

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 621.039

РАЗРАБОТКА И НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПЭЛОВ С ПОГЛОТИТЕЛЕМ V_4C-Nf

В.С. Красноруцкий, Н.Н. Белаш, А.М. Абдуллаев, А.И. Жуков, И.А. Петельгузов, Н.А. Михайлов, Е.А. Слабоспицкая
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина

Приведены варианты конструкции поглощающего элемента с комбинированным поглотителем V_4C-Nf для регулирующих органов реактора ВВЭР-1000 и результаты изучения поведения их макетов при перегревах в среде водяного пара до температур в интервале 900...1200 °С. В качестве оболочек пэлов проработаны материалы: сталь ЭИ 847 и сплав Э110. Описаны результаты материаловедческих исследований оболочек и сварных соединений. Изучен характер взаимодействия материала оболочек с порошком V_4C . Расчетами установлено, что эффективность поглощения нейтронов такими ПС СУЗ эквивалентна эффективности штатных сборок с поглотителем V_4C . Показана экономическая целесообразность применения в реакторе ВВЭР-1000 ПС СУЗ, снаряженных пэлами с поглотителем V_4C-Nf .

ВВЕДЕНИЕ

Требование обеспечения повышенной безопасности и экономичности реакторных установок обуславливает необходимость проведения работ по усовершенствованию всех систем, важных для безопасности. В первую очередь это относится к ядерному топливу, поглощающим стержням системы управления и защиты (ПС СУЗ), стержням выгорающего поглотителя (СВП). В частности, специалисты ряда стран активно ведут работы, связанные с повышением безопасности и ресурса работы ПС СУЗ. При этом рассматриваются варианты использования в пэлах новых поглощающих материалов, применения более радиационно-стойких оболочек, усовершенствования конструкции пэлов [1-3]. Например, в качестве перспективных поглощающих материалов предлагаются титанат диспрозия ($Dy_2O_3 \cdot TiO_2$), металлический гафний, гафнат диспрозия ($Dy_2O_3 \cdot HfO_2$), диборид гафния (HfB_2) и различные их комбинации с V_4C [1,2]. Как перспективный материал для оболочек пэлов российские специалисты рассматривают никелевый сплав ЭП-630У, а западные - сталь SS316L [1], а также сплавы циркония и гафния [3]. Одним из вариантов кардинального улучшения эксплуатационных характеристик ПС СУЗ является применение в нижней части пэлов n, γ -поглотителя вместо n, α -поглотителя, например, гафниевого стержня или титаната диспрозия. Для реализации данной концепции предложено целый ряд конструкций пэла [3-5].

ГП МЗП (Россия) реализовал данную концепцию, организовав выпуск для реакторов ВВЭР пэлов с комбинированным поглотителем $V_4C-Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ в оболочке из сплава ЭП-630У взамен пэлов с поглотителем V_4C . Недостаточно высокая исходная эффективность $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ (она ниже на 15...20 %, чем у V_4C) компенсируется более медленным темпом выгорания поглощающих изотопов

по сравнению с карбидом бора. Перспективным считается использование пэлов с комбинированным поглотителем V_4C-Nf , поскольку открывается возможность применения гафния в открытом виде (без оболочки), что обеспечивает (при низком темпе выгорания изотопов) исходную эффективность, близкую к вариантам пэла с поглотителем V_4C [3,6].

Для обоснования использования перспективных вариантов пэлов представляет интерес изучение их работоспособности в аварийных условиях, а также физическая и экономическая эффективность использования в ПС СУЗ ядерных реакторов.

В настоящей работе приведены варианты конструкции пэла с комбинированным поглотителем V_4C-Nf и оболочками из нержавеющей стали и циркониевого сплава для реактора ВВЭР-1000, результаты изучения поведения макетов пэла в условиях перегрева в водяном паре, имитирующей аварийные ситуации, результаты расчета нейтронно-физических характеристик ПС СУЗ различной конструкции и оценки экономической эффективности их использования.

1. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ПЭЛА

В ННЦ ХФТИ разработано несколько вариантов конструкции пэла с комбинированным поглотителем V_4C-Nf для реактора ВВЭР-1000 с оболочкой из нержавеющей стали [7,8], циркониевого сплава [9], а также способы их изготовления [7,10].

В разработанных конструкциях пэла верхняя часть состоит из оболочки, изготовленной из нержавеющей стали или циркониевого сплава, за-

полненной карбидом бора. Над сердечником поглотителя из V_4C находится газовый компенсатор, заполненный гелием. Верхний конец оболочки загерметизирован наконечником-заглушкой. Нижняя часть пэла выполнена в виде стержня из гафния диаметром 8,2 мм. В варианте конструкции, где используется оболочка из нержавеющей стали, верхняя и нижняя части жестко соединены между собой через переходную деталь (переходник), с помощью которой герметизируется второй конец оболочки. В пэлах с оболочкой из циркониевого сплава гафниевый стержень соединен непосредственно с оболочкой.

Исследование поведения разработанных вариантов пэла реактора ВВЭР-1000 в условиях перегрева в среде водяного пара осуществляли на их макетах, приведенных на рис. 1.

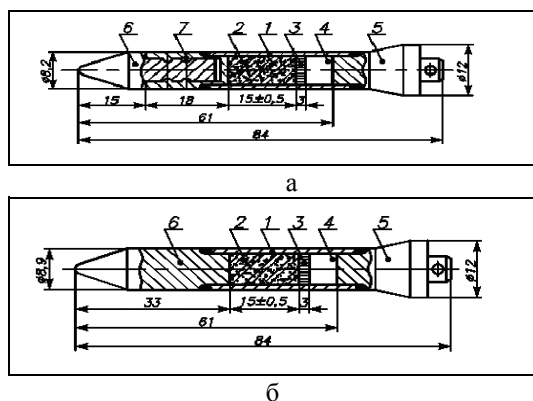


Рис. 1. Конструкция макетов пэла: а – вариант с оболочкой из нержавеющей стали; б – вариант с оболочкой из циркониевого сплава; 1 – оболочка; 2 – V_4C ; 3 – газопроницаемая вставка; 4 – газосборник; 5 – наконечник; 6 – гафниевый стержень; 7 – переходник

В качестве оболочек в макетах использовали трубу $\varnothing 8,2 \times 0,6$ мм из аустенитной нержавеющей стали ЭИ 847 (Fe-16 % Cr-15 % Ni-3,0 % Mo), близкой по составу к стали SS316L, и трубу $\varnothing 8,9 \times 0,6$ мм из сплава Zr-1 % Nb (ЭИ10). Переходник и наконечник для макетов пэла с оболочкой из ЭИ 847 готовили из стали 08X18H10T, а наконечник для макетов с циркониевой оболочкой – из ЭИ10. Для изготовления нижней части макетов пэла применяли гафний марки ГФЭ-1 в состоянии после ротационнойковки при температуре 500 °С и стабилизирующего отжига в течение 1,0 ч при 850 °С. Оболочки макетов заполняли порошком V_4C до плотности 1,75 г/см³ с использованием операции виброуплотнения. В процессе изготовления макеты заполняли гелием до атмосферного давления. Герметизацию оболочек, соединение переходника и циркониевой оболочки с гафниевым стержнем производили на установке электродуговой сварки СА-281 [11].

В процессе расчетов эффективности поглощения нейтронов и оценок экономической эффективности использования ПС СУЗ рассматривали девять вариантов пэла для их комплектации. Вариант I представлял собой пэл штатной конструкции, включающий оболочку из стали 06X18H10T и поглотитель V_4C . Варианты II-V представляли собой пэлы с комбинированным поглотителем V_4C -

Hf, в которых верхняя часть состояла из оболочки, выполненной из ЭИ 847 и заполненной порошком V_4C , а нижняя – из гафниевого стержня длиной 0,3, 0,5, 0,8 и 1,0 м. Нижняя и верхняя части пэла соединены между собой через переходник. Варианты VI-IX отличались от предыдущих тем, что в них оболочка, включающая поглотитель V_4C , выполнена из ЭИ10, а верхняя и нижняя части пэла соединены между собой без использования переходника. Длина сердечника поглотителя равнялась 3,70 м, длина всего поглощающего элемента составляла 4,22 м. Результаты расчетов сравнивали с результатами, полученными для рабочей группы ПС СУЗ с пэлами, где в качестве поглотителя использован порошок V_4C .

2. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРЕВА НА СОСТОЯНИЕ МАКЕТОВ ПЭЛА

Испытания макетов пэла проводили при температурах 900, 1000, 1100, 1200 °С в среде водяного пара. Время выдержки при температуре испытаний составляло 120 с. Средняя скорость нагрева до температуры испытаний составляла 13 °С/с, а скорость охлаждения – 40°С/с. В процессе исследований после охлаждения макетов фиксировали изменение их геометрических размеров в центральной части оболочки и в области сварных соединений, исследовали изменение структуры и микротвердости материала оболочек макетов пэла и сварных соединений, характер взаимодействия оболочек из ЭИ 847 и ЭИ10 с порошком V_4C .

2.1. МАКЕТЫ ПЭЛА С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

После испытаний в среде водяного пара в интервале температур 900...1100 °С макеты пэла сохранили первоначальную геометрическую форму и герметичность (рис. 2, а-в). На поверхности гафниевого стержня на всех макетах сформировалась блестящая оксидная пленка серого цвета, прочно сцепленная с его поверхностью.

На поверхности оболочки из нержавеющей стали и в области сварных соединений образовалась оксидная пленка, цвет которой менялся от светло-серого с зеленым или фиолетовым оттенком до серого в зависимости от температуры испытаний. Иная картина наблюдалась после испытаний макетов пэла при 1200 °С. Если на гафнии цвет оксидной пленки и, соответственно, толщина значительно не поменялись в сравнении с испытаниями при более низких температурах, то на поверхности оболочки сформировалась матовая оксидная пленка светло-серого цвета толщиной 25...40 мкм. Она была плохо сцеплена с поверхностью оболочки, поэтому легко от нее отделялась. Кроме того, на поверхности оболочки образовались сквозные отверстия и язвы диаметром от 0,3 до 1,0 мм, вызвавшие потерю герметичности макетов. В отдельных местах на

оболочке наблюдались выпуклости высотой до 1,5 мм (см. рис. 2, г). Измерения внешнего диаметра по длине макетов пэла дали следующие результаты: диаметр гафниевого стержня изменился незначительно; разница в

значениях диаметра не превышала 10 мкм даже после испытаний при температуре 1200 °С, что свидетельствовало о его высокой коррозионной стойкости.

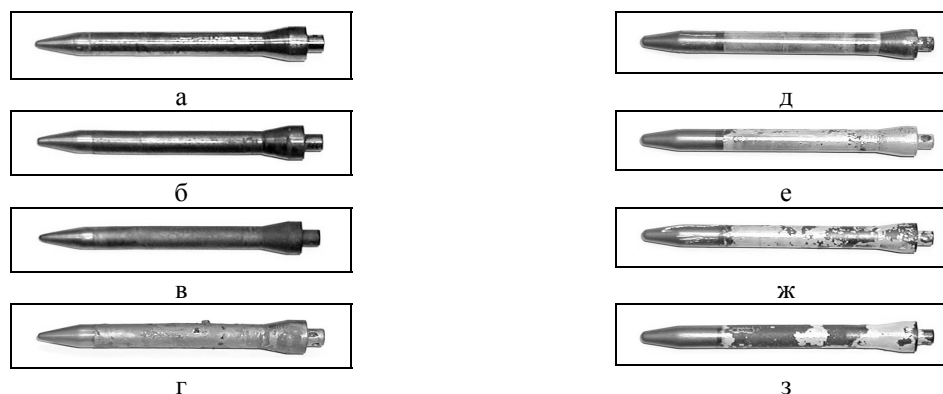


Рис. 2. Внешний вид макетов пэла с оболочками из ЭИ 847 (а-г) и ЭИ110 (д-з) после испытаний в среде водяного пара при температурах: а, д - $T=900^{\circ}\text{C}$; б, е - $T=1000^{\circ}\text{C}$; в, ж - $T=1100^{\circ}\text{C}$; г, з - $T=1200^{\circ}\text{C}$

В средней части оболочки, в области сварных швов: оболочка – заглушка (ЭИ 847-X18Н10Т) и переходник – гафниевый стержень (X18Н10Т-ГФЭ-1) наблюдали увеличения диаметра от 10 мкм при 900 °С до 30...40 мкм при 1100 °С. В результате обработки поверхности макетов пэла шлифовальной бумагой оксидный слой снимался полностью, а значения диаметра макетов пэла становились близкими к его значениям в исходном состоянии. Полученные результаты свидетельствовали о том, что изменение диаметра в данном случае обусловлено образованием оксидной пленки. Испытания макетов при

температуре 1200 °С вызвали увеличение диаметра оболочки до 270 мкм, а на сварных швах ЭИ 847-X18Н10Т и X18Н10Т-ГФЭ-1 соответственно до 40 и 80 мкм. Обработка поверхности макетов пэла шлифовальной бумагой приводила к тому, что на сварных швах диаметр уменьшался до исходного значения, а на оболочке его значения уменьшались лишь на 50...80 мкм.

Результаты металлографических исследований образцов, вырезанных из разных зон макетов пэла, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика оболочки из ЭИ 847, материала сварных соединений и гафниевого стержня после испытаний в водяном паре в интервале температур 900...1200 °С

Номер макета пэла	Параметры испытаний		Микротвердость, ГПа			Величина зерна, мкм			Величина зоны диф. взаимодействия между В ₄ С и нерж. сталью, мкм
	температура, °С	время, с	оболочка (ЭИ 847)	сварное соединение ЭИ 847 – X18Н10Т	гафниевый стержень (ГФЭ-1)	оболочка (ЭИ 847)	сварное соединение ЭИ 847 – X18Н10Т (размер игл)	гафниевый стержень (ГФЭ-1)	
4	1200	120	2,4±0,1	2,5±0,1	2,9±0,2	40-60	250×(7...9)	45...60	400...500
3	1100		2,4±0,1	2,5±0,1	2,7±0,1	20-30	300×(15...30)	50...60	50...60
2	1000		2,2±0,1	2,4±0,2	2,8±0,1	17-27	220×(8...12)	45...50	25...35
1	900		2,3±0,1	2,4±0,1	2,6±0,1	12-22	220×(8...12)	50...55	< 20
0	исходн. сост.		2,4±0,1	2,5±0,1	2,4±0,1	12-20	90×(6...9)	35...50	-

Анализируя полученные результаты, можно заключить следующее. Нагрев образцов в среде водяного пара при температурах от 900 до 1200 °С практически не изменяет микротвердости материала оболочки и материала сварного шва оболочки с заглушкой из нержавеющей стали. Ее значения равнялись 2,3...2,5 ГПа. Величина зерна в материале оболочки с повышением температуры испытаний увеличивалась с 12...20 мкм в исходном состоянии до 40...60 мкм после испытаний при температуре 1200°С. Материал сварного шва оболочки с заглушкой имел

структуру в виде игл и пластин мартенситного типа шириной 6...9 мкм и длиной около 90 мкм. С увеличением температуры их размеры увеличивались. На гафниевом стержне зерна выросли от 35...50 мкм до 45...60 мкм. Значения микротвердости увеличились от 2,3...2,5 ГПа до 2,7...3,1 ГПа. Изучение границы раздела сталь ЭИ 847-В₄С показало, что при температуре 1200 °С между этими материалами происходит эвтектическое взаимодействие, которое приводит к образованию диффузионного слоя толщиной 400...500 мкм на большей части контактной поверх-

ности, и к проплавлению оболочки в локальных местах (рис. 3,а). Микротвердость диффузионного слоя составляла 4,0...5,0 ГПа. При снижении температуры испытаний до 1100 °С наблюдалось незначительное взаимодействие по границам зерен на глубину не более 50...60 мкм без образования промежуточных диффузионных слоев (см. табл. 1).

2.2. МАКЕТЫ ПЭЛА С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ Э110

В отличие от макетов пэла с оболочкой из нержавеющей стали макеты пэла, в которых использовалась циркониевая оболочка, сохранили герметичность во всем диапазоне исследуемых температур (900...1200 °С). После испытаний при указанных температурах в месте сварного шва оболочки с гафниевым стержнем (Э110-ГФЭ-1) наблюдалось образование пояска шириной 1,8...2,3 мм из блестящей оксидной пленки черного цвета (см. рис. 2,д-з). Внешний диаметр в области сварного соединения Э110-ГФЭ-1 увеличился после испытаний при температуре 900 °С на 40 мкм, а при 1200 °С – на 50 мкм.

Материал сварного шва соединения Э110-ГФЭ-1 в исходном состоянии имел величину зерен 50...

200 мкм и представлял собой твердый раствор циркония в гафнии. С увеличением температуры испытаний наблюдалось незначительное увеличение размера зерен (до 70...230 мкм). Микротвердость материала сварного шва Э110-ГФЭ-1 в исходном состоянии равнялась (2,8±0,2) ГПа и существенно не изменялась с повышением температуры испытаний.

На поверхности оболочки и сварного соединения оболочки с наконечником (Э110-Э110) при взаимодействии с водяным паром формировалась белая серебристая оксидная пленка, которая после нагрева до температур выше 1000 °С легко отслаивалась от поверхности оболочки. Под оксидной пленкой белого цвета наблюдалась оксидная пленка черного цвета, которая была прочно сцеплена с поверхностью оболочки. На циркониевой оболочке фиксировали увеличение диаметра после окисления в среде водяного пара при температуре 900 °С на 80 мкм, а при 1200 °С – на 220 мкм. Максимальное увеличение диаметра макетов пэла происходило в области сварного соединения сплава Э110-Э110.

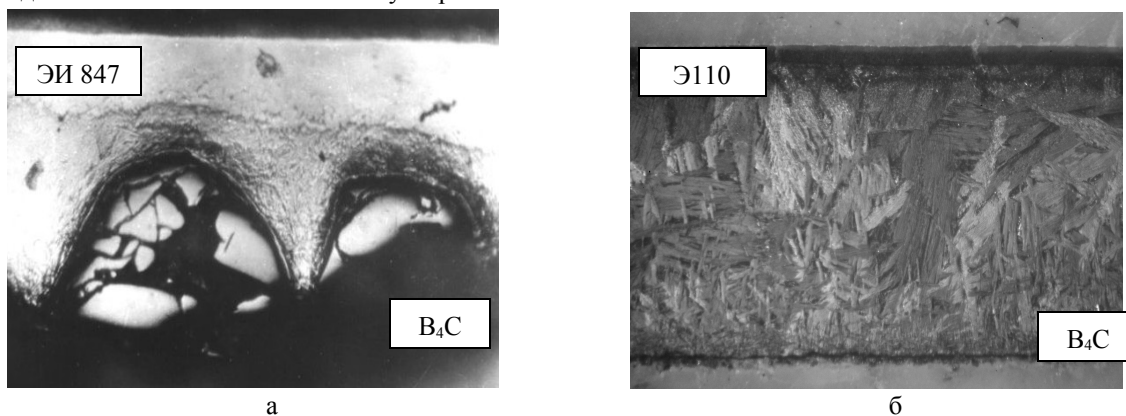


Рис. 3. Структура оболочек макетов пэла в месте контакта с порошком карбида бора после испытаний в среде водяного пара при температуре 1200 °С: а – ЭИ 847-В₄С; б – Э110-В₄С

Эти значения превышали данные по увеличению диаметра оболочки в 1,2...1,5 раза. В результате обработки поверхности макетов пэла шлифовальной бумагой снимался лишь слой белой оксидной пленки толщи-

ной 15...25 мкм. Оксидная пленка черного цвета имела повышенную твердость и оставалась на оболочке.

Микротвердость материала оболочки и сварного соединения Э110-Э110 увеличивалась с повышением температуры испытаний (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика оболочки из Э110, материала сварных соединений Э110-Э110 и Э110-ГФЭ-1 после испытаний в водяном паре в интервале температур 900...1200 °С

Номер макета	Параметры испытаний		Микротвердость, ГПа			Величина зерна, мкм			Ширина диф. зоны на границе раздела В ₄ С-Э110, мкм
	температура, °С	время, с	оболочка (Э110)	сварное соединение Э110-Э110	сварное соединение Э110-ГФЭ-1	оболочка (Э110)	сварное соединение Э110 - Э110	сварное соединение Э110-ГФЭ-1	

14	1200	120	3,3±0,3	2,7±0,2	2,7±0,2	зерно: 40...290; иглы: (150...180)× (20...25)	зерно: 60...290; иглы: (100...200)× (10...12)	зерно: 60-230	100...120
13	1100		2,5±0,2	2,4±0,1	2,6±0,2	зерно: 70...280; иглы: (30...60)× (1,5...12)	зерно: 70...240; иглы: (75...170)× (2,5...6)	зерно: 70...230	80...100
12	1000								
11	900								
10	исх. сост.								
		1,6±0,1	2,1±0,1	2,8±0,2	зерно: 25...120; иглы: (20...50)× (2...9)	зерно: 95...210; иглы: (15...30)× (1,5...2,5)	зерно: 50...200	≤ 50	
		1,6±0,1	2,0±0,1	2,8±0,2	зерно: 5...12	зерно: 100...250; иглы: (30...90)× (2,5...6,5)	зерно: 50...200		

Если после испытаний при температуре 900 °С изменение микротвердости было незначительным, то с повышением температуры испытаний до 1200 °С микротвердость увеличилась от (1,6±0,1) до (3,3±0,3) ГПа в материале оболочки и от (2,1±0,1) до (2,7±0,2) ГПа в материале сварного шва. В исходном состоянии оболочка имела мелкозернистую структуру с величиной зерен 5...12 мкм, представляющую собой равновесную α-фазу Zr с мелкодисперсными выделениями β-фазы Nb. В результате нагрева до высоких температур и последующего охлаждения при испытаниях в среде водяного пара в материале оболочки формировалась неравновесная структура, состоящая из игольчатых выделений α'-фазы Zr и границ бывших β-зерен Zr. С повышением температуры испытаний от 900 до 1200 °С наблюдалось увеличение количества и размеров игольчатых зерен α'-фазы Zr и рост бывших β-зерен Zr от 25...120 до 40...290 мкм.

Материал сварного шва Э110-Э110 уже в исходном состоянии имел структуру, состоящую из зерен α'-фазы Zr в виде игл и пластин. Также на шлифах наблюдались границы бывших β-зерен Zr размером 100...250 мкм (рис. 4,б). Повышение температуры испытаний приводило к увеличению размеров игл и пластин α'-фазы Zr. На циркониевой оболочке макетов пэла, испытанных при температуре 1200 °С, со стороны контакта с В₂С наблюдалось образование зоны шириной около 120 мкм, в которой структура отличалась от структуры основной части оболочки наличием более мелких игл α'-фазы Zr (см. рис. 3,б). По мере сни-

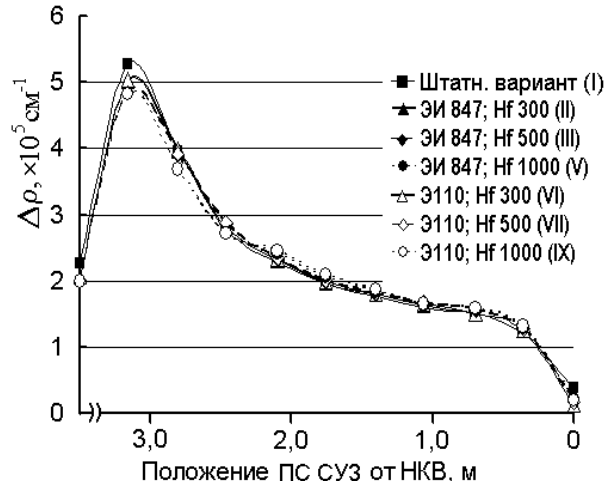
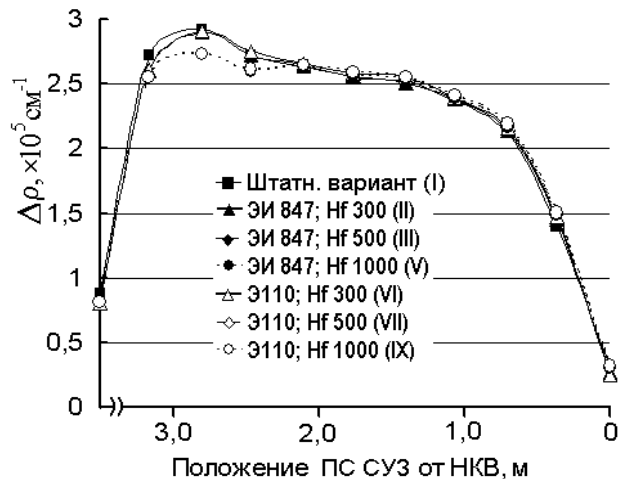
жения температуры испытаний ширина этой зоны уменьшалась (см. табл. 2).

3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПС СУЗ

Расчёты дифференциальной и интегральной эффективности рабочей группы поглощающих стержней системы управления и защиты (далее ПС СУЗ) проводили, используя коды PHOENIX-N и ANC-N. Рассматривали начало и конец типичной топливной кампании блока ВВЭР-1000, работающего на номинальной мощности. В процессе расчетов рассматривали ПС СУЗ, укомплектованные пэлами, включающими гафние-вые стержни длиной 0,3; 0,5 и 1,0 м.

Результаты расчета дифференциальной эффективности ПС СУЗ в зависимости от глубины погружения в активную зону реактора приведены на рис. 4, а результаты расчета интегральной эффективности полностью погруженных ПС СУЗ для начала и конца топливной кампании показаны на рис. 5.

Сравнение полученных значений для приведенных выше вариантов ПС СУЗ свидетельствовало, что при длине гафниевого стержня в пэлах равной 0,3 и 0,5 м значения дифференциальной эффективности ($\Delta\rho$) практически не отличаются между собой. Не сказывался также на значениях $\Delta\rho$ материал оболочки пэлов (06X18H10T, ЭИ 847 или Э110) (см. рис. 4).

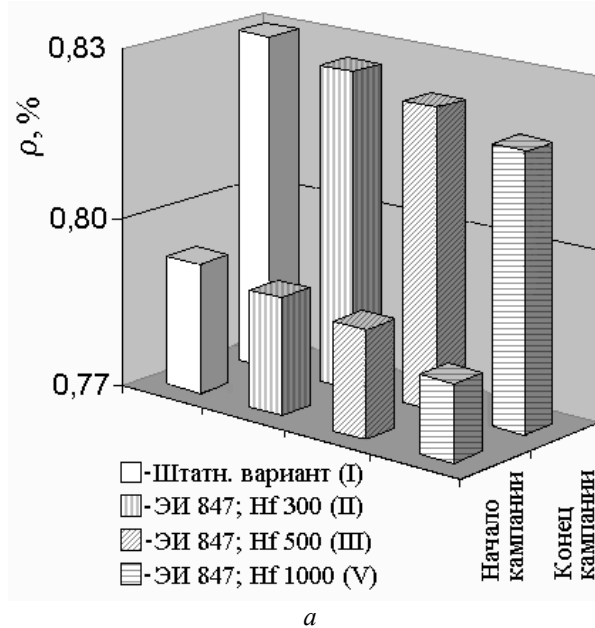


а

б

Рис. 4. Зависимость дифференциальной эффективности рабочей группы ПС СУЗ, снаряженных пэлами с различной длиной гафниевого стержня и оболочками из нержавеющей стали, и циркониевого сплава от глубины погружения в активную зону реактора ВВЭР-1000: а – начало кампании; б – конец кампании

Незначительное уменьшение значений $\Delta\rho$ наблюдалось в случае размещения ПС СУЗ на высоте равной 2,5...3,0 м от нижнего концевого выключателя (НКВ) при использовании пэлов с длиной гафниевого стержня 1,0 м. Эта разница не превышала 7 %. К концу кампании соотношения между значениями $\Delta\rho$ для ПС СУЗ с пэлами различной конструкции заметно не изменялись (см. рис. 4,б).



Значения интегральной эффективности (ρ) ПС СУЗ в зависимости от глубины погружения в активную зону реактора также практически не различались между собой. Некоторое отличие в значениях ρ проявлялось лишь для полностью погруженных ПС СУЗ (см. рис. 5). Полученные данные свидетельствуют, что с увеличением длины гафниевого стержня значения ρ уменьшаются. Однако разница в этих значениях не превышала 0,01 %.

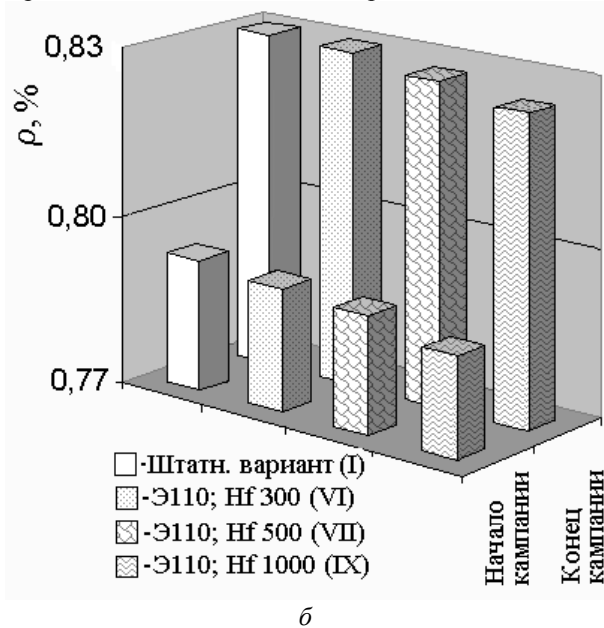


Рис. 5. Зависимость интегральной эффективности рабочей группы ПС СУЗ, полностью погруженных в активную зону, от длины гафниевого стержня и материала оболочки пэла: а – нержавеющая сталь; б – циркониевый сплав

Использование в конструкции пэлов циркониевой оболочки несколько повышало значения интегральной эффективности кластерных сборок. Это обусловлено тем, что циркониевая оболочка имеет меньшее сечение отражения нейтронов по сравнению с оболочкой, выполненной из нержавеющей сталей.

4. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ПС СУЗ С ПЭЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ

Экономическая эффективность применения новых усовершенствованных ПС СУЗ зависит от стоимости пэлов, времени эксплуатации, затрат на их утилизацию. Определенный вклад в экономические показатели вносят затраты на НИОКР и модернизацию производства новых пэлов, перевозку и временное хранение свежих и отработавших кампанию изделий.

При оценке стоимости ПС СУЗ, укомплектованных поглощающими элементами различных

конструкций, исходили из следующих предположений:

- стоимость штатной кластерной сборки СУЗ ВВЭР-1000, состоящей из 18 пэлов (сб. 2145), производства ГП МЗП (Россия) составляет 22000 дол. США [6, 12];

- на изготовление комплектующих и сборку ПС СУЗ затрачивается 20 % от общей стоимости изделия, т.е. 4400 дол. и, следовательно, один штатный пэл на основе виброуплотненного порошка W_4C стоит $(22000 \dots 4400) : 18 \approx 978$ дол. США [12];

- предполагали, что затраты на производство пэлов новых конструкций будут превышать стоимость производства штатных пэлов на 10 %.

При оценке стоимости пэлов исходили из следующих цен за один килограмм материала: стержень из Hf – 350 дол.; труба и стержень из циркониевого сплава соответственно 200 и 120 дол. США.

Расчет цены ПС СУЗ, выполненный по методике работы [12], показал, что основной вклад в

стоимость материалов, используемых для изготовления пэлов с комбинированным поглотителем, вносит гафний. Например, использование в пэлах гафниевого стержня длиной от 0,3 до 0,5 м приведет к повышению затрат на материалы от 3,7 до 5,5 раза по сравнению с пэлами штатной конструкции (вариант I). Увеличение его длины до 1,0 м увеличит это отношение до ~10 раз. Повышение затрат на материалы соответственно приведет к удорожанию кластерных сборок в первом случае на 19...27 %, а во втором – на 45 %.

Использование в качестве материала оболочки циркониевого сплава вместо стали 06X18H10T приведет к увеличению стоимости кластерных сборок с пэлами приведенных выше вариантов не более чем на 5,4 %. Однако эта разница становится не существенной в случае использования в качестве материала оболочки сплава ЭП-630У. Снижение или повышение цены на гафний, например, в два раза вызовет, соответственно, снижение или увеличение стоимости ПС СУЗ в случае использования гафниевого стержня длиной 0,3 м на 5 %, а при использовании стержня длиной 1,0 м – на 15 %.

При оценке экономической эффективности ПС СУЗ учитывали имеющийся мировой опыт эксплуатации металлического гафния в качестве поглотителя в реакторах типа PWR и предполагали, что длительность эксплуатации пэлов с поглотителем V_4C-Hf может составлять не менее 15 лет [3]. Полученные данные сравнивали с результатами расчета стоимости штатного варианта ПС СУЗ, где использовались пэлы с поглотителем V_4C (конструкции сб. 2145). Ресурс таких ПС СУЗ в реакторе ВВЭР-1000 составлял 2 года в группе автоматического регулирования (АР) (6 кластеров) и 5 лет в группе аварийной защиты (АЗ) (55 кластеров). На 30-летний срок работы одного энергоблока ВВЭР-1000 требуется 420 таких кластерных сборок при условии, что пэлы могут работать только в одном режиме: АР или АЗ. В этом случае суммарные затраты на их приобретение составят ~9,2 млн. дол. США. Увеличение срока службы сборок приведет к уменьшению их количества и затрат на приобретение. Например, увеличение длительности эксплуатации ПС СУЗ в режиме АР с 2 до 3 лет, а в режиме АЗ с 5 до 12 лет приведет к уменьшению количества приобретаемых сборок в течение 30 лет с 420 до 198 штук. Результаты расчета экономической эффективности применения ПС СУЗ различной конструкции свидетельствовали, что использование кластерных сборок, снаряженных пэлами с поглотителем V_4C-Hf , начнет приносить прибыль при длительности их эксплуатации не менее 3 лет в режиме АР и не менее 6 лет в режиме АЗ. Причем ощутимая прибыль при их использовании, например, составляющая 25 % (2,3 млн. дол.), будет достигнута после 8 лет работы в режиме АЗ и 3 лет в режиме АР в случае использования пэлов с гафниевым стержнем длиной 0,3...0,5 м и соответственно после 10 лет работы в режиме АЗ и 3 лет работы в режиме АР при использовании пэлов с гафниевым стержнем длиной 0,8...1,0 м. Поскольку в процессе

работы в реакторе ВВЭР-1000 значительному облучению подвергается лишь нижняя часть пэлов длиной около 0,5 м, то, вероятно, этой длины вполне достаточно для обеспечения работоспособности поглощающих элементов длительное время.

Оценка эффективности использования ПС СУЗ, снаряженных пэлами с такой длиной гафниевой части (0,5 м), показала, что при увеличении их срока службы, например, до 12 лет в режиме АЗ и до 3 лет в режиме АР можно ожидать экономии валюты за период эксплуатации, равный 30 лет, в размере от 3,5 млн. дол. до 4,0 млн. дол. США. При этом число ПС СУЗ, подлежащих утилизации, уменьшится в ~ 2 раза.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Считается, что при температурах выше 900...1150 °С в месте контакта большинства нержавеющей сталей с карбидом бора может наблюдаться образование легкоплавкой эвтектики, что вызовет разрушение оболочки пэлов [1,13]. Выполненные в настоящей работе испытания в среде водяного пара и исследования макетов пэла, включающих оболочку из ЭИ 847, показали, что нагрев до температуры 1100 °С и выдержка при данной температуре в течение 120 с не приводят ни к разгерметизации оболочек макетов, ни к потере первоначальной геометрической формы. Повышение температуры испытаний до 1200 °С приводит к разгерметизации оболочки в результате эвтектического взаимодействия между материалом оболочки и порошком карбида бора.

В результате высокотемпературных испытаний материал циркониевой оболочки и ее сварных швов подвергался более значительным структурным изменениям по сравнению с материалом оболочки из нержавеющей стали. Однако использование циркониевой оболочки обеспечивало целостность макетов до более высоких температур в процессе испытаний по сравнению с макетами, где использовалась оболочка из нержавеющей стали. Так после испытаний при 1200 °С признаков разгерметизации макетов пэла с оболочкой из ЭИ10 не наблюдалось, граница раздела оболочки с порошком V_4C была ровной, без следов образования легкоплавких фаз.

Согласно оценкам, выполненным в работе [3], эффективность поглощения нейтронов ПС СУЗ при использовании в нижней части пэлов стержня из гафния длиной 1 м и диаметром 8,2 мм имеет близкие значения к ПС СУЗ со штатными пэлами, где в качестве поглотителя использован V_4C .

Нейтронно-физические расчеты, выполненные в данной работе, позволили уточнить приведенные выше данные. В частности, в результате расчетов подтверждено, что значения интегральной эффективности для рабочей группы ПС СУЗ, укомплектованных пэлами с поглотителем V_4C-Hf , при пошаговом их погружении в активную зону практически не отличаются от интегральной эффективности ПС СУЗ, укомплектованных пэлами с V_4C .

Показано, что незначительное отличие в значениях интегральной эффективности проявляется лишь для полностью погруженных ПС СУЗ. Значения дифференциальной эффективности практически не зависят от материала оболочки, но зависят в большей степени по сравнению с интегральной эффективностью от длины гафниевого стержня. Использование в конструкции пэлов циркониевой оболочки несколько повышает значения интегральной эффективности ПС СУЗ, что обусловлено меньшим ее сечением отражения нейтронов по сравнению с оболочкой из нержавеющей стали.

Поскольку при поглощении нейтронов атомами гафния в процессе облучения образуется новый изотоп с высокой поглощающей способностью, а продукты распада изотопов гафния имеют достаточно высокие сечения поглощения нейтронов, то для гафния является характерным более медленный темп выгорания изотопов по сравнению с карбидом бора. Например, через пять лет работы в реакторе эффективность пэлов с гафнием уменьшается до 84 % от исходной, а эффективность пэлов с V_4C – до 62 % [1, 3].

Оценка экономической эффективности применения в реакторе ВВЭР-1000 ПС СУЗ, снаряженных пэлами с комбинированным поглотителем $Hf-V_4C$, свидетельствует о целесообразности их использования, несмотря на увеличение затрат на материалы. Применение таких ПС СУЗ должно окупаться в течение 3 лет эксплуатации в режиме АР и 6 лет – в режиме АЗ. С экономической точки зрения предпочтительным является использование ПС СУЗ, включающих пэлы с длиной гафниевого стержня не более 0,5 м. Эти данные согласуются с выводами, сделанными в работе [1].

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно заключить, что использование в ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000 разработанных вариантов пэла с комбинированным поглотителем V_4C-Hf и оболочками из нержавеющей стали или циркониевого сплава является перспективным. Применение циркониевой оболочки в пэлах обеспечит сохранение их целостности и, следовательно, повысит безопасность всего реактора в аварийных ситуациях.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что макеты пэла, включающие оболочку из стали ЭИ 847 и комбинированный поглотитель V_4C-Hf , сохраняют герметичность и первоначальную геометрическую форму после испытаний в среде водяного пара в течение 120 с в интервале температур 900...1100 °С, а макеты пэла с оболочкой из сплава Э110 – в интервале температур 900...1200 °С.

2. Подтверждено, что причиной разгерметизации поглощающих элементов с оболочкой из нержавеющей стали при температурах выше 1100 °С является эвтектическое взаимодействие между частицами порошка V_4C и материалом оболочки.

3. Путем расчетов с использованием кодов PHOENIX-H и ANC-H показано, что значения инте-

гральных и дифференциальных эффективностей рабочей группы ПС СУЗ, снаряженных поглощающими элементами с комбинированным поглотителем V_4C-Hf , имеют близкие значения к аналогичным характеристикам ПС СУЗ штатного варианта с поглотителем V_4C .

4. Показано, что, несмотря на повышение стоимости пэлов с комбинированным поглотителем V_4C-Hf по сравнению со штатным вариантом (сб. 2145), их использование в ПС СУЗ окупается за период эксплуатации в течение 3 лет в режиме АР и 6 лет в режиме АЗ.

5. Установлено, что по экономической эффективности и нейтронно-физическим характеристикам наиболее перспективным из рассмотренных вариантов является использование в ПС СУЗ поглощающих элементов с оболочкой из нержавеющей стали или циркониевого сплава с длиной гафниевого части до 0,5 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованный, 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, 54 с.
2. В.И. Ряховских, С.В. Шмелёв, В.М. Чернышов и др. Современное состояние разработки и производства органов регулирования ядерных реакторов ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1997, в. 1(65), 2(66), с. 110–118.
3. В.Д. Рисованный, В.П. Клочко, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993, 140 с.
4. Патент № 24734 UA от 30.10.98. *Регулирующий стержень ядерного реактора* /В.Б. Пономаренко, А.О. Пославский, В.М. Чернышов и др. //Бюл. № 5, G 21C7/10.
5. Патент № 2003136377 А от 20.05.2005. *Регулирующий стержень ядерного реактора* /В.И. Ряховских //Бюл. № 14, G 21C1/00.
6. А.А. Афанасьев, В.С. Красноруцкий, И.М. Неклюдов. Поглощающие элементы на основе комбинированного поглотителя V_4C/Hf для украинских АЭС // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, в. 3 (75), с. 85–90.
7. Патент Украины № 738 от 15.03.2001. *Поглощающий стержневой элемент ядерного реактора* /В.С. Красноруцкий, В.Р. Татаринов, П.А. Чернов //Бюл. № 2, G21C7/10.
8. Патент на винахід № 76216 від 17.07.2006. *Поглиналий стержневий елемент ядерного реактора (Варіанти)* /М.М. Белаш, В.С. Красноруцкий //Бюл. № 7, G21C7/08, G21C 21/00.
9. Патент № 11315 від 15.12.2005. *Поглинаючий елемент ядерного реактора* /М.М. Белаш,

- В.С. Красноруцкий, М.О. Михайлов //Бюл. №12, МПК 7G21C 7/10.
10. Патент № 69082 А від 16.08.2004. *Способ изготовления поглощающего стержневого элемента ядерного реактора* /М.М. Белаш //Бюл. № 8, G21C 21/18; G21C 7/10.
11. В.С. Красноруцкий, Н.Н. Белаш, И.А. Петельгузов, Е.А. Слабоспицкая, Л.Ю. Мильяченко, В.И. Савченко, Ж.С. Ажажа. Свойства соединения гафний-нержавеющая сталь, полученного оплавлением электрической дугой в среде аргона //Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (88). 2005, № 5, с. 87-93.
12. А.А. Афанасьев, Ю.Ф. Конотоп, Н.Л. Одейчук. Гафний – перспективный поглотитель для СУЗ реакторов ВВЭР-1000 АЭС Украины //Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (78). 2000, № 4, с. 80-85.
13. В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, С.Р. Фридман. Взаимодействие карбида бора со сталью 06Х18Н10Т в диапазоне температур 600-1200°C //Сборник тезисов докладов IV Международной конференции по реакторным материалам. Д.Митровград: НИИАР, 1995, с. 204.

РОЗРОБКА ТА ДЕЯКІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПЕЛІВ З ПОГЛИНАЧЕМ В₄С-Нf

В.С. Красноруцкий, М.М. Белаш, А.М. Абдуллаев, О.І. Жуков, І.А. Петельгузов, М.О. Михайлов, О.О. Слабоспицка

Приведено варіанти конструкції поглинаючого елемента із комбінованим поглиначем В₄С-Нf для регулюючих органів реактора ВВЕР-1000 і результати вивчення поведінки їхніх макетів при перегрівих у середовищі водяної пари до температур в інтервалі 900...1200 °С. Як оболонки пелів використані сталь ЕІ 847 і сплав Е110. Описані результати матеріалознавчих досліджень оболонок і зварних з'єднань. Вивчено характер взаємодії матеріалу оболонок з порошком В₄С. Розрахунками встановлено, що ефективність поглинання нейтронів такими ПС СУЗ еквівалентна ефективності штатних зборок із поглиначем В₄С. Показано економічну доцільність застосування в реакторі ВВЕР-1000 ПС СУЗ, споряджених пелами з поглиначем В₄С-Нf.

DEVELOPMENT AND SOME EFFICIENCY CHARACTERISTICS OF ABSORBER ELEMENTS WITH В₄С-Hf ABSORBER

V.S. Krasnorutsky, M.M. Belash, A.M. Abdullaev, O.I. Zhukov, I.A. Petelguzov, M.O. Mykhaylov, O.O. Slabospitskaya

Different design of control rods (CR) with composite В₄С-Hf absorber for VVER-1000 and results of investigation of dummies CR behavior at overheating in water vapor environment at the temperature range of 900 to 1200 °C are presented. EI847 steel and E110 have been used alloy as CR cladding. Results of investigation of the material of cladding and welds are described. Interaction between cladding and В₄С powder has been studied. It has been established by calculations that the worth of such a rod control cluster assembly (RCCA) is equivalent to the worth of regular RCCA with В₄С absorber. Economic expediency of use of RCCA equipped with composite В₄С-Hf absorber has been shown.