

Оценка параметров электроядерной установки для трансмутации радиоактивных отходов

А.А. Глазков, А.Д. Коляскин

*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия*

В.Е. Калантаров

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Среди радионуклидов, содержащихся в отходах ядерного топлива, наиболее опасными представляются младшие актиниды (МА). Их трудно захоранивать, а присутствие их в топливе даже в небольшом количестве повышает радиотоксичность всего топливного цикла. Поэтому целевая направленность рассматриваемой здесь концепции подкритической электроядерной установки (ЭЛЯУ), основными элементами которой являются подкритический бланкет, линейный ускоритель протонов и жидкометаллическая мишень-конвертор, расположенная в центре активной зоны, связывается со сжиганием МА. Младшие актиниды будут накапливаться в процессе работы легководных реакторов в замкнутом U-Pu топливном цикле с многократным рециклом плутония. Специфической особенностью таких накапливающихся МА будет доминирующая роль кюриевой составляющей (особенно если учесть, что при последующем облучении накопленного Am-243 будет также в основном образовываться кюрий). Помимо высокого нейтронного фона спонтанного деления этот материал очень сложен в обращении вследствие необычно высокого внутреннего тепловыделения, обусловленного α -распадом прежде всего изотопа Cm-244 (удельное тепловыделение 2800 Вт/кг).

Для сжигания кюрия предлагается использовать подкритический бланкет бассейнового типа, в котором применяются шарообразные топливные элементы, изготовленные на основе технологии, развитой для высокотемпературных реакторов. Элементы выполнены из графита и содержат микротопливные частицы, например Cm₂O₃, с многослойным защитным покрытием, способным удерживать как продукты деления, так и продукты распада. Бланкет окружает свинцовую мишень и погружен в бассейн, заполненный расплавленным свинцом, который используется также и в качестве теплоносителя. Такая концепция, обладая рядом технологических преимуществ, позволяет гибко управлять компоновкой бланкета для обеспечения глубокого выжигания кюрия за цикл облучения. Оценочные расчеты показали, что спектр тепловых нейтронов в бланкете может быть сформирован, если использовать шаровые твэлы с диаметром около 6 см с содержанием частиц микротоплива 5–15 г/шар. При этом слабая подкритичность бланкета может достигаться при содержании делящегося изотопа Cm-245 в Cm-244 на уровне 4–15%. При содержании частиц микротоплива 7 г/шар (что является уже хорошо отработанным и эффективным применительно к урановому топливу) тепловыделение радиоактивного распада Cm-244 составит 15–20 Вт для отдельного шарового элемента. Учитывая, что технология изготовления таких твэлов требует повышенных температур (а значит, и нагрева), тепло радиоактивного распада Cm-244 в этом случае могло бы даже способствовать упрощению технологического процесса изготовления.

Относительно мощности бланкета и количества требуемых ЭЛЯУ можно сделать некоторые выводы, исходя из состояния ядерной энергетики страны. В существующих энергетических реакторах на урановом топливе ежегодно накапливается 20–25 кг МА в расчете на 1 ГВт электрической мощности. Поэтому для ядерной энергетической системы России, суммарные энергетические мощности которой составляют около 22 ГВт, сжигание всех накапливаемых МА возможно в одной-двух электроядерных установках с общей электрической мощностью 450–500 МВт.

Методика предварительного определения параметров ЭЛЯУ и результаты численного моделирования представлены, например в [1, 2]. Количество необходимых дополнительных нейтронов N_g , вводимых в активную зону бланкета в единицу времени, зависит от электрической мощности реактора P_r , величины коэффициента размножения нейтронов k , и для $P_r = 500$ МВт N_g может составлять $10^{18} - 10^{19}$ н/с. Так как получение такого количества нейтронов требует значительных энергозатрат, то минимизация мощности высокочастотного питания ускорителя P_{acc} , которая является доминирующей составляющей суммарных эксплуатационных энергозатрат нейтронного генератора, становится принципиальной задачей.

Первоначальный выбор параметров ускорителя может быть сделан на основании анализа поведения функции энергетического выигрыша G , определяемой формулой

$$G(E) = \frac{P_r}{P_{acc}} = \frac{P_r}{P_b + P} = \frac{P_r}{P_b(1 + \beta)}, \quad (1)$$

где E — энергия ускоренных протонов; P_b — мощность пучка; P — усредненная мощность высокочастотных потерь в стенках ускоряющих резонаторов; $\beta = g/(\gamma I_r)$; g — усредненная эффективная напряженность высокочастотного ускоряющего поля, численно равная темпу ускорения частиц; γ — величина, характеризующая эффективность ускоряющих резонаторов и пропорциональная их шунтовому сопротивлению $R_{ш}$; I_r — токовая нагрузка резонатора (в линейных одноканальных ускорителях I_r совпадает с величиной тока пучка I).

Средний ток пучка ускоренных частиц на мишени I , необходимый для создания требуемого числа дополнительных нейтронов N_g , и мощность пучка P_b определяются соотношениями:

$$I = e\alpha \frac{1 - k}{k} \frac{P_r}{\nu_{pn}(E)}, \quad (2)$$

$$P_b = EI = e\alpha \frac{1 - k}{k} \frac{P_r}{f_{pn}(E)}, \quad (3)$$

где e — заряд электрона, $\alpha \approx 2.5 * 10^{11} \text{ c}^{-1}\text{ВТ}^{-1}$ (коэффициент преобразования тепловой мощности в электрическую принят равным 0.3); ν_{pn} — выход нейтронов из мишени, $f_{pn} = \nu_{pn}/E$.

Исследование зависимости (1) показало наличие оптимума по E , соответствующего минимуму потребляемой мощности высокочастотного питания ускорителя P_{acc} . В табл. 1 для версии зависимости $f_{pn}(E)$, приведенной в [3], содержатся оптимальные параметры ускорителя протонов нейтронного генератора на базе резонаторов с нормальной проводимостью.

Таблица 1.

Параметры ускорителя протонов

№	Параметр	Значение
1	Электрическая мощности бланкета P_r , МВт	500
2	Коэффициент размножения нейтронов k	0.95
3	Темп ускорения частиц g , МэВ/м	2
4	γ , МОм/м	40
5	Энергия ускоренных протонов E , МэВ	580
6	Ток пучка I , мА	91
7	Энергетический выигрыш G	6.1
8	Мощность питания ускорителя P_{acc} , МВт	81

Данные табл. 1 в силу ряда причин (усреднение электродинамических характеристик ускоряющих резонаторов и темпа ускорения, большой статистический разброс в величине выхода нейтронов из свинцовой мишени и др.) имеют оценочный характер, однако позволяют определить масштаб энергозатрат на создание потока дополнительных нейтронов.

Экономичность ускорителя в значительной степени определяется экономичностью ускоряющих элементов. В настоящей работе приведены результаты расчетов методом эквивалентных схем электродинамических характеристик четырехзорных резонаторов Н-типа с плитами с частотами 300 и 600 МГц для ускорения протонов в диапазоне энергий 7 – 100 МэВ. Частота 300 МГц предлагается в качестве рабочей для ускорения частиц до 20 МэВ, а удвоенная частота — для окончательной части ускорителя. Схема резонатора показана на рис. 1.

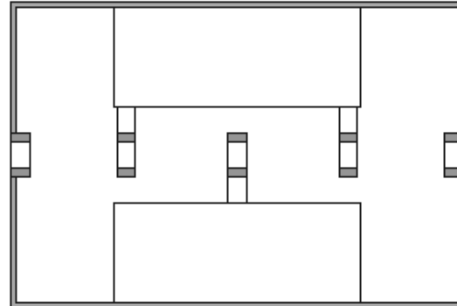


Рис. 1: Схема ускоряющего резонатора.

При проведении расчетов одинаковыми для всех вариантов резонаторов являлись следующие размеры: внутренний и внешний диаметры трубок дрейфа (ТД) — 15 и 23 мм, диаметры штанг ТД и толщины плит — 10 мм. Ширина ускоряющего промежутка выбиралась из условия, чтобы коэффициент пролетного времени составлял приблизительно 0,7, так как в этом случае эффективное шунтовое сопротивление резонатора максимально. Результаты расчетов ЭДХ резонаторов при различных энергиях частиц сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры 4х-зорных резонаторов.

Параметр	300 МГц			600 МГц		
	7 МэВ	15 МэВ	20 МэВ	20 МэВ	60 МэВ	0.1 ГэВ
Радиус резонатора, мм	309.2	209	200.3	80.8	86.6	87.3
Расстояние между плитами, мм	61	90	103	51	90	115
Длина штанг ТД, мм	19	38.5	40	14	33.5	46
Длина ТД, мм	10	16.1	18.6	10	16.1	20
Длина периода, мм	61.1	89.4	103.3	51.6	89.4	115.4
$R_{ш}$, МОм/м	140.3	126.7	112.1	127.4	79.1	62
Добротность резонатора	21700	28900	30800	20600	20400	19000

Из табл. 2 видно, что короткие резонаторы Н-типа с плитами обладают достаточно высокими значениями погонных шунтовых сопротивлений и их вполне можно включить в круг рассматриваемых ускоряющих элементов канала ускорителя при детальной разработке нейтронного генератора.

Работа выполняется при поддержке РФФИ в рамках проекта 98-02-17368.

Список литературы

- [1] Глазков А.А., Диденко А.Н., Коляскин А.Д., Шмелев А.Н. ЭЛЯУ для трансмутации младших актинидов. Труды Международной конференции по электроядерным системам в перспективной ядерной энергетике (Москва, 11-15 октября 1999 г.), Москва, ИГЭФ, 1999, с.48-56.
- [2] Глазков А.А., Диденко А.Н., Коляскин А.Д., Шмелев А.Н., Хорасанов Г.Л., Калантаров В.Е. Оценка параметров электроядерной установки для трансмутации младших актинидов. Труды 16-го Совещания по ускорителям заряженных частиц (ГНЦ ИФВЭ, Протвино, 20-22 октября 1998 г.), Протвино, 1998, т. 2, с.220-223.
- [3] Дементьев А.А., Соболевский Н.М., Ставиский Ю.Я. Выход нейтронов из протяженной свинцовой мишени под действием протонов с энергией от 0.1 до 100 ГэВ. Препринт ИЯИ 0879/95.