

ГАФНИЙ - ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ДЛЯ ПЭЛОВ СУЗ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 АЭС УКРАИНЫ

А.А.Афанасьев, Ю.Ф.Конотоп**, Н.П.Одейчук***

**Министерство топлива и энергетики Украины, г. Киев, Украина,
afanasyev@min.energy.gov.ua, тел.: +38-044-228-47-81*

***Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
г. Харьков, Украина,
odeychuk@kipt.kharkov.ua, факс: + 38-0572-352-754, тел.: + 38-0572-356-004*

Рассмотрены ядерно-физические характеристики гафния как перспективного поглотителя для органов регулирования ядерных реакторов. Обсуждаются технологические аспекты получения гафния. Сделан анализ стоимости поглотителя и пэлов на основе гафния. Показано, что при использовании в пэлах СУЗ комбинированного поглотителя V_4C/Hf относительная стоимость изделий на основе гафния уменьшится примерно в два раза по сравнению со штатным изделием сб.2145.

Интерес к гафнию, как к поглощающему материалу органов регулирования (ОР) ядерных реакторов возник еще в период строительства первых атомных энергоблоков транспортного и коммерческого назначения. Расчетно-экспериментальными исследованиями было установлено, что ОР СУЗ на основе гафния обладают требуемым комплексом ядерно-физических характеристик и хорошими свойствами в водяном теплоносителе [1-3].

Тем не менее в период массового ввода в эксплуатацию атомных энергоблоков гафний не нашел какого-нибудь заметного применения из-за высокой стоимости и малых объемов производства. Как альтернатива гафнию был специально разработан тройной сплав на основе серебра (Ag 80 % -In 15 % -Cd 5 %), который широко используется в кластерных сборках СУЗ реакторов PWR [1-4]. Указанный сплав имеет сходную с гафнием физическую эффективность, но заметно уступает последнему по таким параметрам как температура плавления, наведенная активность, коррозионная стойкость в теплоносителе и др.

После аварий на ТМА и ЧАЭС заметно ужесточились требования к надежности ОР СУЗ. Одновременно во многих странах возрос объем НИР, направленных на поиск способов увеличения срока службы кластерныхборок СУЗ. В ходе многочисленных расчетно-экспериментальных исследований было установлено, что заметного прогресса в этом направлении можно достичь в случае использования в пэлах СУЗ реакторов с водой под давлением (PWR и ВВЭР) комбинированного β , α - β , γ - поглотителя [1,4-6]. Как результат, снова проявился повышенный интерес к гафнию, масштабы выпуска которого к этому временно уже были достаточными для удовлетворения потребностей атомной энергетики. Выше отмечалось, что по своим эксплуатационным характеристикам гафний заметно превосходит сплав на основе серебра. В частности, по причине низкой температуры плавления (~ 800 °С) тройной сплав на основе серебра никогда не рассматривался в качестве поглотителя ОР СУЗ реакторов ВВЭР-1000. В

последних, в случае потери теплоносителя, кратковременное (до 4-х с) повышение температуры в активной зоне может достигать 1150 °С [7].

В последнее десятилетие в Украине заметно возросло число публикаций, посвященных проблеме использования гафния в атомной энергетике. Особое внимание уделяется вопросам получения изделий из слитков гафния и изучения основных характеристик гафния после различных видов механо-термической обработки (МТО).

Остановимся несколько подробнее на основных характеристиках гафния. Гафний является представителем IV В-подгруппы периодической системы. Эту подгруппу называют подгруппой титана и в нее входят: титан, цирконий, гафний и искусственно полученный элемент Курчатовий.

Титан, цирконий и гафний по многим характеристикам весьма схожие элементы: они имеют одинаковую кристаллическую структуру и существуют в двух полиморфных видоизменениях α и β соответственно с ГПУ- и ОЦК- решетками; одинаковую конфигурацию электронных оболочек, причем их максимальная валентность равна четырем; высокую температуру плавления; весьма схожие химические свойства; высокую коррозионную стойкость по отношению к воздуху и воде. В свободном состоянии титан и его аналоги - типичные металлы, по внешнему виду похожие на сталь.

Для задач реакторостроения особый интерес представляют цирконий и гафний. Первый элемент имеет низкое сечение поглощения нейтронов (~ 0,18 б), что в сочетании с высокими значениями коррозионной стойкости в водяном теплоносителе и механической прочности при повышенной температуре делают цирконий и его сплавы основным конструкционным материалом активной зоны энергетических реакторов LWR и CANDU. Напротив, гафнию присуща высокая поглощающая способность (~ 105 б), вследствие чего он применяется в качестве поглощающего материала в пэлах СУЗ и может использоваться в различного рода защитных устройствах, например, экранах, предназначенных для сни-

жения нейтронной нагрузки на корпус реактора.

Гафний является редким металлом. Он не имеет собственных минералов и в природе обычно сопутствует цирконию: отношение Hf/Zr составляет 2...3

%. Вследствие этого производство гафния тесно связано с производством циркония и непрерывно росло по мере увеличения объемов выпуска циркония.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНА, ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ

Характеристика	Элемент		
	Ti	Zr	Hf
Атомный номер	22	40	72
Распространенность в природе, г/т			
Сечение поглощения тепловых нейтронов, δ	5,6±0,4	(180±4)·10 ⁻³	105±5
Число изотопов	5	5	6
Температура полиморфного превращения α -Hf → β -Hf (ГПУ→ОЦК), °С	882	862	1777
Плотность при 20°С, г/см ³	4,50	6,49	13,09
Температура плавления, °С	1665	1855	2225
Коэффициент термического расширения при 25°С, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	8,5	5,8	5,9
Теплоемкость при 25°С, Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	522	276	146
Электросопротивление при 25°С, мкм·Ом·см	48	44	35
Энтальпия образования, ккал/моль:			
окислов	-247,8	-261,5	-270
хлоридов	-179	-230	-255
нитридов	-73	-82	-88
карбидов	-54	-44	-44
Модуль Юнга при 20 °С, МПа	108000	98000	140000
Модуль сдвига при 20 °С, МПа	40600	36500	54200
Коэффициент Пуассона при 20 °С	0,33	0,35	0,29
Предел прочности (τ_b) при 20 °С, (мин./макс.), МПа	300/1400	250/550	400/750
Предел текучести (τ_s) при 20 °С, (мин./макс.), МПа	200/1300	100/400	220/650
Удельная прочность при 20 °С, (τ_b /плотность), 10 ³ м	4,5...29	1,5...6,2	1,7...5

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОТОПОВ ГАФНИЯ

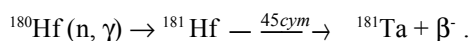
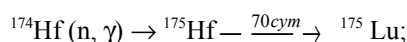
Изотопы	Содержание в природном элементе, %	Сечение поглощения нейтронов, δ	Реакция	Вклад в общее сечение поглощения	Резонансный интеграл
¹⁷⁴ Hf	0,16	400±50	¹⁷⁴ Hf(n,γ) ¹⁷⁵ Hf	0,6	
¹⁷⁶ Hf	5,16	15±5	¹⁷⁶ Hf(n,γ) ¹⁷⁷ Hf	0,8	~ 900
¹⁷⁷ Hf	18,39	380±30	¹⁷⁷ Hf(n,γ) ¹⁷⁸ Hf	68,3	8090±1800
¹⁷⁸ Hf	27,24	80±10	¹⁷⁸ Hf(n,γ) ¹⁷⁹ Hf	21,8	1610±300
¹⁷⁹ Hf	13,59	70±15	¹⁷⁹ Hf(n,γ) ¹⁸⁰ Hf	9,5	500±200
¹⁸⁰ Hf	35,46	10±2	¹⁸⁰ Hf(n,γ) ¹⁸¹ Hf	3,5	~ 18

Основные физические характеристики титана, циркония и гафния приведены в табл. 1 [8,9].

В ней приведены данные по титану для сравнения с цирконием и гафнием, поскольку применение первого из названных элементов в активной зоне теплового реактора ограничено из-за сравнительно высокого сечения поглощения нейтронов (~ 6 б). Титан широко используется в авиации, космической технике и химической промышленности.

Гафний относится к числу **п,γ**-поглотителей. Природный гафний состоит из шести стабильных изотопов, каждый из которых имеет достаточно высокое сечение поглощения нейтронов (табл.2) [8-10].

Важными для гафния являются две реакции, связанные с накоплением трансмутантов - лютеция и тантала:



Физическая эффективность гафния характеризуется не только достаточно высоким сечением поглощения нейтронов, но и способностью поглощать нейтроны высоких энергий: он имеет семь сильных резонансов, которые лежат в энергетическом интервале 1...10 эВ (см. табл. 2 и рисунок 1 [2]). Особенно сильные резонансы у гафния расположены при энергиях 1,2; 2,38 и 7,80 эВ.

Применительно к активной зоне ВВЭР-1000 относительная физическая эффективность гафния составляет ~ 80 % от эффективности В₄С [11]. При увеличении диаметра гафниевого наконечника до 8,2 мм (т.е. в случае использования в пэлах гафния без защитной оболочки) эффективность пэла достигает 98,9 % от штатного на основе В₄С при длине гафниевого наконечника 1 м [3].

Чрезвычайно важным является то обстоятельство, что образующиеся при облучении новые изотопы хорошо поглощают нейтроны (см.табл.2).

Продукты распада изотопов гафния - лютеций и тантал - также имеют достаточно высокие сечения поглощения нейтронов: ¹⁷⁵Lu - (35±15) б; ¹⁷⁶Lu - (4000±800) б; ¹⁸¹Ta - (21,3±1,0) б; ¹⁸²Ta - (1700±2000) б [9]. Эти факторы обеспечивают сохранение (точнее - слабое снижение) физической эффективности пэлов СУЗ на основе гафния в процессе их эксплуатации в реакторе.

В Украине повышенный интерес к гафнию обусловлен, по крайней мере, двумя причинами. Как уже отмечалось, кардинального увеличения срока службы и надежности кластерных сборок СУЗ реакторов ВВЭР-1000 можно достичь в случае замены в нижней части пэлов распухающего **п,α** - поглотителя на нераспухающий **п,γ** - поглотитель. В качестве последнего в реакторах ВВЭР-1000 в опытно-промышленном масштабе используется Dy₂O₃·TiO₂, а в опытном масштабе - гафний [5,6,11,12]. По своей эффективности и характеру ее изменения в процессе облучения в условиях активной зоны ВВЭР-1000 титанат диспрозия и гафний являются практически идентичными поглотителями [11,13]. В такой ситуации при выборе поглотителя на первый план выдвигаются вопросы стоимости и доступности. На сегодняшний день стоимость гафния оценивается на уровне \$350USA/кг, а при увеличении объемов производства цена гафния может снизиться до \$200 USA/кг; стоимость титаната диспрозия составляет примерно 100 \$/кг [3,14].

Поскольку производство гафния тесно связано с циркониевым производством, то запасы и объемы производства гафния известны на сегодняшний день и достаточно хорошо прогнозируемые на ближайшее будущее. Важно, что гафния вполне достаточно для удовлетворения потребностей большой атомной энергетики в качестве **п,γ**-поглотителя для ОР СУЗ. Ситуация с титанатом диспрозия менее определена, особенно для Украины. По этой причине для нашей страны, располагающей большими запасами циркониевой руды и собственной промышленной базой по выпуску циркония и гафния, а также комплектующих на их основе для твэлов, пэлов и ТВС, выгодно использовать в пэлах СУЗ ВВЭР-1000 в качестве **п,γ**-поглотителя гафний, а не другие менее доступные поглотители [12,15].

В настоящее время в Украине гафний выпускается на предприятии ГНПП "Цирконий". Его технология получения базируется на восстановлении тетрафторида гафния кальцием [15,16]. Черновые слитки гафния диаметром 500 мм после кальциетермического восстановления подвергаются двойному электронно-лучевому переплаву (ЭЛП) и получают слитки диаметром 150 мм и длиной до 1 м. Кальциетермический гафний украинского производства имеет марку ГФЭ и по химическому составу практически не отличается от йодидного гафния марки ГФИ,

производимого в России [3,15]. Содержание примесей в гафнии ГФЭ соответствует ТУ У 14312708.183-95; содержание кислорода в нем менее 0,05 мас. %.

Размер зерна в слитках Ø 150 мм неоднороден по высоте и сечению и колеблется в интервале 7...45 мкм. С целью уменьшения разноразмерности слитков

и дополнительного рафинирования от кислорода указанные слитки подвергали ЭЛП в кристаллизаторе Ø 90 мм. Полученные слитки имели зерно от 5 до 15 мкм, содержание кислорода составляло 0,04 мас. %, твердость слитков в исходном состоянии находилась на уровне 2050 МПа [16].

ТАБЛИЦА 3

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАФНИЯ ПОСЛЕ ЭЛП

Характеристика	Температура испытаний, °С			
	20	950	1130	1150
Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	$\frac{245}{200 - 290}$	$\frac{450}{430 - 470}$	290	270
Предел прочности (σ_b), МПа	$\frac{250}{200 - 300}$	$\frac{480}{430 - 530}$	370	330
Относительное удлинение (δ), %	$\frac{1,5}{0,5 - 2,5}$	$\frac{30}{25 - 35}$	33,5	32

Примечание. Числитель - среднее значение; знаменатель - разброс значений.

Таблица 4

СТОИМОСТЬ ПОГЛОЩАЮЩЕГО СЕРДЕЧНИКА В ПЭЛАХ

Материал поглотителя	Диаметр сердечника, мм	Длина сердечника, см	Объем сердечника, см ³	Вес сердечника, г	Стоимость, \$
V ₄ C _{ест}	7,0	371	142,705	249,734	4,99 ^{1*}
V ₄ C _{ест}	7,2	360	146,500	256,375	5,13
V ₄ C _{ест}	7,2	330	134,292	235,010	4,70
Dy ₂ ·TiO ₅	7,2	30	12,208	62,506	6,25 ^{2*}
Hf	7,1	30	11,872	155,517	69,98 ^{3*}
Hf	8,2 ^{4*}	30	15,835	207,439	93,35 ^{3*}

1* - стоимость порошка V₄C равна 20 \$/кг [14];

2* - стоимость порошка Dy₂·TiO₅ равна 100 \$/кг [14];

3* - стоимость прутков из гафния 450 \$/кг;

4* - для варианта использования гафния без оболочки.

Таблица 5

СВОДНЫЕ ДАННЫЕ О СТОИМОСТИ ПОГЛОТИТЕЛЯ ПЭЛОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОР СУЗ

Конструкция пэла	Поглотитель в нижней части пэла	Стоимость сердечника пэла, \$	Стоимость пэла, \$/шт.	Относительная стоимость пэла, %	Относительная стоимость сердечника, %	Стоимость ОР СУЗ*, \$/шт	Относительная стоимость ОР СУЗ %	Срок службы ОР СУЗ, лет	Относительная удельная стоимость, %	
									пэла	ОР СУЗ
Сб.2145	V ₄ C _{ест} (Ø7,0 мм)	4,99	977,8**	100	0,5	22000**	100	2 AP 5 A3	100	100
Типа Сб.2145	V ₄ C _{ест} (Ø7,2 мм)	5,3	980,0	100,3	0,5	22040	100,2	2 AP 5 A3	100,3	100,2
Сб.2173	Dy ₂ ·TiO ₅ (Ø7,2 мм)	10,95	1005,4	102,8	1,1	22497	102,3	3 AP 10 A3	55,1	54,8
Сб.2179	Hf (Ø7,2 мм)	74,68	1069,1	109,3	7,0	23644	107,5	3 AP 10 A3	58,6	57,6
Типа Сб.2179	Hf (Ø8,2 мм)	98,05	1092,5	111,7	9,0	24065	109,4	3 AP 10 A3	59,9	58,6

* - стоимость ОР СУЗ определяли как 18C_i + 4400, где C_i - текущая стоимость пэла i-й конструкции;

** - база для сравнения.

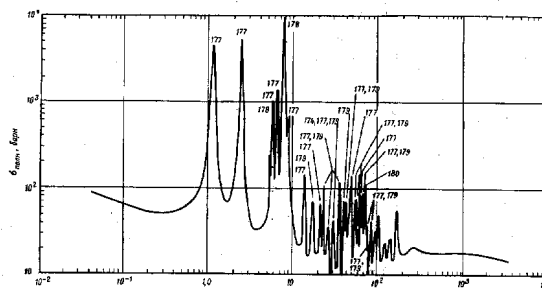
Механические свойства гафния ГФЭ-1 в исходном состоянии при комнатной и повышенных тем-

пературах представлены в табл.3 [17]. На стадии технологического передела слитков диаметром 80...90 мм в прутки диаметром ≤ 9 мм возможно применение различных видов механо-термической обработки (ковка, выдавливание, холодная прокатка, волочение и др.). В частности, в ГТИ прутки гафния получают путем последовательного горячего прессования исходных заготовок без применения промежуточных термических обработок [18]. В ННЦ ХФТИ предпочтение отдается технологии радиального обжаривания и свободной ковке прутков [17]. Структура, механические свойства и особенно текстура получаемых прутков сильно зависят от вида применяемой обработки. В свою очередь, текстура влияет на характер радиационного формоизменения гафния: в зависимости от текстуры и условий облучения в широких пределах может изменяться деформация радиационного роста. Наблюдаемый в работе [19] значительный радиационный рост (более 3 %) образцов гафния марки ГФЭ-1, по-видимому, обусловлен большой анизотропией исходных образцов. Поэтому до широкомасштабного внедрения гафния в пэлы СУЗ ВВЭР-1000 предстоит оптимизировать технологическую схему и параметры механо-термической обработки с целью получения заготовок изделий с требуемым комплексом свойств в сочетании с хорошими экономическими показателями процесса получения заготовок и изделий. Окончательный выбор технологической схемы получения гафниевых прутков или труб можно будет сделать на основе анализа результатов реакторных испытаний образцов и экспериментальных пэлов.

Проведем оценку стоимости пэлов СУЗ ВВЭР-1000 различного конструктивного исполнения. В настоящее время серийная кластерная сборка СУЗ, состоящая из 18 пэлов сб.2145, стоит 22000 \$. С учетом 20 % затрат на изготовление комплектующих и сборку ОР СУЗ один серийный пэл стоит 977,8 \$. За базу для сравнения возьмем модифицированный пэл сб.2145 с поглотителем из виброуплотненного порошка $V_4C_{ест.}$, но заключенного в оболочку $\varnothing 8,2 \times 0,5$ мм из сплава ЭП-630У (а не в оболочку $\varnothing 8,2 \times 0,6$ мм из стали 06X18H10T). Стоимость модифицированного пэла может быть выше стоимости сб.2145 как за счет более высокой стоимости оболочки ЭП-630У, так и большей загрузки в пэл порошка V_4C . При цене последнего 20 \$/кг [14] поглощающая часть пэла подорожает на $\sim 0,14$ \$; изменение стоимости в результате замены оболочек неизвестно, но не должно быть слишком большим. Поэтому примем, что стоимость модифицированного пэла сб.2145 составляет 980 \$.

При замене в нижней части модифицированного пэла части порошка $V_4C_{ест.}$ на длине 300 мм на n, γ -поглотители - порошок $Dy_2 \cdot TiO_5$ или прутки $\varnothing 7,1$ мм ($\varnothing 8,2$ мм) из Hf - увеличение стоимости пэлов будет происходить по двум причинам. Во-первых, появляются новые (дополнительные) технологические операции, связанные с засыпкой порошка $Dy_2 \cdot TiO_5$ или закладкой (креплением) прутков Hf, установкой новой разделительной сетки на границе раздела V_4C - $Dy_2 \cdot TiO_5$ или V_4C -Hf, контролем вставок и

др. Во-вторых, используемые n, γ -поглотители заметно дороже $V_4C_{ест.}$



Полное сечение поглощения нейтронов гафнием в резонансной области энергий [1]

В табл.4 приведена оценка стоимости различных видов поглощающих сердечников пэлов. Увеличение стоимости пэлов только за счет появления дополнительных технологических операций примем равным 2 %.

В табл.5 приведена оценка стоимости пэлов разных конструкций и кластеров СУЗ на их основе. Как видно, стоимость поглощающей составляющей пэлов незначительна, особенно в серийных пэлах сб.2145.

При использовании n, γ -поглотителей стоимость пэлов/ОР СУЗ несколько возрастет: от 2,3 до 11,7 %. Однако, это повышение стоимости изделий заведомо компенсируется в случае увеличения их срока службы до 3-х лет в режиме АР и 10 лет в режиме АЗ. Вследствие уменьшения требуемого количества ОР СУЗ на всю кампанию реактора снизятся также и затраты на последующее обращение с отработавшими изделиями.

Полученные в настоящей работе значения относительной удельной стоимости пэлов СУЗ новых конструкций согласуются с данными других исследователей [14].

С экономической точки зрения пэлы сб.2173 и сб.2179 следует рассматривать как равнозначные, но, как отмечалось выше, для Украины гафний является легкодоступным поглотителем.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.H.W. Keller, J.M. Ballenberger, D.A. Hollein, C. Hott. Development of hafnium and comparison with other pressurized water reactor control rod materials. // *Nuclear Technology*. 1982, v. 59, № 3, p. 476-482.
- 2.Поглощающие материалы для регулирования ядерных реакторов. (Сокращенный перевод с англ.)/ Под ред. Б.Г.Арабея и В.В.Чекунова. М.: "Атомиздат", 1965.
- 3.В.Д. Рисованный, Е.П. Клочков, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993.
- 4.L. Heins, A. Roppelt, P. Dewes. Design of control rods for pressurized water reactors with special consideration of absorber swelling and clad czeepdown. // *Advances in control assembly materials for water reactors (Proceeding of a Technical Committee meeting held in Vienna, 29 November - 2 December 1993) IAEA, Vienna, 1995 (IAEA - TECDOC - 813)*, p. 15-36.
- 5.Gosset D., Kryger B. Boron and hafnium base absorbers for advanced PWR control rods. // *Ibid*, p. 49-

59.

6.В.Б. Пономаренко, А.О. Пославский, В.И. Ряховских и др. Комбинированные поглощающие элементы реакторов типа ВВЭР-1000, БПБР, ВВЭР-500 (600) с повышенным сроком службы. // *Третья Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению*. Димитровград, 27-30 октября 1992 г./Сборник докладов/ Димитровград: НИИАР, 1994, т.2, с.157-166.

7.V.M. Chernyshov, V.M. Troyanov. Lessons learned from control rods irradiation experience, development of advanced absorbers and their refractory properties under accident conditions// *International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance*. Portland, Oregon. March 2-6, 1997.

8.Tricot R. The metallurgy and functional properties of hafnium. // *J Nucl. Mater.* 1992, v. 189, p. 277-288.

9.Физико-химические свойства элементов: Справочник / Под ред. Г.В.Самсонова. Киев, 1965.

10.R.A. Murgatroyd, B.T. Kelly. Technology and assessment of neutron absorbing materials//*Atomic Energy Review*. 1977, v. 151, p. 3-74.

11.V.M. Chernishov, I.N. Vasilchenko. Control members of WWER-440 and WWER-1000 power reactors // *Advances in control assembly materials for water reactors (Proceeding of a Technical Committee meeting held in Vienna, 29 November - 2 December 1993) IAEA, Vienna, 1995 (IAEA - TECDOC - 813)*, p. 105-119.

12.А.А. Афанасьев, В.С. Красноруцкий, И.М. Неключдов. Поглощающие элементы на основе комбинированного поглотителя В₄С/Нf для украинских АЭС. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 1999, вып. 3 (75), с. 85-90.

13.V.D. Risovaniy, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov et al. Dysprosium and hafnium based absorbers for advanced WWER control rods // *Control Assembly Materials for Water Reactors: Experience, Performance and Perspectives. Preceedings of a Technical Committee Meeting held in Vienna, 12-15 October 1998, IAEA, Vienna, 2000 (IAEA - TECDOC - 1132)*. P.91-102.

14.О.В. Бочаров, А.В. Ватулин, А.Д. Никулин и др.

О целесообразности применения гафния в органах управления атомных реакторов различного назначения // *Сборник докладов пятой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. Т.1.Ч.2. Димитровград, 1998, с. 194-198.

15.Ю.Ф. Коровин, В.Г. Чуприненко, К.А. Линдт и др. Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 1994, вып. 2 (62), 3 (63), с. 114-124.

16.К.В. Ковтун, П.Н. Вьюгов, А.П. Мухачев, А.А. Афанасьев. Изучение свойств кальциетермического гафния. // *Вопросы атомной науки и техники. Труды конференции: Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. 14-19 июня 1999 г., г. Алушта, Крым.* Харьков: 1999 г. С. 115-117.

17.Г.И. Волокита, В.С. Красноруцкий, Э.А. Резниченко и др. Разработка опытной технологии изготовления прутков из гафния для пэлов. // *Сборник докладов пятой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. Т.1.Ч.2. Димитровград, 1998, с.59-60.

18.В.С. Вахрушева, Н.В. Ярошенко. Влияние технологических параметров производства на структурообразование и свойства прутков из гафния. // *Сборник докладов пятой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. Т.1.Ч.2. Димитровград, 1998, с. 64.

19.Е.Е. Варлашова, В.Д. Рисованный, Е.П. Клочков и др. Размерная и структурная стабильность образцов гафния маркиГФЭ-1, облученных до высоких повреждающих доз.// *Сборник докладов пятой Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. Т1.Ч.2. Димитровград, 1998, с. 143-153.

