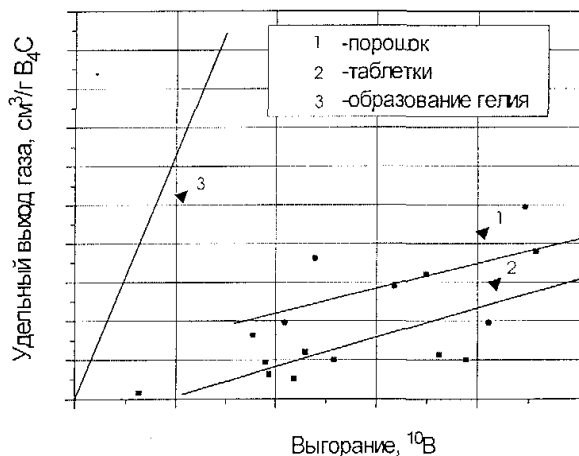


Рис. 4. Зависимость выхода газа от выгорания $^{10}\text{В}$

4. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПС СУЗ РЕАКТОРОВ ВВЭР –1000

По результатам исследований показано, что имеются несколько путей, позволяющих обеспечить высокие ресурсные характеристики органов регулирования реакторов ВВЭР-1000. Необходимо прежде всего обеспечить высокую радиационную стойкость нижних концов пэлов. Способы достижения этого можно условно объединить в следующие группы:

- усовершенствование конструкции пэлов;
- применение радиационно-стойких поглощающих материалов;
- применение радиационно-стойкого материала оболочек;
- управление ресурсом пэлов.

4.1. Усовершенствование конструкции пэлов

Комбинированные пэлы. Высокая неравномерность воздействующего на пэлы нейтронного потока послужила основанием для разработки комбинированных пэлов, в которых нижняя часть изготовлена из радиационно-стойких (n, γ) -поглотителей (Dy_2O_3 , TiO_2 или Hf), а верхняя часть заполнена сердечником из $\text{В}_4\text{С}$. Такие пэлы с достаточной исходной эффективностью поглощения имеют более высокую

радиационную стойкость в результате использования нового сердечника из радиационно-стойкого (n, γ) -поглотителя [5].

Экранирующая оболочка. Чтобы обеспечить меньшую скорость захвата нейтронов ядрами $^{10}\text{В}$, можно экранировать сердечник из карбида бора, например, используя оболочку из гафния. При этом снижается скорость захватов в карбиде бора на 20 % и повышается радиационная стойкость пэлов за счет меньшего распухания сердечника и меньшего выделения под оболочку [6].

Укороченные пэлы. Если нижний край поглощающего сердечника пэлов при эксплуатации находится на расстоянии около 150 мм от верхней края активной зоны, то средний темп выгорания изотопа $^{10}\text{В}$ не будет превышать 2 % в год, и в таком режиме пэлы на основе карбида бора могут безопасно эксплуатироваться до 25 лет. Достаточно простым конструктивным решением, которое предусматривает сокращение длины пэлов на 300 мм за счет неэффективно работающих газосборников в верхней части, можно добиться резкого увеличения ресурса [7].

Дополнительный газосборник. Значительно снизить скорость выгорания изотопа $^{10}\text{В}$, одновременно снизив уровень газового внутреннего давления на оболочку пэлов, позволяет конструкция, содержащая в нижнем конце газосборник в виде полости длиной 100...200 мм. В нижних концах пэлов происходит наиболее интенсивное выгорание поглощающего изотопа $^{10}\text{В}$ с образованием гелия, который, выделяясь под оболочку, не может перемещаться вдоль пэлов в верхний газосборник из-за низкой газовой проницаемости сердечника и создает высокие внутренние давления в дополнение к твердому распуханию сердечника. Нижний дополнительный газосборник позволяет не только снизить газовое давление на оболочку, но и вывести нижнюю часть поглощающего сердечника из зоны наиболее интенсивного выгорания. При этом снижается темп выгорания $^{10}\text{В}$, что способно в несколько раз увеличить календарное время безопасной эксплуатации пэлов до выгорания 50 % [8].

Негерметичные конструкции оболочек. Применение конструкций пэл с узлами негерметичности в оболочке позволяет избежать деформации от газового внутреннего давления. При этом узлы негерметичности могут располагаться в местах наибольшего образования гелия. Проведенные реакторные испытания показали принципиальную возможность создания таких конструкций [9].

4.2. Применение радиационно-стойких поглощающих материалов

Комбинированный поглотитель. Специалистами ГНЦ РФ НИИАР для водо-водяных реакторов предложен композиционный материал $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2 + \text{В}_4\text{С}$ в виде порошкового сердечника [5]. В однородной смеси используют в различном соотношении

три поглощающих элемента: диспрозий, гафний и бор.

Преимущества новой композиции:

- высокая физическая эффективность;
- малая скорость ее снижения при облучении;
- более высокая теплопроводность;
- отсутствие спекаемости поглощающего сердечника, которая наблюдается для сердечника V_4C при выгорании ^{10}B более 25...30 %;
- более свободный выход газообразных продуктов ядерных реакции;
- меньшее по сравнению с V_4C распухание при облучении.

Редкоземельные элементы. Как было получено в результате многочисленных реакторных испытаний [6], высокую радиационную стойкость имеют оксиды редкоземельных элементов с разупорядоченной флюоритной кристаллической структурой с большим количеством стехиометрических вакансий. Имеется большой положительный опыт длительной безаварийной работы стержней СУЗ с оксидом европия и с композицией оксида европия в металлических матрицах. Однако из-за высокой наведенной γ -активности с большим периодом полураспада изотопов ^{152}Eu и ^{154}Eu эти материалы не могут быть рекомендованы для широкого использования в коммерческих реакторах. Для практического использования в реакторах типа ВВЭР и РБМК был рекомендован титанат диспрозия $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$, который обладает высокой радиационной стойкостью при облучении. Так, после облучения флюенсом нейтронов ($3 \dots 4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$)) увеличение объема не превышало 2 % и полностью было скомпенсировано исходной пористостью поглощающего сердечника (~15 %). Основным недостатком $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ – более низкая, чем у V_4C исходная эффективность (на 15...20 %). Однако, как показывают расчеты, в результате более низкого темпа выгорания поглощающих изотопов после трех лет эксплуатации в реакторе эффективности пэлов на основе титаната диспрозия и карбида бора становятся одинаковыми, а при дальнейшей эксплуатации титанат имеет большую эффективность. Аналогичными свойствами обладает титанат редкоземельного концентрата, состоящий из смеси оксидных соединений редкоземельных элементов, основную долю среди которых (до 70...80 %) составляет диспрозий. Однако при наличии в смеси европия возникают проблемы с высокой наведенной активностью при облучении, что не позволяет его рекомендовать для использования в коммерческих реакторах.

Более высокие эксплуатационные свойства имеет разработанный специалистами ГНЦ РФ НИИАР совместно с Московским заводом полиметаллов гафнат диспрозия $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$ [7]. При наличии двух поглощающих элементов (диспрозий и гафний) этот материал обладает более высокой по сравнению с $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ физической эффективностью, более технологичен, поскольку в достаточно широких диапазонах состава имеет однофазную разупорядоченную

флюоритную структуру, в то время как титанат диспрозия, как правило, включает несколько фаз: гексагональную, пироклорную, флюоритную и ромбоэдрическую. Как показывают результаты реакторных испытаний, образцы гафната имеют более высокую радиационную стойкость, чем титанат диспрозия.

Гафний. Высокие потенциальные возможности имеет металлический гафний [8]. Хорошие механические и коррозионные характеристики позволяют успешно использовать гафний одновременно в качестве поглощающего и конструкционного материала, что доказано многолетним опытом использования гафния за рубежом. В отсутствие оболочки в результате большего диаметра поглощающего сердечника из гафния при тех же габаритах пэлов их физическая эффективность примерно на 15 % выше, чем пэлов с титанатом диспрозия, и практически равняется эффективности пэлов с V_4C .

4.3. Применение радиационностойких материалов оболочки

Основное требование к оболочке пэлов – сохранение формы и целостности изделий с порошковым сердечником в процессе эксплуатации.

В качестве материала в оболочках пэлов ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000 применяют нержавеющую сталь аустенитного класса 06X18H10T. В процессе реакторного облучения происходит потеря ее пластичности, и при флюенсе нейтронов ($5 \dots 7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$)) равномерное удлинение составляет менее 1 %. При деформации оболочки 0,5...1,0 %, как правило, происходит ее разрушение. Однако в отсутствие деформации со стороны сердечника изделия с такой оболочкой могут работать без разрушения до высоких флюенсов нейтронов.

Использование оболочек с повышенными пластическими характеристиками необходимо, если в качестве сердечника используют материал, распухающий при облучении.

С точки зрения сохранения пластичности под облучением уникальным следует считать хромоникелевый сплав ЭП-630У. При флюенсе нейтронов более $3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) оболочка сохраняет целостность вплоть до деформации 2...4 %. В настоящее время рассматривают проекты широкого внедрения этого сплава в качестве оболочек пэлов реактора ВВЭР-1000.

4.4. Управление ресурсом пэлов

Проблему длительной и экономичной эксплуатации ПС СУЗ невозможно решить только в результате разработки пэлов с высокими ресурсными характеристиками. Например, для опытных комбинированных пэлов, как и для штатных на основе V_4C , установленные ресурсные характеристики по-прежнему носят консервативный характер и существенно занижены. Установленный повышенный ресурс ра-

боты для этих изделий составляет 8-10 лет, из которых 2-3 года – в режиме АР. Задача управления ресурсом ПС СУЗ заключается в максимальном использовании их потенциальных эксплуатационных возможностей, обеспеченных конструкцией и материалами.

Наиболее полно эту задачу решают с помощью стендов инспекции, которые дают возможность проверять текущее состояние каждой кластерной сборки и снимать с эксплуатации только те из них, которые реально достигли предельного состояния. Критерии оценки такого состояния различные и могут быть определены в результате детальных материаловедческих исследований отработавших пэлов, дающих объективное представление о возможности их дальнейшей эксплуатации. За рубежом на АЭС с реакторами PWR широко используют расчетные коды по определению деформационно-напряженного состояния оболочек пэлов в зависимости от эксплуатационных факторов и с учетом степени утонения из-за истирания. Входные параметры этих кодов – глубина и форма истирания оболочки и увеличение ее диаметра. Для этого все поглощающие элементы после одной-трех кампаний реактора проходят первичные исследования по специальным программам инспекции, включающим визуальные, вихретоковые, ультразвуковые исследования и расчетную оценку. Например, в Японии, начиная с 1984 года на АЭС с реакторами PWR было исследовано более 16000 пэлов. Кроме того, собирают данные по условиям эксплуатации каждого отдельного поглощающего элемента, прежде всего, по набранному флюенсу нейтронов и глубине погружения в активную зону. Все данные заносят в компьютер, и после проведения расчетов принимают решение о возможности их дальнейшей эксплуатации или о замене.

Консервативный подход к определению ресурса в виде календарного срока службы явно противоречит целям эффективного использования ресурса ПС СУЗ. Возможный срок службы ПС СУЗ в большой степени зависит от условий эксплуатации в реакторе, которые необходимо учитывать. Достижение высоких ресурсных характеристик ПС СУЗ и максимальное использование их эксплуатационных возможностей без снижения надежности и безопасности работы не представляются возможными без изменения регламента и контроля за их состоянием. Совершенно очевидна необходимость создания для этого расчетных кодов по условиям работы ПС СУЗ на каждом реакторе и баз данных, накапливающих информацию по эксплуатации каждой поглощающей сборки. В основе разработки таких кодов должны лежать современные представления о механизмах элементарных физических процессов в пэлах, данные о свойствах материалов под облучением и критерии предельных состояний для пэлов. Для получения такой информации требуются регулярные материаловедческие исследования отработавших в различных условиях ПС СУЗ.

В регламент работы каждой ПС СУЗ должны входить:

- фиксирование всех перемещений в активной зоне и координат нижнего конца пэла относительно верхнего края активной зоны;
- расчет на конец каждой кампании максимального флюенса нейтронов для ПС СУЗ и выгорания изотопа ^{10}B в случае использования карбида бора;
- установление предельно допустимых эксплуатационных параметров (выгорание ^{10}B не более 50 %; флюенс нейтронов не более $3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) для оболочки из стали 06X18H10T и $6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) для сплава ХНМ); в дальнейшем при наборе статистики эти характеристики могут быть уточнены);
- проведение регулярных материаловедческих исследований (не менее одной ПС СУЗ через два года работы из каждого блока реактора ВВЭР-1000) из числа наиболее представительных изделий, набравших наибольшие повреждающие дозы и выгорания, для уточнения расчетных программ, изучения состояния изделий согласно описанным критериям.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований показано, что в настоящее время в России получены и накоплены теоретические и экспериментальные данные, опираясь на которые возможно многократное увеличение ресурсных возможностей ПС СУЗ реакторов ВВЭР-1000 в результате проведения различных мероприятий. В первую очередь, это изменение в регламенте работы реакторов с целью накопления подробной информации о работе кластерныхборок; создание математической модели для оперативной оценки текущего состояния пэлов ПС СУЗ в зависимости от параметров эксплуатации, для чего необходимо проведение регулярных материаловедческих исследований отработавших ПС СУЗ из числа максимально отработавших; использование новых радиационно-стойких поглощающих материалов и внедрение перспективных конструкций пэлов с повышенными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованый и др. Послереакторные материаловедческие исследования пэлов ПС СУЗ // *Сборник тезисов докладов к 5 Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*, 1997.
2. В.Д. Рисованый и др. Аттестация карбида бора и титаната диспрозия как поглощающего материалов реакторов ВВЭР-1000 // *Сборник тезисов докладов к 5 Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*, 1997.
3. В.Д.Рисованый, Е.Е.Варлашова, С.Р.Фридман. *Поглощающие материалы и органы регулирования реакторов ВВЭР-1000 и PWR. Состояние, проблемы и пути их решения*: Обзор. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998, с.54.

4. В.Д.Рисованый, Е.П.Клочков, В.Б.Пономаренко, А.В.Захаров. *Европий в ядерной технике*. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1997, с.149.
5. А.В.Захаров, В.Д.Рисованый, Е.П.Клочков и др. *Поглощающий сердечник органа регулирования атомного реактора* : Пат. 2119199 РФ 6G 21C 7/10, 7/24, 1998, № 26, с.268.
6. А.В.Захаров, Е.П.Клочков, Ю.Г.Котельников и др. Поглотитель нейтронов для стержней регулирования ядерных реакторов. *Бюллетень изобретений*: Пат. 2101789 РФ 6G21C 7/24, 1998, № 1. с.410.
7. А.В.Захаров, В.Д.Рисованый, Е.П.Клочков. *Поглощающий элемент органа регулирования атомного реактора*: Пат. 2126181 РФ 6G 21C 7/10/ , 1998, № 4, с.645.
8. В.Д.Рисованый, Е.П.Клочков, В.Б.Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993, с.143.
9. С.Р.Фридман, В.Д.Рисованый, В.Г.Топорова. Реакторные испытания и материаловедческие исследования негерметичных конструкций пэл с карбидом бора // *Сборник трудов ГНЦ РФ НИИАР*, 1998.