

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТОЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ПРИЕМЛЕМОЙ УТИЛИЗАЦИИ ПЛУТОНИЯ

Барашенков В.С., Попов Ю.П., Пузынин И.В., Соснин А.Н. (ОИЯИ)

В течение длительного времени электроядерные установки рассматривали как наработчики легкоде-
лящихся ^{239}Pu и ^{233}U в урановых и ториевых мишенях, которые затем могут использоваться в реакторах
(см., например, статьи [1—4]). Такой подход требует использования ускорителей током ≈ 100 мА, создание
которых является сложной и в некоторых аспектах еще не решенной задачей. Хотя специалисты утверждают,
что все эти трудности имеют чисто технический характер, создание и особенно эксплуатация таких гигант-
ских машин столкнутся с трудностями, и это было главным возражением против электроядерной технологии.

Следующим этапом явилась концепция замкнутого цикла один ускоритель—один реактор с выжига-
нием долгоживущих отходов [5]. В этом случае можно ограничиться примерно в 10 раз меньшей интен-
сивностью пучков ускоренных частиц и даже током ≈ 1 мА, если применять систему нескольких ускорителей
(что предпочтительнее и с технологической точки зрения [6]). Предложенный подход открыл путь для со-
здания уже в ближайшие годы электроядерных электростанций на уране и тории [7—9]). Вместе с тем
есть и важная обратная задача — экологически приемлемая и экономически выгодная утилизация запасов
чистого оружейного плутония и загрязненного другими нуклидами технического плутония АЭС [7, 8].

Электроядерная технология представляется перспективной для выжигания плутония, поскольку боль-
шой выход нейтронов в облучаемом протонами, дейтронами или α -частицами плутонии уже при энергии
всего лишь несколько сот МэВ позволяет использовать для разработки такой технологии хорошо освоенные
типы ускорителей. Хотя при этом значительная часть энергии первичного пучка теряется в ионизационных
процессах, энергия деления во много раз превосходит потери, тем более что выделяющееся в мишени «иони-
зационное тепло» может быть утилизировано. Упрощается и радиационная безопасность, существенно
усложняющая и удорожающая эксплуатацию высокоэнергетических ускорителей.

В качестве первого шага в изучении плутониевых электроядерных систем предполагается объединить
активную зону работающего в подкритическом режиме плутониевого реактора ИБР-30 (который предпо-
лагается демонтировать в связи с созданием нейтронного спектрометра ИРЕН) с протонным циклотроном
энергией 650 МэВ ОИЯИ. Установив активную зону на подвижной платформе, можно использовать и пучки
протонов, дейтронов, α -частиц синхроциклотрона энергией 9 ГэВ.

Одной из привлекательных сторон такого проекта является его относительная дешевизна и возможность
быстрой реализации, поскольку уже есть почти все необходимое оборудование и детали гибридной установки.
Более того, вторую жизнь получают морально устаревшие реактор и ускоритель. С помощью предлагаемой,
достаточно мощной электроядерной установки можно оценить границы допустимого коэффициента $K_{\text{эф}}$,
изучить его возможные флюктуации*, исследовать различные режимы наработки и выжигания долгожи-
вущих нуклидов, зависимость электроядерного процесса от энергии и типа бомбардирующих частиц. Имеется
также возможность изучить поведение секционированных (вентильных) мишеней [12] для дальнейшего
снижения тока ускорителя.

ОИЯИ — международная организация, поэтому участие в исследованиях станет доступным многим
специалистам.

Ниже приведены результаты численного моделирования проектируемой установки, основанного на
модели Монте-Карло меж- и внутриядерных каскадов. Ионизационные потери рассчитывали методом
[13, 14]. В области энергии $E > 14,5$ МэВ применяли библиотеку адрон-ядерных сечений [15, 16]. Расчеты
межядерных каскадов при меньшей энергии выполняли с использованием 26-групповой системы констант
[17]. Следует заметить, что эта система констант может быть заменена другими, более детальными биб-
лиотеками, однако для моделирования выхода нейтронов, распределения выделяемого тепла, вычисления

*При изменении режима ускорения могут возникать кратковременные всплески $K_{\text{эф}}(t) > 1$, определя-
емого как отношение интенсивностей двух последовательных поколений нейтронов в активной зоне:

$$K_{\text{эф}} = \int_{t_1}^{t_2} K_{\text{эф}}(t) dt / \Delta t; \Delta t = t_1 - t_2 \rightarrow \infty [10, 11].$$

$K_{эф}$ и других основных характеристик это несущественно. Более детальная информация о низкоэнергетических константах важна при моделировании трансмутации, которая в статье не рассматривается.

Угловые распределения упругорассеянных высокоэнергетических частиц разыгрывали с помощью феноменологических формул. Свойства частиц, рождающихся в неупругих адрон-ядерных столкновениях, вычисляли на основе каскадно-испарительной модели [18]. Учтены нестационарные предкомпаундные процессы в послекаскадных остаточных ядрах. Подробнее расчеты описаны в работах [19, 20].

Мишень-реактор цилиндрической формы в центре имеет свинцовый kern радиусом $R = 4$ см, длиной $L = 14$ см, окруженный плутониевым бланкетом размером $R \times L = 13 \times 14$ см и средней плотностью $\rho = 6,4$ г/см³. Реактор окружен со всех сторон вольфрамовым экраном толщиной $\Delta L = 2,5$ см и внешней стальной оболочкой такой же толщины. Пучок ускоренных протонов вводится вдоль центральной оси в центр мишени на глубину 11 см (см. рисунок).

В таблице приведены основные расчетные характеристики электроядерного процесса: коэффициент мультипликации $K_{эф}$; суммарный выход нейтронов $N_{сум} = N_{пог} + N_{выл}$, где $N_{пог}$, $N_{выл}$ — число нейтронов, поглощенных в $\mu\gamma$ -реакциях и вылетевших из реактора; полное число высоко- и низкоэнергетических делений $N_d = N_{вд} + N_{нд}$ (границей является энергия $E = 10,5$ МэВ); суммарный выход тепла $Q_{сум} = Q_{ион} + Q_{вд} + Q_{нд}$, где $Q_{ион}$ — энергия, теряемая частицами в ионизационных процессах; $Q_{вд}$, $Q_{нд}$ — тепловыделение при высоко- и низкоэнергетическом делении. Все числа приведены в расчете на один первичный протон.

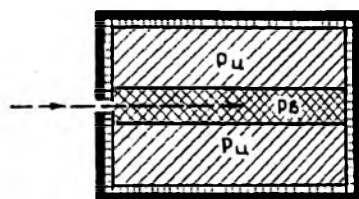


Схема электроядерной установки

Расчетные характеристики электроядерной установки при двух значениях энергии бомбардирующих протонов

Параметр	E, МэВ	
	650	1500
$K_{эф}$	0,961 $\pm 0,002$	0,961 $\pm 0,002$
$N_{сум} = N_{пог} + N_{выл}$	130	290
$N_{выл} / N_{сум} \%$	94	94
N_d	58	130
$N_{нд} / N_d \%$	99,3	99,2
$Q_{сум}, \text{Вт} \cdot 10^{-9}$	1,6	3,6
$Q_{вд} / Q_{нд} \%$	0,34	0,41
$Q_{ион} / E, \%$	19	14
$Q_{сум} / E$	15,2	14,8

Для сравнения, кроме данных для энергии циклотрона 650 МэВ, в таблице приведены также данные для энергии $E = 1$ ГэВ, рассматриваемой обычно в качестве оптимальной для электроядерного размножения.

Для циклотрона ОИЯИ энергией 650 МэВ при токе $\sim 5 \cdot 10^{12}$ протон/с тепловая мощность предлагаемой электроядерной установки составит ~ 8 кВт. Этой мощности достаточно для проведения большинства экспериментов, хотя ее можно будет значительно повысить за счет увеличения количества плутония в активной зоне реактора, повышения $K_{эф}$ и тока ускорителя. Однако при этом потребуются дополнительное охлаждение установки.

Из представленных данных следует, что ионизационные процессы уносят значительную часть энергии бомбардирующей частицы, тем не менее избыток энергии остается большим $Q_{сум} / E \sim 15$, что позволит использовать пучки частиц энергией, существенно меньшей 1 ГэВ.

Коэффициент усиления $Q_{сум} / E$ чувствителен к $K_{эф}$. Например, если $K_{эф}$ уменьшить всего на 1,35%, что соответствует средней плотности плутония ($\rho = 5$ г/см³), то коэффициент $Q_{сум} / E$ снижается вдвое даже при условии, что стальная оболочка толщиной 2,5 см заменяется экранирующим слоем стали 30 см.

В рассматриваемом проекте с использованием деталей ИБР-30 велика утечка нейтронов. В дальнейшем она может быть уменьшена путем введения специальных экранов.

В заключение мы считаем своим долгом поблагодарить наших коллег В.П. Дмитриевского, Ю.С. Замятнина, Л.М. Онищенко, Г.Н. Погодаева, А.Д. Рогова, И.А. Шелаева за обсуждения, советы и критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильков В.Г. и др. Электроядерный метод генерации нейтронов и производства расщепляющихся материалов. — Атомная энергия, 1970, т. 29, вып. 2, с. 151—156.
2. Tunncliffe P., Chidley B., Fraser J. High-current proton linear accelerators and nuclear power. Rep. Intern. Conf. on Accelerators. Chalk River, Ontario, 1976.
3. Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электроядерного метода. — ЭЧАЯ, 1978, т. 9, с. 871—921.
4. Барашенков В.С., Соснин А.Н., Шмаков С.Ю. Временная зависимость характеристик электроядерной системы (эффект разгонки). — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 6, с. 482—484.
5. Rubbia C. et al. A Realistic Pu Elimination Scheme with Fast Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium Fuel. CERN/AT/95-53(ET), 1995.
6. Шеласв И.А. Сверхпроводящий циклотрон с разделяющимися орбитами для электроядерного реактора: Сообщения ОИЯИ, 1993, т. 5, с. 16—34.
7. Proc. Intern. Workshop «Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste: Problems, Perspectives, Cooperative Research», Dubna, May 1996.
8. Proc. Second Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, June 1996.
9. Proc. 8-th Intern. Conf. on Emergency Energy Sources. Obninsk, June 1996.
10. Barashenkov V.S., Polanski A., Sosnin A.N. Monte-Carlo modeling of electronuclear processes with non-linear effects. — In: Proc. Intern. Workshop «Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste: Problems, Perspectives, Cooperative Research», Dubna, May 1996, p. 27—30.
11. Barashenkov V.S., Polanski A., Sosnin A.N. Interactions of protons and heavy ion beams with uranium and thorium. — Ibid., p. 233—235.
12. Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. О возможности повышения эффективности электроядерного трансмутационного устройства на базе перехода к многосекционной структуре blankets: ВНИИЭФ 27-93, 1993.
13. Sternheimer R. Density effects for the ionization losses of charged particles. — Phys. Rev., 1966, v. 145, p. 247—253.
14. Sternheimer R. General expression for the density effect for the ionization of charged particles. — Ibid., 1971, v. 3B, p. 3681—3686.
15. Barashenkov V.S., Polanski A. Electronic Guide for Nuclear Cross-Sections. Comm. JINR E2-94-17, Dubna, 1994.
16. Барашенков В.С. Сечения взаимодействий частиц и ядер с ядрами. Дубна, ОИЯИ, 1993.
17. Абаган Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоатомиздат, 1981.
18. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М.: Атомиздат, 1972.
19. Барашенков В.С. и др. Программный комплекс КАСКАД для монте-карловского моделирования ядерно-физических процессов, индуцированных высокоэнергетическими частицами и ядрами в газообразных и конденсированных средах: Сообщение ОИЯИ P2-85-173, 1985.
20. Барашенков В.С. и др. Математическое моделирование радиационных повреждений микроэлектронных приборов. — ЭЧАЯ, 1993, т. 24, с. 246—284.

Поступило в Редакцию 18.08.97

УДК 543.426:502.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПРОБ РАСТЕНИЙ ЧАТКАЛЬСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Ажабов А.К., Салихбаев У.С., Сафаров А.Н., Хушмуродов Ш.Х.
(Самаркандский государственный университет),
Данилова Е.А., Кист А.А. (Институт ядерной физики АН РУз),
Дехканов Т. (Чаткальский биосферный заповедник),
Дорофеев А.А., Каланов С., Рашидова Д.Ш., Холбоев И.
(НИИ прикладной физики ТашГУ), Кобзев А.П. (ОИЯИ)*

Исследования состояния окружающей среды тесно связаны с определением элементного состава различных проб. Для этих целей широко применяют ядерно-физические методы анализа. Точность методов обусловлена статистическими и трудно учитываемыми систематическими и случайными ошибками, связанными с содержанием того или иного элемента в пробе, характеристиками пробы, пробоподготовкой, выбором внешних стандартов, условиями измерений и обработкой экспериментальной информации и т.д. [1]. Поэтому естествен разброс данных, полученных различными методами и на разных установках. Очевидно, что точность и достоверность результатов возрастает при элементном анализе несколькими методами.