

- ционного твердения с металлическими расплавами. — Огнеупоры, 1995, № 11, с. 2—7.
3. **Акопов Ф.А., Бородин Т.И., Вильяно Г.Е. и др.** Взаимодействие металлических компонентов расплава активной зоны реактора с диоксидциркониевой керамикой. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 6, с. 454—458.
 4. **Бешта С.В., Витоль С.А., Крушинов Е.В. и др.** Исследование взаимодействия расплава корнума с перспективными материалами ловушки расплава. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР», т. 2. Обнинск, 1995, с. 184.
 5. **Акопов Ф.А., Акопян А.А., Барыкин Б.М. и др.** Взаимодействие компонентов расплава с диоксидциркониевой керамикой. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 4, с. 318—322.
 6. **Акопов Ф.А., Акопян А.А., Барыкин Б.М. и др.** Поведение диоксидциркониевой керамики плазменного напыления при термохимическом воздействии на нее компонентов расплава активной зоны. — Там же, т. 85, вып. 2, с. 115—119.
 7. **Farmer M., Spencer B., Binder J.** Status and future direction of the melt attack and coolability experiments (MACE) program at Argonne National Laboratory. — In: 9th Intern. Conf. on Nuclear Engineering ICONE 9. Nice, France, 8—12 Apr., 2001, ICONE 9696, p. 1—4.
 8. **Nitheanandan T.** Development of Molten Corium Using an Exothermic Chemical Reaction for the MFMI Studies at Chalk River Laboratories. ICAPP, Pittsburgh, 2004.
 9. **Mwamba K., Piluso P., Eyries D. e.a.** Self-propagating high-temperature synthesis of a nuclear reactor core melt for safety experiments. — In: VIII Intern. Symp. Self-Propagating High-Temperature Synthesis SHS2005. Cagliari, Italy, 2005, p. 75—79.
 10. **Жданов В.С.** Взаимодействие расплава активной зоны с материалами реакторной установки в проблеме тяжелой аварии ВВЭР. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Санкт-Петербург, Политехнический ун-т, 2008.
 11. **Датчики** теплофизических и механических параметров. Справочник. Т. 1. М.: Радиотехника, 1998.
 12. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
 13. **Минеев В.Н., Боровкова Л.Б., Акопов Ф.А. и др.** Внешняя ловушка из керамики и бетона на основе диоксида циркония. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 2, с. 119—125.

Поступила в Редакцию 5.04.11

УДК 669.295+669.296+669.297

ВЫСОКОЧИСТЫЕ ТИТАН, ЦИРКОНИЙ И ГАФНИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

*Коцарь М.Л., Лавриков С.А., Никонов В.И. (ОАО «ВНИИХТ», г. Москва),
Александров А.В., Ахтонов С.Г. (ОАО ЧМЗ, г. Глазов), Александров А.В. (ЗАО МГА «Титан», г. Москва)*

В настоящее время созданы предпосылки для внедрения высокоэффективных топливных циклов на действующих АЭС с ВВЭР. Внедрение таких циклов сопровождается увеличением длительности эксплуатации, повышением выгорания топлива и паросодержания теплоносителя, ростом температуры оболочек и напряжений в них. Ресурс и безопасность ядерных реакторов определяют конструкционные материалы. В ядерной энергетике в качестве конструкционных и поглощающих материалов реакторов на медленных нейтронах широко применяются титан, цирконий, гафний и сплавы на их основе.

Титан и его сплавы используются в трубах теплообменного оборудования ВВЭР и РБМК (ВТ1-00, ВТ1-0, ПТ-1М, ПТ-7М), парогенераторов ВВЭР-1000 (ВТ1-0) и транспортных реакторов (ПТ-7М), питающих трубах и коллекторах транспортных установок (ПТ-7М), деталях внутреннего насыщения трубных систем транспортных установок (ВТ1-0, 3М, ПТ-3В), лопатках турбоустановок (ПТ-3В, ВТ-6). Сплав титана с

20% циркония (РК-20) является перспективным материалом для изготовления корпусов ВВЭР. Химический состав сплавов титана, применяемых в энергетическом оборудовании ЯЭУ, приведен в табл. 1.

Выход из строя титановых изделий энергетического оборудования АЭС происходит в том числе из-за трещинообразования вследствие гидрирования (наводороживания) титана и его сплавов при достижении массовой доли водорода ~0,06% (атомной доли водорода ~2,8% или массовой доли TiH_2 1,5%). Наличие водорода уже в слитках титана при массовой доле более $6 \cdot 10^{-3}\%$ (атомной доле 0,284%) может приводить к образованию гидридных прослоек по границам зерен и потере пластичности [3].

Одна из причин ускоренного гидрирования титана и его сплавов заключается в недостаточно чистой основе титана и использовании легирующих добавок (V, Mn, Mo), способствующих интенсификации этого процесса. В соответствии с ГОСТом 19807—91 массовая доля примесей в

Таблица 1. Химический состав деформируемых сплавов на основе титана для энергетического оборудования, массовая доля, %

Элемент	BT1-00	BT1-0	ПТ-1М	ПТ-7М	3М	BT5-1	ПТ-3В	ОТ4	ОТ4-1В	5В	BT6
			Состав								
			0,5Al 0,3Zr	2,2Al 2,5Zr	4,5Al	5Al 2,5Sn	4Al 2V	4Al 1,5Mn	3Al 2V	5,5Al 1,5V 1,5Mo 0,1Zr	6Al 4,5V
Легирующие:											
алюминий	—	—	0,2—0,7	1,8—2,5	—	4,3—6,0	3,5—5,0	3,5—5,0	~3	4,7—6,3	5,3—6,8
ванадий	—	—	—	—	—	1,0	1,2—2,5	—	~2	1,0—1,9	3,5—5,3
марганец	—	—	—	—	—	—	—	0,8—2,0	—	—	—
молибден	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7—2,0	—
олово	—	—	—	—	—	2,0—3,0	—	—	—	—	—
цирконий	—	—	0,30	2,0—3,0	—	0,30	0,30	0,30	—	0,1	0,30
Сумма			0,5—1,0	3,8—5,5	4,5	7,6—10,3	5,0—7,8	4,6—7,3	~5	7,4—10,3	9,1—12,4
Примеси:											
азот	0,04	0,04	—	0,04	—	0,05	0,04	0,05	—	0,04	0,05
водород	0,008	0,010	—	0,006	—	0,015	0,006	0,012	—	0,008	0,015
железо	0,15	0,25	—	0,25	—	0,30	0,25	0,30	—	0,25	0,60
кислород	0,10	0,20	—	0,15	—	0,15	0,15	0,15	—	0,13	0,20
кремний	0,08	0,10	—	0,12	—	0,12	0,12	0,12	—	0,12	0,10
углерод	0,05	0,07	—	0,10	—	0,10	0,10	0,10	—	0,06— 0,014	0,10
Прочие	0,10	0,30	—	0,30	—	0,30	0,30	0,30	—	0,30	0,30
Сумма	0,528	0,97	~1	0,966	~1	1,032	0,966	1,032	~1	0,948	1,465
Титан*	99,47	99,03	~98,5— 98	95,23— 93,53	~94,5	91,37— 88,67	94,03— 91,23	94,37— 91,67	~94	91,65— 88,75	88,44— 86,14
[Al] _{экв}	0,8	1,2	1,5	3,6	5,5	6,8	5,0	5,0	4	6,5	7,0
[Mo] _{экв}	0,49**	0,77**	0,8**	0,8**	0,8**	1,65**	1,4	2,5	1,4 (1,8)	2,4	3,2
[Al] _{экв} + [Mo] _{экв}	1,3	2,0	2,3	4,4	6,3	8,5	6,4	7,5	5,4 (5,8)	8,9	10,2
Тип сплава			α-Сплав				Псевдо α-сплав				(α + β)- Сплав

*Массовая доля рассчитана как разница между 100% и суммой легирующих элементов и примесей.

**Рассчитано по формуле $[Mo]_{\text{экв}} = \% Fe/0,4 + \% (Si + \text{прочие примеси})/0,7 + \% V/1,4$.

нелегированном титане марок BT1-00 и BT1-0 может достигать, %: азот 0,04, водород 0,008 и 0,01, железо 0,15 и 0,25, кислород 0,1 и 0,2, кремний 0,08 и 0,10, углерод 0,05 и 0,07 соответственно (см. табл. 1). Содержание водорода в титане возрастает с увеличением массы примесей [4]. Между содержанием кислорода (стабилизатор α-Ti) и водорода (стабилизатор β-Ti) в титане существует взаимосвязь, заключающаяся в замедлении диффузии водорода внутрь металла через поверхностную оксидную пленку и обогащенный кислородом альфированный слой.

Сплавы на основе титана различных марок, разработанные, главным образом, для нужд авиационной и судостроительной промышленности, легируют алюминием (α-стабилизатор), ванадием, марганцем, молибденом (β-стабилизаторы), оловом и цирконием (нейтральные упрочнители) в разных соотношениях. Действие стабилизаторов α- и β-фаз выражается через алюминиевый и молибденовый эквиваленты, которые определяются по формулам [2]

$$[Al]_{\text{экв}} = \% Al + \% Sn/3 + \% Zr/6 + 10[\% O + \% C + 2(\% N)];$$

$$[\text{Mo}]_{\text{экв}} = \% \text{Mo} + \% \text{Ta}/4 + \% \text{Nb}/3,3 + \% \text{W}/2 + \\ + \% \text{V}/1,4 + \% \text{Cr}/0,6 + \% \text{Mn}/0,6 + \% \text{Fe}/0,4 + \\ + \% \text{Ni}/0,8.$$

Для α -сплавов, содержащих примеси железа, кремния и легированных ванадием, молибденовый эквивалент можно оценить по формуле

$$[\text{Mo}]_{\text{экв}} = \% \text{Fe}/0,4 + \\ + \% (\text{Si} + \text{прочие примеси})/0,7 + \% \text{V}/1,4.$$

Железо и часть из перечисленных легирующих элементов (V, Mn, Mo) являются стабилизаторами β -фазы титана, растворимость водорода в которой гораздо больше, чем в α -титане [5, 6], и образуют с ним интерметаллические соединения. TiFe, в частности, является аккумулятором водорода [7] и стабильным катализатором процессов гидрирования в водной среде [8]. Многокомпонентные сплавы систем Ti(Zr)—V—Mn со структурой фаз Лавеса сорбируют водород и также образуют гидриды [9]. Металлогидридные соединения становятся источниками дефектов и трещин в титане и его сплавах.

Для увеличения водородостойкости титана и его сплавов для ядерной энергетики, а также качества сверхпроводящего сплава НТ-47 для ИТЭРа необходимо повышать требования к чистоте шихтовых материалов за счет использования губчатого титана повышенной чистоты и (или) иодидного титана. Вакуумный переплав позволяет уменьшить массовую долю водорода в титане до 10^{-4} [3]. Требуемые прочность и пластичность сплавов при этом могут быть достигнуты за счет легирования α -стабилизаторами (Al, O) и нейтральными упрочнителями (Zr, Sn и др.). Зависимость среднего предела прочности $\sigma_{\text{в ср}}$ и относительного удлинения $\delta_{\text{ср}}$ титановых сплавов [2] от суммы алюминиевого и молибденового эквивалентов описывается линейными уравнениями с коэффициентами корреляции 0,98 и 0,83 соответственно:

$$\sigma_{\text{в ср}} (\text{МПа}) = (65,09 \pm 4,02)([\text{Al}]_{\text{экв}} + [\text{Mo}]_{\text{экв}}) + \\ + (308,49 \pm 25,7);$$

$$\delta_{\text{ср}} (\%) = -(1,083 \pm 0,218)([\text{Al}]_{\text{экв}} + [\text{Mo}]_{\text{экв}}) + \\ + (19,125 \pm 1,36).$$

Метод иодидного рафинирования позволяет в промышленных условиях, используя в качестве сырья отходы и обороты производства, очищать титан от азота, водорода, кислорода, углерода и других примесей [10—13]. Химический состав иодидного титана приведен в табл. 2.

Массовая доля β -стабилизирующих элементов — водорода, железа, кремния, марганца, меди, никеля и хрома в иодидном титане невелика и составляет 0,0001, 0,0014, <0,0008, <0,001, <0,001, 0,009 и 0,0009% соответственно. Содержание α -стабилизаторов — алюминия и азота в нем не превышает 0,002%, кислорода и углерода — 0,01%. Интегральная чистота иодидного титана превосходит 99,95%.

Иодидный титан в качестве компонента шихт для выплавки α -титановых сплавов снижает массовую долю β -стабилизирующих элементов и молибденовый эквивалент в них. Это, в свою очередь, позволит увеличить срок службы титановых изделий за счет уменьшения нижней границы диапазона допустимого содержания водорода и снижения их наводороживания. Одновременно это также будет способствовать повышению конкурентоспособности иодидного титана в производстве особо ответственных изделий из титановых сплавов для ядерной энергетики.

Большинство примесей негативно влияют на характеристики циркониевых изделий — микроструктуру, пористость, вязкость разрушения, остаточную пластичность в условиях проектных аварий с потерей теплоносителя [14]. Высокочистый цирконий, полученный методом иодидного рафинирования в промышленных условиях [13], используют в качестве компонента шихт при выплавке сплавов реакторного назначения. Фактическая концентрация большинства примесей в нем (азота, алюминия, железа, кислорода, кальция, кремния, марганца, меди, никеля, олова, титана, углерода и хрома) в 2,5—10 раз ниже требований технических условий ТУ 95.46—97 (см. табл. 2). Шихта при выплавке сплавов марок Э-110, -125, -635 на основе электролитического порошка циркония для твэлов и ТВС ВВЭР-1000 и РБМК-1000 содержит до 35% иодидного циркония. В качестве базовых сплавов на основе магнетермической губки для оболочек твэлов и деталей ТВС в проектах АЭС-2006 и ТВС-PWR рассматривают оптимизированные сплавы Э-110 (базовый материал для оболочек твэлов) и Э-125 (перспективный материал оболочек твэлов PWR и труб технологических каналов РБМК) [15]. Стабильное содержание кислорода и железа в них 800 и 400—450 млн⁻¹ соответственно достигается за счет введения в шихту особо чистого иодидного циркония по

Т а б л и ц а 2. Химический состав и микротвердость иодидных титана, циркония и гафния [12, 13], массовая доля, %

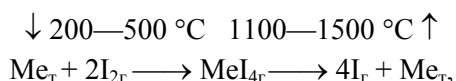
Элемент	Иодидный титан		Иодидный цирконий		Иодидный гафний	
	Ц-40, Г-20	ТУ 48-4-282—86, марка ТИ-1	Ц-40	ТУ 95.46—97	Г-20	ГОСТ 22517—77, марка ГФИ-1
		Не более		Не более		Не более
Азот	0,0018	—	<0,002	0,005	<0,002	0,005
Алюминий	0,0018	0,005	0,001	0,005	<0,003	0,005
Бериллий	—	—	0,0003	0,001	—	—
Бор	—	—	<0,00003	0,00005	—	—
Водород	0,0001	—	—	—	<0,0008	—
Гафний	—	—	0,03	0,05(0,01*)	>99,94 (без Zr)	>99,86 (без Zr)
Железо	0,0014	0,005	0,004	0,03	<0,007	0,04
Кадмий	—	—	0,00003	0,00005	—	—
Кальций	—	—	0,00032	0,02	<0,003	0,01
Кислород	<0,01	—	0,007	0,05	<0,007	—
Кремний	<0,0008	0,009	0,002	0,008	<0,003	0,005
Литий	—	—	0,0001	0,0002	—	—
Магний	<0,001	0,004	—	—	<0,003	0,004
Марганец	<0,001	0,004	0,0003	0,001	<0,0003	0,0005
Медь	<0,001	—	0,0003	0,003	—	—
Молибден	—	—	0,003	0,005	<0,003	0,1
Никель	0,0088	0,005	0,004	0,01	<0,003	0,05
Ниобий	—	—	<0,006	0,01	<0,006	—
Олово	—	—	0,0013	0,05	—	—
Свинец	—	—	0,003	0,005	—	—
Титан	>99,96	>99,95	0,002	0,005	<0,003	0,005
Углерод	0,009	0,01	0,003	0,008	<0,006	0,01
Хром	0,00085	0,005	<0,003	0,02	<0,003	0,003
Цирконий	—	—	>99,93	>99,7	<1	1,0
Число примесей	12	8	21	21	16	13
Сумма примесей	<0,0376	≤0,047	<0,0644	≤0,2863	<0,0531	≤0,1375 (без Zr и Mo)
Микротвердость, МПа	1090—1178	—	1080—1444	—	1757—1934	—

*Марка особо чистый (осч).

ТУ 95.46—97 с содержанием гафния не более 0,01% (100 млн⁻¹).

Металлический гафний используют в ядерной энергетике в виде пластин кассет автоматического регулирования и компенсации в ВВЭР-440 [16]. При выплавке слитков на основе электролитического порошка в шихту вводят до 50% иодидного гафния.

Основой процесса иодидного рафинирования рассматриваемых металлов (Ti, Zr, Hf) является химическая транспортная реакция [10]



где т — твердое, г — газ, протекающая в замкнутом объеме в двух различных температурных зонах. Иодидное рафинирование обеспечивает глубокую очистку титана, циркония и гафния от примесей и позволяет получать металлы в форме компактных прутков, удобной для последующей переработки, и снижает их активность к воздействию внешних факторов.

Сочетание необходимых условий очистки в замкнутых аппаратах, установленных на основе термодинамического механизма переноса металлических примесей в процессе иодидного рафинирования циркония [17], не всегда достижимо на практике, поэтому в каждом конкретном случае и аппарате поведение примесей в процессе иодидного рафинирования может быть различным. Экспериментально установлена линейная зависимость коэффициентов очистки ($K_{\text{оч}} = C_{\text{пр.исх}}/C_{\text{пр.кон}}$) в кварцевых аппаратах от содержания примесей в исходных цирконии и гафнии ($C_{\text{пр.исх}}$):

$$K_{\text{оч}} = a (C_{\text{пр.исх}} - C_{\text{пр.мин}}) + 1; \quad (1)$$

$$\lg K_{\text{оч}} = a \lg C_{\text{пр.исх}} + b, \quad (2)$$

где a, b — коэффициенты, постоянные для каждой из исследованных примесей [18, 19]. Уравнение (1) характеризует очистку циркония от примесей до минимальной концентрации ($C_{\text{пр.мин}}$), при которой $K_{\text{оч}} = 1$. Уравнение (2) описывает экспериментальные данные в более широком интервале концентрации примесей, включая массовую долю никеля 11,5%. Наиболее полная очистка титана, циркония и гафния от примесей достигается после трехкратного иодидного рафинирования. Сумма примесей в прутках от второго к третьему рафинированию изменяется гораздо меньше, чем от первого к второму, рафинирующий эффект проявляется в росте отношения удельного электросопротивления при 298 и 4,2 К ($\gamma = \rho_{298\text{К}}/\rho_{4,2\text{К}}$) от 140 до 190, от 165 до 198 и от 21 до 33 для титана, циркония и гафния соответственно [11, 20].

В промышленных условиях иодидное рафинирование осуществляют в металлических аппаратах, изготовленных из хромоникелевого сплава марки ХН78Т [12, 13, 21, 22]. В аппарате Ц-40 [21], применяемом для иодидного рафинирования оборотов металлического циркония, его сплавов с ниобием и титана, сырье в виде стружки располагается вдоль стенок реторты и центральной части аппарата. Зигзагообразная нить для осаждения металла подвешивается в кольцевом зазоре между центральной частью и стенкой реторты, ее диаметр составляет 4—5 мм. Температура нити во время процесса до 1250 °С.

Гафний и титан получают в аппаратах Г-20 полочного типа [12, 13, 22]. Это позволяет использовать сырье в форме как стружки, так компактной (таблетки, куски, крупка, обрезки листо-

вого материала). В аппарате располагаются четыре нити в виде шпилек из проволоки диаметром ~4 мм. В центральную часть аппарата сырье не загружают. Температура нити во время процесса до 1350 °С. Такая конструкция позволяет получать прутки иодидных гафния и титана диаметром 17—22 мм.

Необходимая температура сырья в аппаратах регулируется и поддерживается с помощью системы воздушного охлаждения. Перед иодидным рафинированием сырье, загруженное в аппараты, подвергают дегазации. При получении гафния и титана в аппарате Г-20 эта операция проводится дважды. Фактическое содержание суммы примесей в прутках всех металлов (см. табл. 2) в 2—4 раза ниже технических требований, содержание индивидуальных примесей, как правило, соответствует пределу обнаружения методик. Микротвердость по сечению прутков титана, циркония и гафния изменяется в пределах 1090—1178, 1080—1444 и 1757—1934 МПа соответственно [12, 13].

Таким образом, качество и стабильность состава сплавов на основе титана, циркония и гафния для ядерной энергетики повышаются при использовании при их выплавке высокочистых металлов, полученных методом иодидного рафинирования. Способ иодидного рафинирования позволяет применять в качестве сырья отходы и обороты производства титана, циркония и гафния и получать из них высокочистые металлы многоцелевого назначения, включая компоненты шихт для выплавки сплавов ядерной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титан и сплавы титановые деформируемые. ГОСТ 19807—91. М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИС—МАТИ, 2009.
3. Минакова А.В., Минаков В.Н., Минаков Н.В. К вопросу о влиянии водорода в слитках титана технической чистоты на пластичность. Тезисы докл. Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Кацивели, 2—8 сентября 1997 г., с. 87.
4. Шаповалова Е.М., Бабенко Е.П. Гидридообразование в титановых порошках разного способа производства. — В сб.: IX Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов». Севастополь, 5—11 сентября 2005 г. Киев, 2005, с. 238—239.
5. Левинский Ю.В. Диаграммы состояния металлов с газами. М.: Металлургия, 1975, с. 116—122.

6. Коган Я.Д., Колачев Б.А., Левинский Ю.В. и др. Константы взаимодействия металлов с газами. М.: Металлургия, 1987, с. 48—50.
7. Лашкарев Г.В., Бродовой А.В., Солонин С.М., Колесниченко В.Г. Влияние гидрирования на магнитные свойства интерметаллида TiFe. Тезисы докл. Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Казивели, 2—8 сентября 1995 г., с. 25.
8. Соломина Т.А., Рахметов Е.Б., Ибрашева Р.Х., Жубанов К.А. Катализ на гидридах интерметаллидов в воде. — Там же, с. 107.
9. Безуглая Т.Н., Митрохин С.В., Вербецкий В.Н. Взаимодействие водорода со сплавами систем Ti(Zr)—Mn—V. — В сб.: VII Межд. конф. «Водородное материаловедение и химия гидридов металлов». Алушта, 16—22 сентября 2001, с. 243.
10. Ролстен Р.Ф. Иодидные металлы и иодиды металлов. Пер. с англ. Под ред. А.И. Беляева, В.Н. Вигдоровича. М.: Металлургия, 1967.
11. Елютин А.В., Денисова Н.Д., Баскова А.П., Быстрова О.П. Поведение примесей при получении высокочистого титана методом иодидного рафинирования. — Научные труды Гиредмета, 1981, т. 106, с. 3—9.
12. Коцарь М.Л., Антипов В.В., Ахтонов С.Г. и др. Титан высокой чистоты. Перспективы применения и получения. — Титан, 2009, № 3(25), с. 34—38.
13. Коцарь М.Л., Моренко О.Г., Штуца М.Г. и др. Получение высокочистых титана, циркония и гафния методом иодидного рафинирования в промышленных условиях. — Неорганические материалы, 2010, т. 46, № 3, с. 332—340.
14. Никулина А.В., Мальгин А.Г. Примеси и их влияние на структуру и свойства циркониевых изделий ядерных реакторов. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 5, с. 258—266.
15. Маркелов В.А. Совершенствование состава и структуры сплавов циркония в обеспечение работоспособности твэлов, ТВС и труб давления активных зон водоохлаждаемых реакторов с увеличенным ресурсом и выгоранием топлива. Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. М., ВНИИНМ, 2010.
16. Шиков А.К., Бочаров О.В., Аржакова В.М. и др. Применение гафния для органов регулирования ядерных реакторов и энергетических установок. — Металловедение и термическая обработка металлов, 2003, № 8, с. 20—23.
17. Евстюхин А.И., Леонтьев Г.А., Шулов В.А. Исследование механизмов переноса металлических примесей при иодидном рафинировании циркония. — В сб.: Совершенствование по вопросам получения и исследования свойств чистых металлов. Харьков, 1977, с. 13—16.
18. Коцарь М.Л., Никонов В.И., Федоров В.Д. и др. Иодидное рафинирование кальциетермического циркония. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 2002, вып. 6, с. 100—105.
19. Евстюхин А.И., Леонтьев Г.А., Коцарь М.Л. и др. Очистка от примесей в процессе иодидного рафинирования гафния и его сплавов с никелем. Конструкционные материалы в атомной технике. — В сб.: Научные труды МИФИ. М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 15—24.
20. Елютин А.В., Денисова Н.Д., Баскова А.П., Быстрова О.П. Поведение примесей в процессе иодидного рафинирования циркония и гафния. — Научные труды Гиредмета, 1980, т. 96, с. 63—69.
21. Моисеев В.Г., Моренко О.Г., Погадаев В.А. и др. Аппарат для иодидного рафинирования циркония Пат. 2261287 РФ, МПК C22B34/14, C22B9/10. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2005, № 27, с. 377.
22. Александров А.В., Антипов В.В., Зиганшин А.Г. и др. Аппарат для иодидного рафинирования гафния. Пат. 2353687 РФ, МПК C22B34/14, C22B9/00. — Там же, 2009, № 12, с. 866.

Поступила в Редакцию 12.04.11

УДК 621.039.526

ВЛИЯНИЕ БИБЛИОТЕКИ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ НА РАСЧЕТ НУКЛИДНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

Выход продуктов деления является одним из важных исходных данных в расчете нуклидного состава облучаемого топлива. Расчет состава облученного топлива для разных уровней выгорания является базовой задачей при анализе радиационной безопасности объектов с отработавшими ТВС. Повышение точности прогнозирования радиационных параметров становится особенно актуальным для новых видов топлива этапов подготовки необходимой базы ядерных данных для расчета выгорания с применением

и при исследовании замкнутых топливных циклов с использованием рециклированного топлива.

Надежность прецизионных нейтронно-физических расчетов во многом зависит от согласованного использования ядерных данных и вычислительных методов на всех этапах расчета. Формирование библиотеки выхода продуктов деления является одним из обязательных кодов MONTEBURNS—MCNP5—ORIGEN2. Методика подготовки библиотеки выхода