

и их дезактивации, печь отжига радиационных дефектов, установки для измерения удельного электрического сопротивления, определения времени жизни неосновных носителей заряда и типа проводимости кремния, а также станок для резки слитков.

Технический участок находится в эксплуатации с 1985 г. Последние три года легирование ведется для одной из западноевропейских фирм. Типичный разброс удельного сопротивления на торцах слитков не превосходит 2%, отклонение от заданного номинала удельного сопротивления не превышает 2—3%. Производительность легирования слитков кремния диаметром 12,7 см номинального электросопротивления 60 Ом·см составляет 4500 кг/год.

В настоящее время на реакторе оборудуется еще один канал (ГЭК-1) для облучения слитков кремния диаметром до 10 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников. Под ред. Дж. Миза. М.: Мир, 1982. 264 с.
2. Смирнов Л.С., Соловьев С.П., Стась В.Ф., Харченко В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск: Наука, 1981. 182 с.
3. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. М.: Атомиздат, 1985. 278 с.

Поступила в Редакцию 10.06.94

УДК 621.039.7

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОГО УСТРОЙСТВА С БЛАНКЕТОМ НА РАСПЛАВЛЕННЫХ СОЛЯХ И НЕПТУНИЕВОЙ РАЗМНОЖАЮЩЕЙ МИШЕНЬЮ

Колесов В.Ф., Штарев С.К., Хоружий В.Х., Житник А.К.
(Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ)

Одна из трудностей на пути реализации электроядерных трансмутационных и энергетических устройств заключается в чрезмерно высоких требованиях к мощности ускорителя протонов. Так, мощность пучка протонов в проекте электроядерного устройства Лос-Аламосской национальной лаборатории (США), разрабатываемого в рамках программы ABC, равна 64 МВт [1]. Указанная трудность может быть существенно уменьшена в случае применения специфических многосекционных бланкетов. Как было показано в статье [2], использование в электроядерном устройстве многосекционного бланкета с глубоко вентильной нейтронной связью между секциями позволяет во много раз снизить мощность ускорителя протонов.

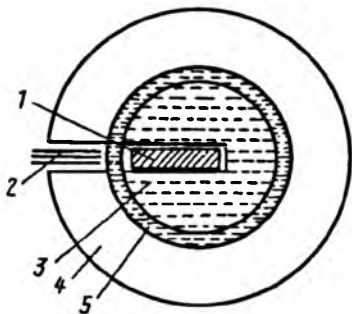


Рис. 1. Вариант реализации двухсекционного бланкета [2]: 1 — мишень ускорителя; 2 — пучок протонов от ускорителя; 3 — внутренняя секция с ^{237}Np ; 4 — внешняя секция бланкета с ^{235}U ; 5 — слой замедлителя

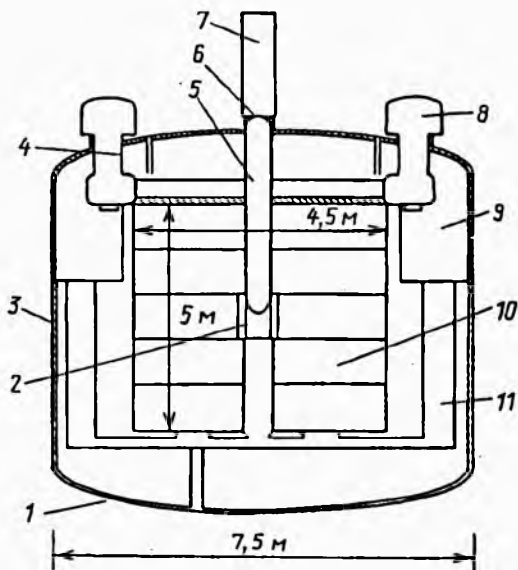
В качестве схематического варианта предложения рассматривается бланкет, представленный на рис. 1. В этой схеме делящимся материалом внутренней секции является пороговый ^{237}Np , внешней секции — ^{235}U . Между секциями помещен слой замедлителя. Нейтроны, рожденные во внутренней секции и после замедления в слое 5 попавшие во внешнюю секцию, легко вызывают там деления. Нейтроны, рожденные во внешней секции и прошедшие ту же фазу замедления, не в состоянии вызвать деления во внутренней секции. Именно этим определяется вентильность связи в схеме рис. 1. На этой основе можно вести речь также о многосекционном бланкете.

Нейтронные характеристики показанной на рис. 1 схемы двухсекционного бланкета и подобных ей многосекционных схем получены в работе [2] на основе аналитического решения уравнений для связанных реакторов в форме уравнений Р. Эйвери [3]. Параметрами этих систем, определяющими нейтронные характеристики, являются тотальная подкритичность системы $\Delta k = 1 - k$, подкритичность отдельной секции $\Delta k_i = 1 - k_i$ ($i = 1, 2$) и коэффициенты нейтронной связи k_{12} , k_{21} (k_{ij} — коэффициент размножения в секции i нейтронов, рожденных в секции j).

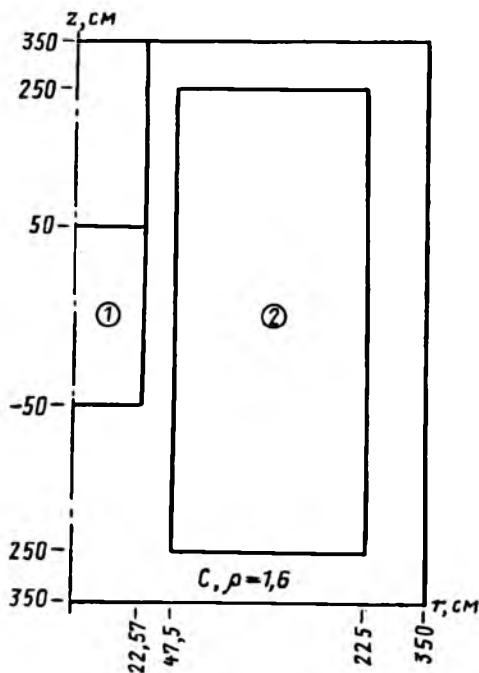
Работа [2] послужила инициатором дальнейших расчетов, связанных уже с конкретным электроядерным устройством в проекте АВС. Задача этих расчетов была сформулирована А. Фавале (Аэрокосмическая корпорация Грумман, США) и В.Ф. Колосовым (ВНИИЭФ, Россия). Концепция вентильной двухсекционной системы в ней нашла выражение в виде комбинации проектного бланкета на расплавленной соли плутония (секция 2) и размножающей мишени из металлического ^{237}Np (секция 1). (Двухсекционная система в виде комбинации бланкета и размножающей мишени ранее обсуждалась в работе [4]. Предполагалось, что вентильная связь в этой системе осуществляется в результате размещения на границе между секциями слоя поглотителя тепловых нейтронов.) Проводились расчеты нейтронных характеристик указанной системы с нептунием, а также проектной системы с торисовой мишенью. Кроме того, в целях получения более полного представления о роли фактора пороговости делящегося вещества в системе с нептунием были выполнены некоторые расчеты для системы с проектным бланкетом и мишенью из урана 90%-ного обогащения по ^{235}U .

В качестве показателя эффективности вариантов рассматриваемого электроядерного устройства принято число делений в плутонии бланкета на 1 протон от ускорителя. Основная цель расчетов заключалась в определении отношения чисел делений в плутонии бланкета, проводимых в системе с нептуниевой мишенью и системе с торисовой мишенью, при нормировке на 1 протон от ускорителя и при равенстве тотальной подкритичности той и другой комбинации. Именно это отношение показывает, во сколько раз можно снизить мощность ускорителя при переходе к принятой версии вентильной двухсекционной системы.

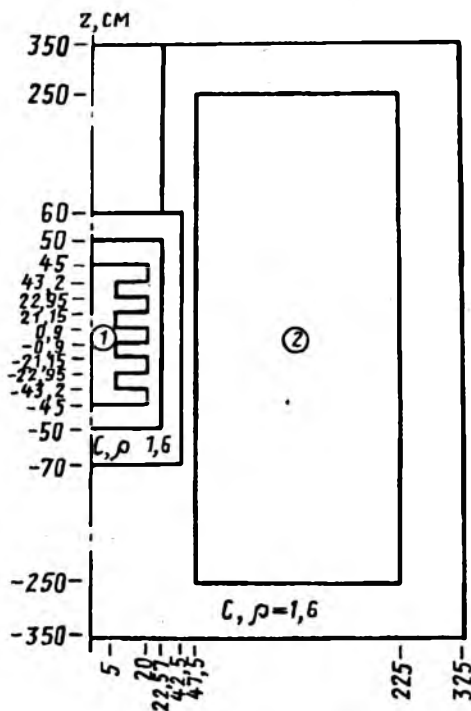
Опорной системой для расчетов служили проектные бланкет и торисевая мишень, представленные в обзоре-презентации АВС Лос-Аламосской лаборатории (рис. 2). Внешний диаметр активной зоны бланкета 4,5, высота 5 м. Проектная торисевая мишень имеет форму прямоугольной призмы размером $40 \times 40 \times 100$ см. Масса тория в мишени 1 т. Торий и пустоты занимают 88% объема мишени, 12% объема занимает циркулирующая в качестве теплоносителя соль того же состава, что и в активной зоне бланкета. Материалом активной зоны бланкета является расплавленная соль и графит решетки. Состав расплавленной соли: $\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ZrF}_4-\text{PuF}_3$ молекулярной концентрацией компонентов 65, 29, 5 и ~1% соответственно. Всего в активной зоне содержится ~ 4 м^3 соли и 80 м^3 графита.



Р и с. 2. Бланкет на расплавленной соли плутония и торисевая мишень в проекте АВС [1]: 1 — дренаж; 2 — мишень из металлического тория; 3 — корпус из хастелоя; 4 — откачка ксенона, криптона, тория; 5 — труба для проводки пучка протонов, заполненная гелием; 6 — инокселевое окно; 7 — пучок протонов; 8 — насосы; 9 — теплообменник; 10 — расплавленная соль с плутонием в графитовой решетке; 11 — каналы возврата теплоносителя



Р и с. 3. Расчетная схема системы с ториевой мишенью: 1 — ториевая мишень; 2 — бланкет



Р и с. 4. Расчетная схема системы с нептуниевой мишенью: 1 — нептуниевая мишень; 2 — бланкет

В расчетной схеме конфигурации проектного бланкета и мишени были несомненно упрощены, что заключалось главным образом в гомогенизации структуры активной зоны и замене призматической торисвой мишени равновеликой цилиндрической. Мишень со всех сторон окружалась графитом или бериллием толщиной 20 см (рис. 3).

В системе с размножающей мишенью из нептуния геометрия и состав зон бланкета, окружающего мишень слоя замедлителя, и геометрия мишенного объема идентичны таковым в системе с торисвой мишенью (рис. 4). Но форма самой нептуниевой мишени ввиду ограничений на коэффициент размножения нейтронов k_1 отличается от формы ториевой мишени. Нептуниевая мишень представляет собой цилиндр высотой 90 см. Примыкающая к оси область диаметром 10 см является сплошным массивом металлического нептуния плотностью 18 г/см^3 . Периферийная область внутренним и внешним диаметром 10 и 40 см представляется пятью тонкими дисками. Остальное пространство мишенного объема заполнено гелием под давлением 5 МПа.

Геометрическая форма мишени из урана принималась такой же, как у мишени из тория. Средняя плотность урана в объеме мишени, равная $0,4 \text{ г/см}^3$, найдена из условия, что коэффициент размножения нейтронов в мишени (т.е. в 1-й секции системы) должен равняться 0,9.

Предполагалось, что пучок протонов энергией 0,8 ГэВ падает сверху на мишень в осевом направлении. Форма пучка протонов — или соосный с мишенью цилиндр диаметром 30 см с равномерным распределением тока протонов в поперечном сечении, или тонкий шнур вдоль оси мишени.

Расчеты реакций в мишенях и бланкете под воздействием пучка протонов, пространственных распределений источников первичных нейтронов и первичных делений, коэффициентов k_1, k_2, k_{12}, k_{21} проводились с помощью нескольких программ Монте-Карло [5]. Тестирование программ Монте-Карло и используемых в расчетах ядерных констант проводилось по экспериментальному выходу

нейтронов из нескольких свинцовых и урановых мишеней. Содержание плутония в бланкете было взято таким, что k_2 равнялся 0,93. Молярное содержание PuF_3 в полном солевом расплаве при этом было равно 0,025%, что соответствует загрузке плутония

в бланкет 12,8 кг. Значение k_1 в ториевой мишени получено равным 0,035. Конфигурация и размеры нептуниевой мишени, представленные на рис. 4, соответствуют $k_1 = 0,9$. Полная масса нептуния в мишени при этом составляет 318 кг.

В табл. 1 приведено интегральное по объему нептуниевой и ториевой мишеней и бланкета число вторичных протонов, первичных нейтронов и первичных делений при двух оговоренных формах пучка протонов. Из табл. 1 следует, что в случае цилиндрического пучка протонов число первичных нейтронов и вторичных протонов в нептуниевой мишени, создаваемых одним протоном ускорителя, в 2 раза меньше аналогичного показателя для ториевой мишени. Странно низкий на первый взгляд выход первичных нейтронов и вторичных протонов в нептуниевой мишени в случае цилиндрического пучка протонов без сомнения связан с фактором слишком низкой средней плотности нептуния в области $5 < r < 20$ см. Это обстоятельство приводит к тому, что большая доля протонов, пройдя через всю мишень, сохраняет значительную часть своей первоначальной энергии.

Т а б л и ц а 1. Нормированное на 1 протон от ускорителя интегральное по мишеням и бланкету число первичных нейтронов и первичных делений

Форма пучка протонов	Система	Зона	Число первичных		
			нейтронов с $E_{II} \geq 15$ МэВ	нейтронов с $E_{II} < 15$ МэВ	делений
Цилиндр	Нептуниевая мишень и бланкет	Мишень	1,79	13,54	$3,97 \pm 0,2$
		Бланкет	0,63	0,93	$2,45 \pm 0,1$
	Ториевая мишень и бланкет	Мишень	3,35	22,6	$0,73 \pm 0,04$
		Бланкет	0,71	0,92	$3,69 \pm 0,2$
Осевой шнур	Нептуниевая мишень и бланкет	Мишень	3,59	24,4	$9,6 \pm 0,5$
		Бланкет	0,73	0,95	$2,9 \pm 0,15$
	Ториевая мишень и бланкет	Мишень	3,62	25,5	$0,95 \pm 0,05$
		Бланкет	0,66	0,92	$3,69 \pm 0,2$

Таким образом, для выбранной конфигурации нептуниевой мишени данные об абсолютном выходе реакций в системе, относящиеся к варианту цилиндрического пучка протонов, не являются представительными.

Отмеченного недостатка нет в варианте системы с пучком протонов в форме тонкого осевого шнура. Именно по этому варианту сравнивалась эффективность систем с различными мишенями.

Результаты расчета коэффициентов нейтронной связи между секциями рассматриваемых систем приведены в табл. 2. Следует отметить, что замена графитового слоя толщиной 20 см, окружающего мишень, слоем бериллия такой же толщины, но с плотностью в 2 раза ниже нормальной не изменила коэффициентов связи k_{12} , k_{21} в системе с нептуниевой мишенью. По всей видимости, и полное изъятие этих слоев замедлителя не приведет к заметному изменению коэффициентов связи. Это объясняется тем, что в бланкете и без указанных слоев имеется достаточное количество замедлителя.

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты связи между секциями в системах с нептуниевой, ториевой и урановой мишенями

Система	k_{12}	k_{21}
Нептуниевая мишень и бланкет	$(1,7 \pm 0,17) 10^{-4}$	$0,34 \pm 0,06$
Ториевая мишень и бланкет	$(7,4 \pm 0,6) 10^{-6}$	$0,29 \pm 0,06$
Урановая мишень и бланкет	$0,039 \pm 0,004$	$0,44 \pm 0,005$

Тотальный коэффициент размножения в системе k , полное число делений P_1 , P_2 в мишени и плутонии blankets определялись аналитически посредством решения уравнений для связанных реакторных систем. Расчет k и P_1 , P_2 с помощью программ Монте-Карло не мог быть выполнен по причине крайне плохой статистики подобных расчетов. Это затруднение обусловлено малостью коэффициента связи k_{12} при значительности размножения нейтронов в каждой секции.

Удалось тем не менее рассчитать по программе Монте-Карло вклад в P_1 , P_2 первых шести поколений нейтронов. Этот расчет потребовался для оценки надежности аналитического решения. На стадии первых поколений могут наблюдаться значительные отклонения реальных пространственных распределений нейтронов в секциях от распределений по собственным функциям, что не учитывается в аналитическом решении. Такие расчеты, выполненные для одного варианта входных параметров системы с нептунием и системы с торием, показали, что аналитически полученные P_1 , P_2 заметно отличаются от их более точных численно-аналитических значений. При определении P_1 , P_2 в случае других входных параметров использовалось аналитическое решение с введением коррекции на указанное отклонение аналитических P_1 , P_2 от их более точных численно-аналитических значений.

Прежде чем приводить полученные таким способом значения P_1 , P_2 , необходимо отметить, что вариант системы с нептуниевой мишенью при $k_1 = 0,9$, $k_2 = 0,928$ не является оптимальным в отношении P_2 . То, что именно этот вариант исследован наиболее полно, является обстоятельством в известной степени случайным, обусловленным ограниченной маневренностью при проведении расчетов Монте-Карло. По уровню достигаемого P_2 система с нептуниевой мишенью оптимальна при условии равенства k_1 и k_2 .

Оптимальные по k_1 , k_2 значения P_2 (и соответствующие им P_1) для систем с нептуниевой, ториевой и урановой мишенями и пучком протонов в форме осевого шнура представлены в табл. 3. Здесь же приведен коэффициент B , равный отношению оптимального P_2 в системе с нептуниевой или урановой мишенью к P_2 в системе с ториевой проектной мишенью. Как отмечалось, определение коэффициента B являлось главной целью изложенной работы.

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о высоком уровне перепада в коэффициентах нейтронной связи в системе blankets и мишени из нептуния. Примерно 10-кратный перепад в значениях k_{12} , k_{21} достигается за счет геометрического фактора (на это указывают данные расчета системы с урановой мишенью) и примерно 200-кратное — за счет порогости ^{237}Np . Показано многократное увеличение числа делений в плутонии blankets на 1 протон от ускорителя при замене проектной ториевой мишени на мишень из ^{237}Np .

Таким образом, полученные в работе данные подтверждают предсказываемые на основе теоретического анализа свойства двухсекционных blankets с вентильной нейтронной связью между секциями и высокую эффективность ^{237}Np в качестве средства обеспечения глубокой вентильности связи. Эти данные, полученные непосредственно для электроядерного устройства в проекте АВС, с проектными параметрами blankets, пучка протонов и близкой к проектной конфигурацией мишени, свидетельствуют о возможности значительного снижения требований к мощности ускорителя за счет замены ториевой мишени на размножающую мишень из порогового делящегося вещества — ^{237}Np . При полной подкритичности системы blankets и мишени 5%-ный переход к нептуниевой мишени позволит в 10 раз снизить мощность ускорителя.

Т а б л и ц а 3. Значения P_1 , P_2 и коэффициента B в системе с ториевой мишенью и в оптимальных по k_1 , k_2 системах с нептуниевой и урановой мишенями в зависимости от k -тотального коэффициента размножения нейтронов (пучок протонов в форме осевого шнура)

Система	k	Оптимальные значения k_1 , k_2	P_1	P_2	$B = P_2/P_1$ (Th)
Нептуниевая мишень и бланкет	0,93	$k_1 = k_2 = 0,9225$	129	548	8,1
	0,95	$k_1 = k_2 = 0,9425$	166	985	10,4
	0,97	$k_1 = k_2 = 0,9625$	262	2330	14,7
	0,99	$k_1 = k_2 = 0,9825$	660	12400	26,2
Урановая мишень и бланкет	0,93	$k_1 = 0,784$; $k_2 = 0,812$	80,7	205	3,04
	0,95	$k_1 = 0,806$; $k_2 = 0,831$	109	301	3,2
	0,97	$k_1 = 0,825$; $k_2 = 0,852$	173	530	3,4
	0,99	$k_1 = 0,846$; $k_2 = 0,871$	482	1680	3,6
Ториевая мишень и бланкет	0,93	$k_1 = 0,035$; $k_2 = 0,93$	1,06	67,5	1
	0,95	$k_1 = 0,035$; $k_2 = 0,95$	1,06	94,8	1
	0,97	$k_1 = 0,035$; $k_2 = 0,97$	1,06	158	1
	0,99	$k_1 = 0,035$; $k_2 = 0,99$	1,06	473	1

Из результатов работы следует также, что рассмотренный наиболее простой вариант реализации двухсекционного электроядерного устройства в виде комбинации бланкета и размножающей мишени является, по-видимому, и наиболее эффективным. Указанное преимущество этого варианта, как следует из анализа полученных численных данных, обусловлено отсутствием в нем потерь первичных нейтронов и геометрическим фактором малости размеров 1-й секции (мишени).

Данные свидетельствуют и о негативном последствии перехода к размножающей мишени — о сильном возрастании ее мощности в сравнении с мощностью проектной ториевой мишени. Это означает, что замена ториевой мишени на нептуниевую потребует серьезной интенсификации режима ее охлаждения.

Работа выполнена по контракту с Аэрокосмической корпорацией Грумман (США) № 53-46726 от 07.02.94 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bowman C., Toevs J., Arthur E. e.a. ABC Concept Presentations. The Los Alamos Accelerator Based Conversion Concept for Plutonium Disposition (ABC). JASON Review, La Jolla, CA, January 18, 1994.
2. Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет перехода к многосекционной структуре бланкета. — Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 71—77.
3. Avery R. Theory of coupled reactors. — In: Proc. of the Second United Nations Intern. Conf. on the peaceful uses of Atomic energy, held in Geneva 1—13 Sept., 1958, v. 12, p. 182—191.
4. Гребенкин К.Ф. Об одной возможности улучшения параметров электроядерного реактора: Препринт ВНИИТФ, № 41, 1993.
5. Донской Е.Н., Ельцов В.А., Житник А.К. и др. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1993, вып. 2, с. 61—64.