

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДОВ РАДИОАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 2600 МэВ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ВОЛЬФРАМОМ

Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, В.Ф. Батяев, А.Б. Колдобский,
В.М. Живун, Р.Д. Муламбетов, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко
Институт теоретической и экспериментальной физики, г. Москва

Р

Выполнены измерения выходов радиоактивных продуктов взаимодействия протонов с энергией 2600 МэВ с тонкой мишенью из естественного вольфрама. Измерения производились методом прямой γ -спектрометрии образцов, облученных на ускорителе У-10 ИТЭФ. Всего в эксперименте было определено 129 значений, из которых 10 независимых, 9 независимых метастабильных состояний, 6 суммарных независимых метастабильных и основных состояний и 104 кумулятивных выходов радиоактивных продуктов реакций. Полученные данные сравнены с результатами расчетов выходов, выполненных с использованием 7 расчетных программ: SEM95, SEM2k, LANET, CASCADE, HETC, INUCL, YIELDX. Результаты анализируются с точки зрения возможности образования вторичных продуктов реакций, представляющих потенциальную экологическую и технологическую опасность.

ВВЕДЕНИЕ

По мнению ведущих мировых экспертов к числу перспективных ядерных технологий ближайшего будущего относится электроядерный метод [1, 2]. Он сочетает в себе высокую степень ядерной безопасности с широкими технологическими возможностями, в том числе с пригодностью для реализации трансмутации радиоактивных отходов [3-5]. Это открывает принципиальные возможности решения важнейшей задачи ядерной энергетики – избавление от накапливаемой техногенной радиоактивности. Хорошо известно, что именно эта проблема становится в настоящее время ключевой при оценке перспектив развития ядерной энергетики.

Создание электроядерных установок (ЭЛЯУ) базируется на объединении трех технологий:

- химическое разделение компонентов радиоактивных материалов;
- получение высокоэнергетических пучков протонов большой мощности;
- реакторная технология с существенным расширением области энергий в сторону их увеличения для создания комплекса «мишенное устройство-бланкет».

© Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, В.Ф. Батяев, А.Б. Колдобский,
В.М. Живун, Р.Д. Муламбетов, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко, 2001

Мишенное устройство (МУ) является одним из основных узлов любой ЭЛЯУ. В нем под действием протонного пучка высокоточного ускорителя происходит процесс множественной генерации нейтронов, используемых затем для развития и управления цепной реакции в бланкете ЭЛЯУ.

В качестве основного функционального материала МУ во многих концептуальных проектах ЭЛЯУ рассматривается вольфрам [6,7], обладающий рядом важных (в рассматриваемом контексте) преимуществ. Он имеет высокую плотность, достаточно технологичен, у него отсутствуют химическая активность и биологическая токсичность (свойственные, например, свинцу и ртути). Это и делает актуальным накопление и анализ ядерных данных для вольфрама, необходимых для проектных и эксплуатационных оценок важнейших рабочих параметров МУ ЭЛЯУ, и обуславливает вопрос о необходимости учета образующихся вторичных продуктов реакций, которые могут представлять собой потенциальную радиобиологическую, технологическую и экологическую опасность.

Сложность протекания физических процессов в МУ и многообразие их возможных конструкций заставляет предположить, что основными методами при их проектировании станут расчетно-теоретические с применением разветвленных многофункциональных расчетных программ, реализующих определенные физические модели протекания процессов в МУ. Следует, однако, отметить, что к настоящему времени программы такого рода часто не обладают прогностическими возможностями оценки ядерных констант с необходимой для решения практических задач конструирования ЭЛЯУ точностью.

Таким образом, накопление ядерно-физических данных для вольфрама при его облучении протонами имеет большое значение как для тестирования и совершенствования расчетных программ, так и для использования в качестве самостоятельных ядерных констант. При этом важнейшими данными такого рода являются сечения образования вторичных нуклидов или их выходы. Работы подобного рода выполняются в ведущих лабораториях мира [8], что безусловно повышает достоверность экспериментальных результатов.

ОБЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Облучение экспериментальных образцов ^{nat}W с целью определения выходов радиоактивных продуктов реакции (РПР) при энергии протонов 2600 МэВ производилось на пучке, выводимом из синхротрона ИТЭФ У-10 при помощи системы медленного вывода. Схема вывода показана на рис.1.

Сформированный пучок имеет следующие параметры: форма – эллипс с осями $\sim 25 \times 15$ мм, интенсивность – $\sim 2 \times 10^{11}$ протон/имп., частота следования ~ 16 имп./мин, длительность одного импульса ~ 0.5 с.

В исследованиях использовались экспериментальные образцы из металлической вольфрамовой фольги естественного изотопного содержания: ^{180}W – 0.13%, ^{182}W – 26.3%, ^{183}W – 14.3%, ^{184}W – 30.67%, ^{186}W – 28.6% [9]. Поскольку измерения выполнялись относительным методом, одновременно с образцами вольфрама облучались мониторы, выполненные из алюминиевой фольги. Выбор алюминия в качестве монитора в данном эксперименте обусловлен целым рядом причин. Он является моноизотопным элементом, может быть получен с высокой химической чистотой, весьма технологичен, и, что наиболее важно, энергетическая зависимость реакции $^{27}Al(p,x)^{22}Na$ с образованием ^{22}Na достаточно хорошо изучена [10].

После изготовления экспериментальные образцы и мониторы взвешивались на аналитических весах Sartorius BP-61 и “заваривались” вместе с тонкой алюминиевой прокладкой между ними в полиэтиленовые пакетики для облучения.

При облучении сборка в виде “сэндвича” (экспериментальный образец, алюминий-

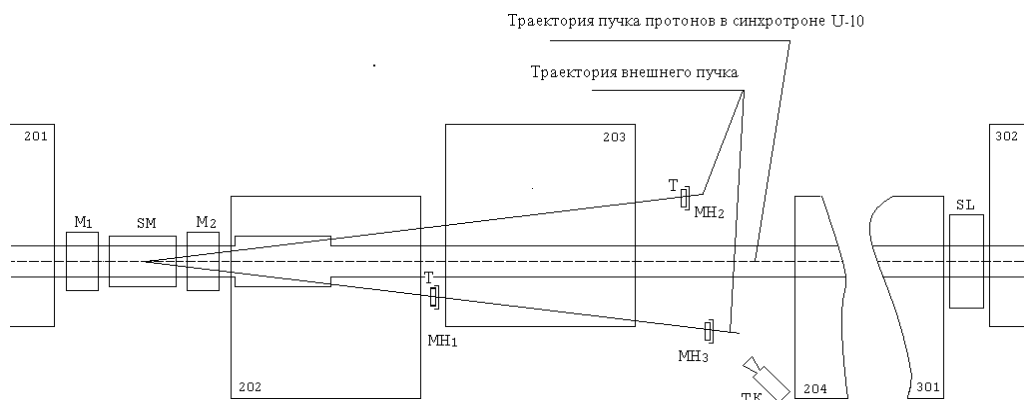


Рис. 1. Схема вывода внешнего протонного пучка с энергией 800 – 2600 МэВ: 201, 202,...,302 – магнитные блоки протонного синхротрона U-10; M_1 , M_2 – корректирующие магниты; SM – септум-магнит; SL – магнитная линза; MH_1 , MH_2 , MH_3 – мишени для наблюдения за выведенным пучком; ТК – телевизионная система для наблюдения за выведенным пучком; Т – экспериментальный образец

вая прокладка и монитор) устанавливались перпендикулярно пучку. Диаметры экспериментального образца и стандарта были идентичны и равны 10.5 мм, их толщины 31.43 мг/см² и 114.67 мг/см² соответственно. Время облучения “сэндвича” равнялось 30 мин, при этом флюенс протонов с энергией 2600 МэВ составлял $5.4 \cdot 10^{13}$ р/см².

После облучения экспериментальный образец и монитор перепаковывались повторно в герметичные полиэтиленовые пакетики для того, чтобы предотвратить потери возможных газообразных продуктов реакций и избежать радиоактивного загрязнения.

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Измерения выполнялись методом прямой γ -спектрометрии облученных образцов без их предварительной химической сепарации. В эксперименте использовался спектрометр стандартной архитектуры, в состав которого входили HPGe-детектор GC 2518, модуль 1510 (АЦП, усилитель, блок высокого напряжения) и мастер-плата S – 100, которая в составе IBM PC эмулирует многоканальный анализатор. Энергетическое разрешение установки составляло 1.8 кэВ по γ -линии 1332.5 кэВ ^{60}Co . Детектор был откалиброван для 8 расстояний «источник – детектор» от 40 мм до 375 мм с использованием стандартного набора ОСГИ № 9402. Выбор расстояния осуществлялся исходя из допустимой загрузки спектрометрического тракта.

Длительность отдельного измерения варьировалась от 5 минут (непосредственно после облучения) до трех суток. Измерения облученного образца продолжались в течение 6 месяцев. Это позволило идентифицировать и исследовать РПР в широком интервале периодов полураспада от 12.6 мин. (^{157}Ho) до 1.87 г. (^{172}Hf)

Обработка спектров излучения выполнялась по программе GENIE 2000, которая использовалась как в пакетном, так и в интерактивном режимах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Подробно методика экспериментального определения выходов РПР изложена в авторских работах [11,12].

При двухзвенной цепочке распада генетически связанных РПР ($N_1 \rightarrow N_2$) формулы для вычисления кумулятивного и независимого выходов РПР выглядят следующим образом:

$$\sigma_1^{cum} = \frac{A_0}{\eta_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot F_1 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (1)$$

$$\sigma_1^{cum} = \frac{A_1}{v_1 \cdot \eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot F_1 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (2)$$

$$\sigma_2^{ind} = \left(\frac{A_2}{F_2} + \frac{A_1 \cdot \lambda_1}{F_1 \cdot \lambda_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (3)$$

$$\sigma_2^{cum} = \sigma_2^{ind} + v_1 \cdot \sigma_1^{cum} = \left(\frac{A_1}{F_1} + \frac{A_2}{F_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot N_{Na}} \cdot \frac{N_{Al}}{N_T} \cdot \frac{F_{Na}}{\lambda_{Na}} \cdot \sigma_{st}, \quad (4)$$

где N_1, N_2 – число образовавшихся ядер-продуктов; σ_1^{cum} – кумулятивный выход первого нуклида (или независимый в случае отсутствия предшественников); σ_2^{cum} – кумулятивный выход второго нуклида; σ_2^{ind} – независимый выход второго нуклида; λ_1, λ_2 – постоянные распада; v_1, v_2 – вероятность перехода нуклида N_1 в нуклид N_2 , т.е. коэффициент ветвления; N_T – число ядер $\frac{A_M T}{Z_M}$ в экспериментальном образце; η_1, η_2 – абсолютные квантовые выходы γ -линий; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – эффективность регистрации спектрометра при энергиях γ -линий E_1 и E_2 ; τ – длительность одного протонного импульса; T – период следования импульсов; A_1, A_2 – коэффициенты, определяемые МНК-фитированием экспериментальных точек; F_i – временные функции, вычисляемые из выражения

$$F_i = \left(1 - e^{-\lambda_i \tau} \right) \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_i k T}}{1 - e^{-\lambda_i T}} \text{ при значениях } i = 1, 2, Na. \quad (5)$$

Очевидно, что значения выходов, полученные по формулам (1) и (2), идентичны, но обычно в окончательных результатах приводится значение, полученное из выражения (1), т.к. в этом случае надежность его определения выше.

Погрешности $\Delta \sigma_i$ независимых и кумулятивных выходов РПР, вычисленные с использованием формул (1)-(4), определялись с использованием формул переноса ошибок. Поскольку во многих случаях для определения выходов использовалась не одна, а несколько принадлежащих каждому из РПР γ -линий, значения выходов были получены усреднением нескольких величин ($\sigma_i \pm \Delta \sigma_i$), вычисленных по различным γ -линиям

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot W_i}{\sum_i W_i}, \quad (6)$$

где

$$W_i = \frac{1}{\Delta \sigma_i^2}. \quad (7)$$

Погрешность $\Delta \bar{\sigma}$ (без учета погрешности мониторингирования) вычислялась по формулам

$$\Delta \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (\bar{\sigma} - \sigma_i)^2}{(n-1) \cdot \sum_i W_i}}, \quad (8)$$

$$\Delta\sigma^{\overline{=}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i w_i}}, \quad (9)$$

Для вычисления полной погрешности из значений, полученных по формулам (8)

и (9) выбиралось максимальное значение $\Delta\sigma^{\overline{=}} = \max(\Delta\sigma^{\overline{-}}, \Delta\sigma^{\overline{=}})$.

В этом случае формула для ее вычисления имеет вид

$$\frac{\Delta\sigma^{\overline{=}}}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma^{\overline{=}}}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_{st}}{\sigma_{st}}\right)^2}. \quad (10)$$

Как показывает анализ, основной вклад в полную погрешность значений выходов РПР, определяемую соотношением (10), вносят неопределенности значений ядерных данных - абсолютных квантовых выходов и сечений мониторинговых реакций.

Формула (10) является окончательным соотношением, определяющим погрешности измеренных значений выходов РПР. Для различных РПР их значения находятся в диапазоне $\cong(10-25)\%$.

Соотношения (1) – (9) реализованы в авторской программе SIGMA [12], использующей базу данных PCNUDAT [13]. Конечным результатом работы этой программы являются значения выходов РПР и их погрешности.

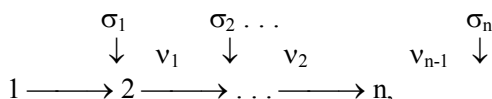
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований по определению выходов продуктов реакций в ^{nat}W , облученном протонами с энергией 2.6 ГэВ, представлены в табл. 1. Всего представлено 129 значений выходов, из которых 10 независимых (i), 9 независимых выходов метастабильных состояний $i(\Sigma m_j)$ (если такое состояние одно, индекс суммы отсутствует), 6 суммарных независимых выходов метастабильных и основных состояний $i(\Sigma m_j + g)$ и 104 кумулятивных (c).

Помимо экспериментальных результатов в табл. 1 представлены значения выходов РПР, полученных расчетным путем с использованием программ CEM95 [14], CEM2k [15], LANET [16], CASCADE [17], HETC [18], INUCL [19], YIELDX [20].

При сравнении расчетных и экспериментальных значений выходов РПР принималось во внимание, что расчетное моделирование по любой программе позволяет получить только независимые выходы, в то время как в эксперименте в большинстве случаев определяются значения кумулятивных выходов. Поэтому процедура сравнения должна включать методику вычисления кумулятивных выходов на основе расчетных значений независимых выходов предшественников рассматриваемого нуклида по цепочкам распада.

Именно, если цепочку образования n радиоактивных ядер представить в виде



то расчетное значение кумулятивного выхода последнего n -го нуклида может быть вычислено как

$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{i=1}^{n-1} (\sigma_i^{ind} \prod_{j=i}^{n-2} v_j). \quad (11)$$

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные сечения выходов радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом

РПР	T _{1/2}	Тип	Эксп. выход (мбарн)	Расчетные выходы (мбарн)						YIELDX
				CEM95	CEM2k	LAHET	CASCADE	HETC	INUCL	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
¹⁸¹ Re	19.9h	i	3.51 ± 0.58	0.632	1.01	2.96	1.54	3.10	0.754	1.43
¹⁷⁷ W	135m	c	13.0 ± 1.6	6.64	7.73	11.2	7.97	13.6	10.4	23.6
¹⁷⁶ W	2.5h	c	7.86 ± 2.51	6.67	6.94	11.0	8.79	13.2	10.9	22.3
¹⁸⁴ Ta	8.7h	c	4.39 ± 0.44	4.17	1.29	5.07	7.11	1.12	8.27	3.74
¹⁸³ Ta	5.1d	c	10.4 ± 1.0	16.1	7.07	17.4	18.1	44.0	20.5	7.35
¹⁸² Ta	114.43d	c	12.8 ± 1.3	--	--	--	--	--	--	--
^{176m1} Ta	2.36h	i(m1+m2)	7.98 ± 1.34	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷⁶ Ta	8.09h	c	29.3 ± 3.4	13.8	13.5	19.3	15.2	20.5	24.4	38.0
¹⁷⁵ Ta	10.5h	c	25.7 ± 2.8	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷⁴ Ta	1.14h	c	25.5 ± 2.8	10.5	11.6	15.1	14.4	17.7	19.7	36.6
¹⁷³ Ta	3.14h	c	23.9 ± 3.2	--	--	--	--	--	--	--
¹⁸¹ Hf	42.39d	c	1.24 ± 0.12	1.92	0.272	1.83	3.57	2.34	2.35	0.398
^{180m} Hf	5.5h	i(m)	0.688 ± 0.085	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷⁵ Hf	70d	c	33.0 ± 3.0	18.1	16.6	21.5	19.0	22.8	32.5	54.6
¹⁷³ Hf	23.6h	c	29.5 ± 2.5	16.3	15.8	18.1	18.8	21.1	30.1	53.8
¹⁷³ Hf	23.6h	i	5.52 ± 2.43	6.63	5.24	4.13	5.26	3.70	11.5	15.9
¹⁷² Hf	1.87y	c	21.7 ± 2.1	15.2	13.6	17.3	21.0	21.3	31.9	51.5
¹⁷¹ Hf	12.1h	c	19.4 ± 2.4	13.9	13.2	14.9	20.1	19.6	27.7	39.3
¹⁷⁰ Hf	16.01h	c	19.4 ± 4.0	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷³ Lu	1.37y	c	33.4 ± 3.3	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷² Lu	6.70d	i(m1+m2+g)	3.68 ± 0.5	3.00	2.10	3.09	1.66	1.01	4.59	3.47
¹⁷² Lu	6.70d	c	25.5 ± 2.4	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷¹ Lu	8.24d	i(m+g)	10.7 ± 2.0	4.42	2.56	3.93	3.17	1.63	7.20	5.13
¹⁷¹ Lu	8.24d	c	29.7 ± 2.5	--	--	--	--	--	--	--
¹⁷⁰ Lu	2.012d	c	24.5 ± 2.2	17.8	15.0	17.8	23.3	19.8	34.7	28.5
¹⁶⁹ Lu	34.06h	c	21.9 ± 1.8	--	--	--	--	--	--	--
¹⁶⁷ Lu	51.5m	c	23.1 ± 2.5	--	--	--	--	--	--	--
¹⁶⁸ Yb	32.026d	c	27.4 ± 2.5	18.9	15.5	17.9	23.8	21.1	35.5	26.0
¹⁶⁷ Yb	17.5m	c	24.6 ± 2.9	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
¹⁶⁶ Yb	56.7h	c	24.3 ± 2.1	--	--	--	--	--	--	--
¹⁶² Yb	18.87m	c	18.6 ± 3.3	9.37	10.2	10.9	21.0	19.3	23.6	15.2
¹⁶⁷ Tm	9.25d	c	28.9 ± 6.0	20.1	15.3	16.2	24.0	18.1	34.2	25.1
¹⁶⁸ Tm	7.70h	c	26.9 ± 2.4	19.3	16.0	18.6	26.7	20.1	36.5	27.7
¹⁶⁸ Tm	7.70h	i	2.34 ± 0.45	2.20	1.24	1.06	1.13	0.150	1.59	2.37
¹⁶⁵ Tm	30.06h	c	26.8 ± 2.5	18.9	14.7	16.1	24.0	17.8	33.4	27.4
¹⁶³ Tm	1.810h	c	26.0 ± 3.3	--	--	--	--	--	--	--
¹⁶¹ Tm	33m	c	20.8 ± 2.5	--	--	--	--	--	--	--
¹⁶¹ Er	3.21h	c	24.0 ± 2.5	17.3	14.4	11.8	23.5	18.9	25.1	36.2
¹⁶⁰ Er	28.58h	c	23.6 ± 2.2	16.6	14.1	14.4	25.1	18.7	26.8	34.8
¹⁵⁸ Er	36m	c	25.0 ± 3.8	18.0	15.6	13.9	27.5	24.2	28.7	30.6
¹⁵⁷ Er	18.65m	c	20.2 ± 3.5	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵⁶ Er	19.5m	c	15.7 ± 2.4	--	--	--	--	--	--	--
^{160m} Ho	5.02h	c	24.6 ± 2.3	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵⁷ Ho	12.6m	c	21.8 ± 4.0	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵⁶ Ho	56m	c	19.4 ± 1.8	14.1	13.4	11.7	22.2	16.2	21.6	22.8
¹⁵⁷ Dy	8.14h	c	23.9 ± 2.3	18.6	13.9	12.8	22.2	17.5	23.1	28.4
¹⁵⁵ Dy	9.9h	c	21.9 ± 1.9	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵³ Dy	6.4h	c	13.9 ± 1.9	11.9	9.56	7.96	13.3	1.93	15.9	17.5
¹⁵² Dy	2.38h	c	15.4 ± 1.3	11.4	8.96	8.37	12.9	4.10	16.5	15.3
¹⁵⁵ Tb	5.32d	c	22.4 ± 1.9	16.3	11.2	11.4	16.5	0.366	19.8	26.1
¹⁵³ Tb	2.34d	c	18.7 ± 1.8	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵² Tb	17.5h	c	16.1 ± 1.4	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵¹ Tb	17.609h	c	16.5 ± 1.4	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵⁰ Tb	3.48h	c	9.23 ± 1.23	--	--	--	--	--	--	--
¹⁴⁸ Tb	4.118h	c	6.77 ± 0.63	--	--	--	--	--	--	--
¹⁴⁷ Tb	1.7h	c	2.13 ± 0.33	--	--	--	--	--	--	--
¹⁵³ Gd	240.4d	c	26.7 ± 2.6	15.5	11.1	9.76	15.0	1.93	19.2	22.8
¹⁵¹ Gd	124d	c	18.8 ± 2.2	16.7	12.0	11.0	17.9	13.5	19.7	19.1
¹⁴⁹ Gd	9.28d	c	20.2 ± 1.7	--	--	--	--	--	--	--
¹⁴⁷ Gd	38.06h	c	18.4 ± 1.6	--	--	--	--	--	--	--
¹⁴⁶ Gd	48.27d	c	18.6 ± 1.6	16.9	14.6	8.46	24.6	18.5	19.3	12.0
¹⁴⁵ Gd	23.0m	c	12.7 ± 1.5	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
^{130m} Nd	5.5h	i(m)	2.84 ± 0.49	--	--	--	--	--	--	--
¹³⁹ Ce	137.640d	c	19.6 ± 1.7	22.3	14.8	12.6	20.8	17.8	16.0	10.6
¹³⁵ Ce	17.7h	c	17.6 ± 1.5	20.4	14.0	8.92	18.5	17.4	14.6	7.74
¹³⁴ Ce	3.16d	c	17.7 ± 1.8	19.6	14.1	9.76	20.5	16.0	13.3	8.01
¹³⁵ Ce	4.9h	i	3.77 ± 0.39	--	--	--	--	--	--	--
¹³² Ce	3.51h	c	16.1 ± 2.7	15.0	13.0	9.68	17.1	17.3	10.8	7.48
¹³² La	4.8h	c	14.3 ± 1.7	--	--	--	--	--	--	--
¹³³ Ba	3848.9d	c	18.2 ± 4.1	21.6	14.1	9.79	18.2	16.4	13.2	7.97
¹³¹ Ba	11.50d	c	16.0 ± 1.3	20.5	14.1	10.9	17.6	16.1	13.0	7.31
¹²⁸ Ba	2.43d	c	15.4 ± 1.5	16.5	13.5	11.3	16.0	15.8	9.73	6.58
¹²⁶ Ba	100m	c	7.86 ± 1.12	10.8	11.6	1.52	10.4	0.043	5.95	4.07
¹²⁹ Cs	32.06h	c	18.6 ± 1.7	20.8	14.1	10.6	15.4	19.4	11.9	6.72
¹²⁷ Xe	36.4d	c	15.2 ± 1.3	19.8	13.6	12.0	16.0	18.5	11.4	5.35
¹²⁵ Xe	16.9h	c	14.1 ± 1.2	19.0	13.1	10.9	13.9	18.2	8.98	3.64
¹²³ Xe	2.08h	c	15.5 ± 1.3	15.4	12.3	6.61	10.8	18.2	6.24	5.64
¹²² Xe	20.1h	c	11.6 ± 1.0	13.0	11.5	3.58	11.1	14.1	5.57	6.00
^{121m} Te	154d	i(m)	0.449 ± 0.072	--	--	--	--	--	--	--
¹²¹ Te	19.16d	c	10.8 ± 1.0	--	--	--	--	--	--	--
^{119m} Te	4.70d	c	1.94 ± 0.17	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁹ Te	16.05h	c	9.06 ± 0.76	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁷ Te	62m	c	8.71 ± 0.79	10.1	9.42	7.40	8.18	14.2	3.57	2.29
^{118m} Sb	5.00h	i(m)	1.07 ± 0.22	--	--	--	--	--	--	--
¹¹⁵ Sb	32.1m	c	9.74 ± 0.89	10.8	11.6	10.6	6.41	16.7	3.03	3.15
¹¹³ Sn	115.09d	c	7.35 ± 0.64	--	--	--	--	--	--	--
¹¹¹ In	2.8047d	c	7.33 ± 0.63	10.0	9.22	9.98	8.19	14.7	3.09	3.02
¹¹⁰ In	4.9h	i	3.25 ± 0.30	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁹ In	4.2h	c	5.06 ± 0.44	7.06	7.77	5.55	5.04	13.8	1.64	2.27
^{106m} Ag	8.28d	i(m)	1.68 ± 0.16	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁵ Ag	41.29d	c	5.27 ± 0.69	5.73	6.95	10.1	4.29	11.9	0.994	2.90
¹⁰⁰ Pd	3.63d	c	1.18 ± 0.26	1.21	3.40	3.15	2.14	8.73	0.240	0.754
¹⁰⁰ Rh	20.8h	i(m+g)	2.53 ± 0.30	--	--	--	--	--	--	--
¹⁰⁰ Rh	20.8h	c	3.74 ± 0.48	--	--	--	--	--	--	--
^{99m} Rh	4.7h	c	2.38 ± 0.29	--	--	--	--	--	--	--

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
⁹⁶ Tc	4.28d	i(m+g)	1.71 ± 0.20	--	--	--	--	--	--	--
^{93m} Mo	6.85h	i(m)	1.59 ± 0.14	--	--	--	--	--	--	--
⁹⁰ Nb	14.60h	c	2.55 ± 0.23	0.748	2.23	5.00	0.497	3.33	0.103	4.28
⁸⁹ Zr	78.41h	c	3.42 ± 0.29	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁸ Zr	83.4d	c	2.53 ± 0.27	0.351	1.41	9.45	1.49	2.28	0.103	14.0
⁸⁸ Y	106.65d	i(m+g)	1.54 ± 0.22	0.213	0.812	3.98	0.651	--	--	2.64
⁸⁸ Y	106.65d	c	3.45 ± 0.34	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁷ Y	79.8h	c	4.08 ± 0.35	--	--	--	--	--	--	--
⁸⁵ Sr	64.84d	c	3.76 ± 0.39	--	--	--	--	--	--	--
⁸³ Sr	32.41h	c	1.94 ± 0.92	0.122	0.65	6.47	0.960	0.645	0.240	9.18
⁸⁴ Rb	32.77d	i(m+g)	1.29 ± 0.14	--	0.211	2.00	0.806	--	--	1.38
⁸³ Rb	86.2d	c	3.30 ± 0.58	0.213	0.941	11.5	2.33	0.645	0.257	13.0
^{82m} Rb	6.472h	i(m)	1.87 ± 0.17	--	--	--	--	--	--	--
⁷¹ Kr	74.4m	c	1.69 ± 0.18	--	0.145	2.51	0.326	0.172	0.189	2.56
⁷⁵ Se	119.779d	c	2.35 ± 0.22	0.057	0.247	6.03	2.47	0.022	0.240	10.9
⁷³ Se	7.15h	c	1.06 ± 0.12	--	--	--	--	--	--	--
⁷⁴ As	17.77d	i	1.37 ± 0.16	--	0.044	1.87	1.08	--	0.017	2.34
^{68m} Zn	13.76h	i(m)	0.416 ± 0.039	--	--	--	--	--	--	--
⁵⁹ Fe	44.472d	c	0.845 ± 0.103	--	--	0.033	0.326	--	--	0.842
⁵⁴ Mn	312.11d	i	2.48 ± 0.41	--	0.004	0.661	0.446	--	0.034	5.61
⁵¹ Cr	27.7025d	c	4.48 ± 1.34	--	--	0.264	0.84	--	0.103	3.92
⁴⁸ V	15.9735d	c	0.551 ± 0.060	--	--	0.066	0.051	--	0.034	1.48
⁴⁸ Sc	43.67h	i	0.66 ± 0.088	--	--	0.066	0.086	--	--	0.442
⁴³ K	22.3h	c	0.673 ± 0.081	--	--	0.033	0.326	--	--	0.982
²⁵ Mg	20.915h	c	0.899 ± 0.087	--	--	--	0.017	--	--	0.622
²⁴ Na	14.9590h	c	4.04 ± 0.34	--	--	0.099	0.069	--	--	1.92
⁷ Be	53.29d	i	8.61 ± 1.01	--	--	--	--	--	--	3.45

Значения коэффициентов ветвления ядерных цепочек были взяты из работы [21].

Очевидно, что такой подход несколько сужает объем расчетной информации по выходам РПР, которая может быть использована при проведении сравнения экспериментальных и расчетных значений. Всего для сравнения использовались экспериментальные и расчетные выходы 75 РПР, а для остальных 54 РПР экспериментальные значения выходов не могли быть сопоставлены с соответствующими расчетными по следующим причинам.

- Отсутствие расчетных значений независимых выходов метастабильных состояний, необходимых для расчета полного выхода нуклида при наличии экспериментальных значений либо лишь независимых выходов метастабильных состояний (^{178m}Ta , ^{180m}Hf , ^{139m}Nd , ^{121m}Te , ^{118m}Sb , ^{106m}Ag , ^{93m}Mo , ^{82m}Rb , ^{69m}Zn), либо лишь их кумулятивных выходов (^{160m}Ho , ^{119m}Te , ^{99m}Rh). В этих случаях сравнение не может быть проведено, поскольку представленные расчетные программы не позволяют вычислить независимые выходы изомерных состояний.

- Коэффициенты ветвления изомерных состояний генетических предшественников либо не известны, либо вероятность распада изомерного состояния по всем каналам, кроме изомерного перехода, превышает 1% (^{182}Ta , ^{163}Tm , ^{152}Tb , ^{151}Tb , ^{150}Tb , ^{149}Tb , ^{149}Gd , ^{149}Eu , ^{147}Tb , ^{147}Gd , ^{145}Gd , ^{133}Ce , ^{132}La , ^{121}Te , ^{119}Te , ^{113}Sb , ^{110}In , ^{100}Rh , ^{96}Tc , ^{89}Zr , ^{87}Y , ^{85}Sr , ^{73}Se).

- Для РПР измерены как независимый, так и кумулятивный выходы. В этом случае для сравнения выбирается независимый выход (^{88}Y), поскольку проводится непосредственное сравнение эксперимента с расчетом без использования формулы (10).

- Различие между измеренными кумулятивными выходами двух соседних элементов цепочки сопоставимо с погрешностью измерений (что свидетельствует о малом значении независимого выхода дочернего нуклида в сравнении с кумулятивным). Тогда (с целью избежать двойного сравнения) для него выбирается экспериментальное значение кумулятивного выхода нуклида с меньшей погрешностью ($^{175}\text{Ta} \rightarrow \underline{^{175}\text{Hf}}$, $^{173}\text{Ta} \rightarrow \underline{^{173}\text{Hf}} \rightarrow \underline{^{173}\text{Lu}}$, $^{172}\text{Hf} \rightarrow \underline{^{172}\text{Lu}}$, $^{171}\text{Hf} \rightarrow \underline{^{171}\text{Lu}}$, $^{170}\text{Hf} \rightarrow \underline{^{170}\text{Lu}}$, $^{169}\text{Lu} \rightarrow \underline{^{169}\text{Yb}}$, $^{167}\text{Lu} \rightarrow \underline{^{167}\text{Yb}} \rightarrow \underline{^{167}\text{Tm}}$, $^{166}\text{Yb} \rightarrow \underline{^{166}\text{Tm}}$, $^{161}\text{Tm} \rightarrow \underline{^{161}\text{Er}}$, $^{157}\text{Er} \rightarrow \underline{^{157}\text{Ho}} \rightarrow \underline{^{157}\text{Dy}}$, $^{156}\text{Er} \rightarrow \underline{^{156}\text{Ho}}$, $^{155}\text{Dy} \rightarrow \underline{^{155}\text{Tb}}$, $^{153}\text{Tb} \rightarrow \underline{^{153}\text{Gd}}$, $^{146}\text{Eu} \rightarrow \underline{^{146}\text{Gd}}$; подчеркнутые нуклиды использовались для сравнения).

Для корректного сравнения расчетных результатов, полученных по различным программам, они были перенормированы на единое значение сечения неупругого взаимодействия протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом. Это значение было рассчитано по формулам работы [22] и принято равным 1714 мбарн.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как указывалось выше, основой создания константного обеспечения работ по созданию ЭлЯУ станут расчетные программы, позволяющие учесть физические и конструктивные особенности этих установок. Однако это станет возможным лишь при условии достижения этими программами необходимой точности прогнозирования важнейших конструкционных, эксплуатационных, радиобиологических и радиозологических параметров ЭлЯУ.

В качестве примера верификации этих программ при использовании естественного вольфрама в качестве основного материала МУ ЭлЯУ рассмотрим накопление в МУ долгоживущих α -излучателей, представляющих собой (в силу высокой радиотоксичности) один из наиболее значимых факторов долговременной радиозоологической опасности [23].

В смеси РПР в данном случае возможно образование и накопление четырех таких

нуклидов – ^{146}Sm ($T_{1/2} = 1 \times 10^8$ лет), ^{148}Gd ($T_{1/2} = 74.6$ лет), ^{150}Gd ($T_{1/2} = 1.8 \times 10^6$ лет) и ^{154}Dy ($T_{1/2} = 3 \times 10^6$ лет) по цепочкам распада, приведенных на рис. 2.

В ходе описываемого эксперимента нами были идентифицированы, с последующим определением выхода, лишь РПП с $A = 146$ (^{146}Eu и ^{146}Gd) и $A = 150$ (^{150}Tb). Генетические предшественники ^{148}Gd и ^{154}Dy в смеси РПП с достаточной надежностью идентифицированы не были. Причины этого были индивидуальны в каждом случае, однако по существу они сводились к наличию « фоновых » РПП с близкими периодами полураспада и/или энергиями γ -линий с заметным квантовым выходом, не поддающихся программному отделению. В принципе, выходы генетических предшественников ^{148}Gd и ^{154}Dy (в первую очередь, ^{148}Tb и ^{154}Ho) могут быть определены и в рамках используемого метода, однако для этого необходимо проведение «точечных» целевых экспериментов со специальным выбором временных параметров облучения и измерения.

Как видно из табл. 1 и рис. 2, с учетом изложенных выше критериев формирования информационного массива расчетных и экспериментальных данных для взаимного сравнения непосредственно такое сравнение возможно лишь для ^{146}Sm . Из рис. 2 видно,

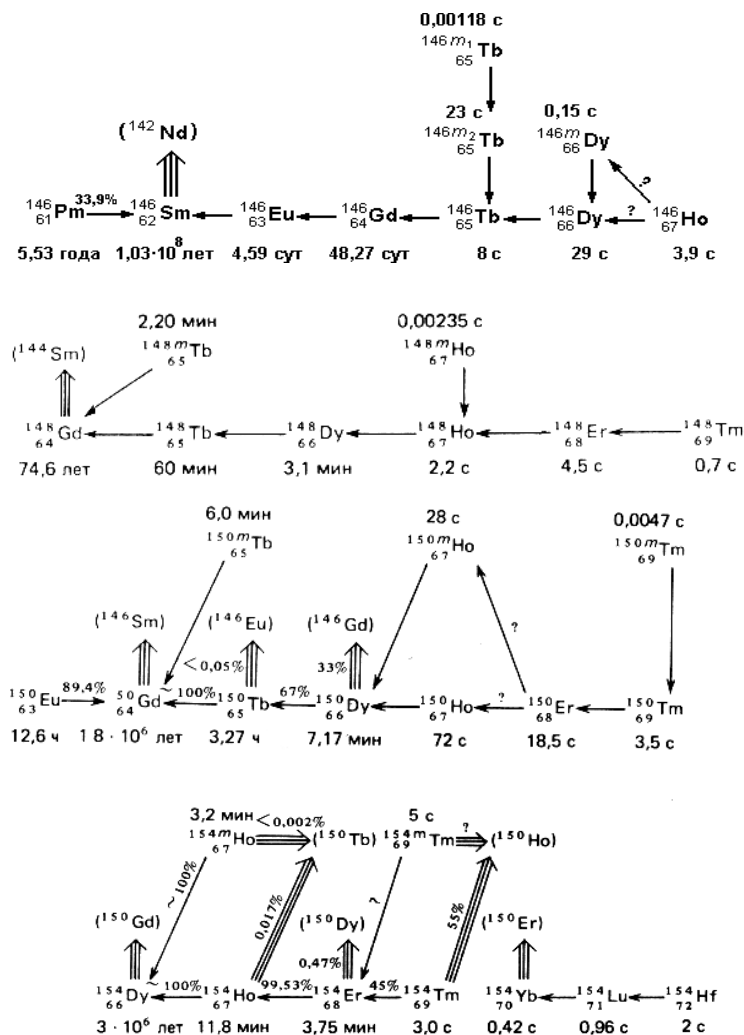


Рис. 2. Цепочки распада, содержащие долгоживущие α -излучатели из числа РПП естественного вольфрама

что кумулятивный выход ^{146}Sm не может быть меньше кумулятивного выхода ^{146}Gd , измеренного нами в настоящей работе (18.6 ± 1.6 мбарн) и использованного для сравнения. Между тем, расчетные значения кумулятивного выхода этого нуклида различаются почти в 3 раза (от 8.46 мбарн для программы LANET до 24.6 для CASCADE). Особо следует отметить значительное (фактор 2.2) занижение величины этого выхода программой LANET, которая считается одной из наиболее часто используемых программ моделирования нуклон-ядерных взаимодействий в рассматриваемой области энергий налетающих протонов.

Исходя из структуры изобарной цепочки с $A = 150$ (рис.2), кумулятивный выход ^{150}Gd не может быть меньше кумулятивного выхода ^{150}Tb , измеренного в настоящей работе (9.23 ± 1.23). РПР с $A = 150$ не были включены в информационный массив для сравнения из-за наличия значительного (36%) коэффициента ветвления на α -распад его короткоживущего ($T_{1/2} = 7.17$ мин) предшественника ^{150}Dy . Однако в силу особой важности обсуждаемого вопроса нами в виде исключения были выполнены оценки расчетных значений кумулятивного выхода ^{150}Tb с учетом отмеченной особенности рассматриваемой изобарной цепочки. Результаты оценок сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что и для ^{150}Tb (следовательно, и для ^{150}Gd) при сравнении расчета с экспериментом наблюдаются те же тенденции, что и отмеченные выше для $A = 146$, т.е. снова имеет место значительное различие между расчетными выходами, полученными по различным программам (вплоть до фактора 2.5) и некоторое занижение величины этого выхода программой LANET (фактор 1.3 при экспериментальной погрешности величины выхода 13%). Следует добавить, что для сравнения нами использовались экспериментальные значения кумулятивных выходов нуклидов из соответствующих изобарных цепочек, не учитывающие независимых выходов долгоживущих α -излучателей, а также их возможные образование «слева»(при распаде ^{146}Pm и ^{150}Eu , соответственно). Учет этого обстоятельства может еще более увеличить указанный выше фактор занижения.

Выводы

Количество проанализированных по описанным критериям данных недостаточно для формулировки каких-либо однозначных выводов. Тем не менее можно отметить тенденцию к занижению одной из наиболее широко используемых для практических расчетов ЭЛЯУ программ (LANET) скорости образования и накопления важнейших нуклидов из группы наиболее радиотоксичных РПР. Это следует учитывать при анализе долгосрочных прогнозов накопления техногенной радиоактивности при различных сценариях развития ядерной энергетики, составляемых в настоящее время.

Сказанное позволяет сделать выводы о необходимости как дальнейшего накопления экспериментальной информации о выходах РПР при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с различными материалами, в первую очередь, изотопно-обогащенными, так и совершенствования физических моделей протекания внутриядерного каскада и основанных на них расчетных программ, представляющих собой методическую основу создания ЭЛЯУ. Особо следует отметить настоятельную необходимость

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные сечения выхода ^{150}Tb при взаимодействии протонов с энергией 2600 МэВ с естественным вольфрамом

РПР	Эксп. выход (мбарн)	Расчетные. выходы (мбарн)						
		CEM95	CEM2k	LANET	CASCADE	HETC	INUCL	YIELDX
^{150}Tb	9.23 ± 1.23	10.9	9.4	7.1	13.7	11.6	17.6	12.0

расширения методической базы экспериментальных исследований смесей РПП с целью обязательной идентификации и количественного исследования радионуклидов, представляющих собой наибольшую потенциальную экологическую опасность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность МНТЦ за финансовую поддержку данной работы, а также докторам В.С. Барашенкову, Н.В. Степанову, С.Г. Машнику, Т.А. Габриэлю, А.Ж. Сиерку и Р.Е. Праелю за использование данных их расчетных программ.

Литература

1. *Van Tuyle Gregory J.* ATW Technology Development & Demonstration Plan: LANL Report LA-UR-99-1061; *Van Tuyle Gregory J.* ATW Technology & Scenarios: LANL Report LA-UR 99-771.
2. *Mukayama T.* OMEGA Program in Japan and ADS Development at JAERI: Proc. of the Third Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications ADTT'99, Praha, June 1999. Мо-1-5.
3. *Rubbia C.* Status of the Energy Amplifier Concept: Proc. of the Second Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3-7, 1996. – P. 35-51.
4. *Bowman Ch.D.* Accelerator-driven systems for nuclear waste transmutation// Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. – 1998. – 48. – P. 505-556.
5. *Salvatores M.* Strategies for the Back-and-of the Fuel Cycle: A Scientific Point of View: Proc. of the Third Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications ADTT'99, Praha, June 1999 Мо-1-4.
6. *Mukaiyama T., Ogawa T., Mizurnoto M., Takizuka T., Hino R., and Oyama Y.* Omega Program & Neutron Science Project for Development of Accelerator Hubryd System at JAERI: IAEA Technical Committee Meeting on Feasibility and Motivation for Hybrid Concepts for Nuclear Energy Generation and Transmutation, Madrid, 17-19 Sept. 1997, Spain.
7. *Watanabe N.* JAERI 5 MW Spallation Source Project: Second Int. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98) (Gatlinburg, USA, Sept. 20-23, 1998), published by the American Nuclear Society, Inc. 1998. – P. 3-10.
8. *Michel R.* Excitation Functions for the Production of Residual Nuclides with Emphasis on Light Heavy Ions: Fifth Workshop On Simulating Accelerators Radiation Environments (Paris, July 17-18, 2000, France). – P. 27-54.
9. *Holden N.E., Martin R.L. and Barnes I.L.* Isotopic composition of the elements 1983//Pure & Appl. Chem. – 1984. – V. 56. – №. 6. – P. 675 – 694.
10. *Tobailem J.* «Sections Efficaces des Reactions Nucleaires Induites par Protons, Deutrons, Particules Alphas. V. Silicium» Note CEA-N-1466(5), Sacley, 1981.
11. Report of the ISTS Project #839B-99, Moscow, Feb.2001, edited by Yu.E. Titarenko.
12. *Titarenko Yu.E. et. al.* Experimental and Computer Simulation Study of the Radionuclides Produced in Thin ^{209}Bi Targets by 130 MeV and 1,5 GeV Proton-Induced Reactions//NIM, A414 (1998), P. 73-99.
13. *Kinsey R.R. et. al.* Proc. 9th Int. Symp. of Capture-Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, 8-12 October 1996, Budapest, Hungary.
14. *Gudima K.K., Mashnik S.G. and Toneev V.D.* //Nucl. Phys. – 1983. – A 401. – 329. JINR, Dubna, 1995; OECD Nuclear Energy Agency Data Bank, Paris, France, 1995;
15. *Mashnik S.G. and Sierk A.J.* CEM2k - Recent Developments in CEM: Proc. of the Fourth Intern. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp00), November 13-15, 2000, Washington, DC, USA, (American Nuclear Society, La Grange Park, IL, USA, 2001). – P. 328-341.
16. *Prael R.E. and Lichtenstein H.* Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-89-3014 (1989).
17. *Barashenkov V.S. et al.* JINR Report R2-85-173, Dubna, 1985; Sov. J. Nucl. Phys. 39, 715 (1984); Nucl. Phys. A 338, 413 (1980).
18. *Armstrong T.W. and Chandler K.C.* //Nucl.Sci.Eng. – 1972. – 49. – 110.

19. *Stepanov N. V.* ITEP Preprint No. ITEP-129, Moscow, 1985; ITEP-81, Moscow, 1987; ITEP-55-88, Moscow, 1988 (in Russian).
20. *Silberberg R., Tsao C.H., and Barghouty A.F.* Updated Partial Cross Sections of Proton-Nucleus Reactions//Astrophys. J. – 1998. – 501. – 911.
21. *Firestone R.B.* in: Tables of Isotopes, 8th ed.: 1998 Update (with CD ROM) edited by S.Y. Frank Chu (CD ROM Ed.), C.M. Balbin (Ed.), (Wiley Interscience, New York, 1996).
22. *Letaw J.R. et al.*//Astrophys. J. Suppl. - 1983. – 51. - 271.
23. *Saito M., Stankovskii A., Artisyuk V., Korovin Yu., Shmelev A., Titarenko Yu.* Radiological Hazard of Spallation Products in Accelerator-Driven System. - Emitted to Nucl. Sci. and Eng.

Поступила в редакцию 3.09.2001

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 681.5:621.165

Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants \ K.V. Dergachev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 10 pages, 4 illustrations, 1 table. - References - 9 titles.

The structure, functional scheme and characteristics of calculating complex intended for prediction of erosion of NPP turbine rotor blade are considered in this paper.

УДК 681.332

Designing of Ultrasonic Defectoscop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System \ S.V. Michailov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 4 tables. - References - 5 titles

Method of the ultrasonic defectoscop SK26 core designing by way of multiprocessor system on the basis of digital signal processors ADSP-21XX has been presented. Local bus classification of multiprocessor system has been proposed.

УДК 621.039.586 : 536.42

Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident / G.N. Vlasichev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 6 illustrations, 1 table. - References, 10 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. Meltdown times of pin cladding and fuel on height of separate fuel pin, complete or partial blocking of the channel by a freezing material, and also repeated meltdown of the solidified layer are determined as a result of calculations. Testing of the developed programs of account of fuel pin melting and molten cladding moving TRAMS-TWEL and MOTE according to numerical results of techniques similar used in given programs is executed. The accounts of fuel pin cladding melting, cladding melt moving and freezing in not heated sections, taking place above and below active part of FFTF pin, and also in the most active part are executed. As a whole, received as a result of accounts a configuration, the lengths of layers from the solidified steel are higher and below heated site satisfactorily correspond to the data of R-5 experiment on TREAT reactor.

УДК 621.311:621.039

Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine \ E.B. Gromov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 3 tables. - References - 4 titles.

Results of development, improvement and assay of technology of the temporary closing-down of heat-and-power engineering equipment with using of film-forming amines and, in particular, octadecylamine

УДК 621.039.519

Measurement of radionuclide yields produced in 2.6 GeV proton irradiated nat-W \ Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 13 pages, 2 illustrations, 2 table. - References - 23 titles.

Radionuclide yields are measured in natural tungsten thin target irradiated with 2.6 GeV protons. The measurements were carried out using direct gamma-spectrometry of samples irradiated via U10 ITEP synchrotron. In total, 129 yields were defined, including 10 independent, 9 independent

metastable, 6 summed independent metastable plus ground, and 104 cumulative yields of radionuclide products. The experimental data were compared with theoretical yields predicted via 7 simulation codes: CEM95, CEM2k, LAHET, CASCADE, HETC, INUCL, YIELDX. Results are analyzed from a point of formation of secondary products that may be of large ecological and technological hazard.

УДК 621.039.51

Ballslayer as a core for the fast reactor \G.B. Usynin, S.G. Usynina; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 6 illustrations, 2 tables. - References - 5 titles.

The analysis of pebbly bed conception for the fast reactor is carried out. Balls medley from plutonium oxide and depleted uranium carbide are considered. The neutronic and hydraulic characteristics of such core is given. The opportunities deep burnout of heavy nuclei are discussed in the paper.

УДК 502.3

Geoinformation System of Radioactive Contaminated Territories \B.I.Yatsalo I.A.Pichugina, G.V.Kozmin, O.A.Mirzeabassov, I.V.Okhrimenko, M.F.Kanevsky, E.A.Savelieva; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations, 1 table. - References - 8 titles.

Description of Geographic Information System as a part of the Decision Support System PRANA for rehabilitation of radioactive contaminated territory of Bryansk region is presented. Developed vector electronic maps and databases of attributive information are pointed out.

УДК 621.039.75

Immobilization of Radioactive Waste in Ceramet Materials by the Method of Self-propagating High Temperature Synthesis \E.N. Ilyin, I.Yu. Pashkeev, A.V. Senin; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References - 7 titles.

For the immobilization of solid high-level waste (HLW) to use self-propagating high temperature synthesis (SPHTS) is proposed, which allowing to raise the temperature of the reaction mixture from 1500 to 4000°C due to the heat-evolution of the chemical reactions. As a initial reaction mixture thermite mixture Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al , SiO_2 , CaO , Na_2O and CeO_2 , which imitating composition of HLW is being considered. As a result of SPHTS, ceramet block is formed. Ceramet block consist of corrosion-proof iron-chromium metal matrix and ceramic matrix based on aluminates, silicates and alumosilicates. The estimation of chemical resistance of material-immobilizators, obtained by means of leaching in water has revealed their preference for the conventional borosilicate glass.

УДК 532.529

Analysis of the MAGICO and QUEOS experiments on the premixing of the clouds of particles with water with the VAPEX code \M.V.Davydov, V.I.Melikhov, O.I.Melikhov, I.V.Parfenov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 3 tables, 7 illustrations. - References, 4 titles.

The objective of the investigation was to simulate the MAGICO and QUEOS experiments devoted to the study of the melt-water premixing with the thermohydraulic code VAPEX developed at the EREC VNIIAES. The behavior of the melt drops cloud was simulated in the MAGICO and QUEOS experiments by the cloud of the metal spheres, mixing with the water under gravitational force. Both, the experiments with cold and hot particles were considered. The integral parameters, such as the velocity of the leading edge of the cloud, the mixture level dynamic, the rate of the vaporization and local values of the void fraction were compared with the experimental results. Generally, the calculation results are in a reasonable agreement with the experimental ones.

УДК 621.039.517

Relap5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator \S.A.Rouhanifard, A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 13 illustrations, 3 tables. - References - 7 titles.