

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ В ДУБНЕ (ПСД) ДО 100 кВт

*С. А. Петроченков*<sup>а,1</sup>, *А. Полянски*<sup>а,б</sup>, *В. Н. Швецов*<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт ядерных проблем, Свек, Польша

Представлены результаты моделирования методом Монте-Карло экспериментальной электро-ядерной системы, управляемой ускорителем, состоящей из подкритической сборки и фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Проектная тепловая мощность подкритической сборки в Дубне (ПСД) составляет 30 кВт. Рассматривается возможность увеличения мощности установки при помощи средств, не меняющих концепции и основных составных элементов. Предлагаемая модификация установки дает увеличение мощности до 100 кВт и основана на операциях, одинаково доступных как до, так и после вывода установки на номинальную мощность с частичным выполнением основной экспериментальной программы.

We present the results of Monte-Carlo modeling of the experimental accelerator-driven electronuclear system composed of the subcritical assembly and DLNP JINR Phasotron. The expected thermal power of the subcritical assembly in Dubna (SAD) is about 30 kW. The possibility of assembly power increase without changes in design and basic elements is considered. The proposed assembly upgrade gives power increase up to 100 kW. It is of importance that proposed upgrade operations can be performed both before and after the run with nominal power and partial fulfillment of a basic experimental program.

PACS: 28.50.Dr; 28.50.Qd; 28.41; 28.52

### ВВЕДЕНИЕ

Идея получать энергию в реакциях деления урана и тория под действием потока быстрых нейтронов, рождающихся и размножающихся в мишени, облучаемой пучком ускоренных частиц, протонов или дейтронов, возникла почти одновременно с запуском первых промышленных реакторов деления на тепловых нейтронах. Такие системы обладают рядом преимуществ: безопасностью эксплуатации, возможностью переработки тория и запасов <sup>238</sup>U и оружейного Pu. Подкритические системы с коэффициентом размножения  $K_{\text{eff}} \simeq 0,95-0,97$  надежно управляются варьированием тока ускорителя, совершенно безопасны и не требуют специальных дорогостоящих устройств обеспечения безопасности, которые по принятым стандартам являются обязательными для всех

---

<sup>1</sup>E-mail: petrotch@jinr.ru

установок с  $K_{\text{eff}} \geq 0,98$  [1]. Моделирование различных типов электроядерных систем и компонентов на этапе подготовки проекта ПСД представлено в [2–5].

На базе ОИЯИ планируется строительство электроядерной установки, состоящей из действующего фазотрона ЛЯП и бланкета размножающего подкритического с мишенью (БРПМ) [6]. Бланкет представляет собой набор тепловыделяющих сборок (ТВС), расположенных вокруг мишени. Проект БРПМ [6] разработан с учетом возможности замены мишени и перегрузки ТВС с целью расширения экспериментальной программы и поиска наиболее оптимальной конструкции и материалов.

## 1. БАЗОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПСД

В проекте [6] заложены следующие основные параметры ПСД:

Мощность пучка протонов, падающего на мишень, кВт ( $I = 1,52$ мкА)	1,0
Направление ввода пучка в мишень	Вертикальное, снизу
Диаметр пятна протонного пучка на мишени, мм	Не более 30
Топливная композиция, %	(70,5 $\text{UO}_2 + 29,5 \text{PuO}_2$ )
Содержание $^{235}\text{U}$ в уране, % (масс.)	0,4
Плотность топлива (расчетная), г/см <sup>3</sup>	10,2
Коэффициент размножения	$\approx 0,95$
Материал мишени	Свинец
Охлаждение бланкета	Принудительное воздушное
Охлаждение мишени	Принудительное воздушное

Геометрические параметры ТВЭЛ и ТВС:

Диаметр ТВЭЛ (по оболочке), мм	6,9
Внешний диаметр топливной таблетки, мм	5,95
Высота топливной части ТВЭЛ, мм	580
Шаг ТВЭЛ по треугольной решетке, мм	7,95
Количество ТВЭЛ в ТВС	18
Максимальное количество ТВС в сборке	141
Масса МОХ-топлива в одном ТВЭЛе, г	164,5
Масса МОХ-топлива для полной загрузки, кг	417,45

Требуемый уровень коэффициента размножения  $K_{\text{eff}} = 0,95$  достигается при загрузке 133 ТВС (393,8 кг) в активную зону, остальные восемь ТВС заменяются свинцовыми призмами.

Свинцовая мишень ( $\Omega_1 + \Omega_2$ ) состоит из двухмиллиметрового нержавеющей кожуха, представляющего собой конструкцию, имитирующую по внешнему профилю сборку из семи шестигранных призм размером «под ключ» 34 мм, установленных с шагом 36 мм (см. рис. 1), и герметично сваренных с ним донышка и крышки, также выполненных из нержавеющей стали. В точке ввода пучка в мишень для создания оптимальных условий генерирования нейтронов выполнена цилиндрическая полость диаметром 58 мм и глубиной 179 мм. Вокруг мишени расположены 12 свинцовых блоков ( $\Omega_3$ ). Шестигранный

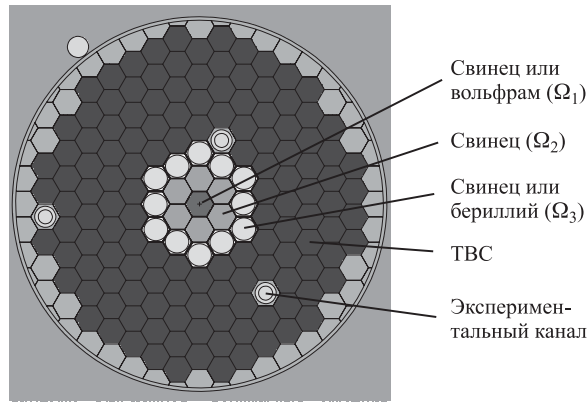


Рис. 1. Схема бланкета

свинцовый блок состоит из шестигранной нержавеющей трубы с размером «под ключ» 35 мм с внутренним диаметром 33 мм и герметично приваренными к ней хвостовиком и крышкой, выполненными также из нержавеющей стали. Внутренняя полость блока заливается свинцом. Масса мишени 52 кг, свинцового блока 7,7 кг.

## 2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ВАРИАНТЫ МОДИФИКАЦИИ

Мощность установки напрямую связана с коэффициентом размножения (см. рис. 2), который у базовой установки составляет 0,95, однако возможно повышение до  $K_{eff} < 0,98$  без ввода каких-либо специальных устройств обеспечения безопасности и разрешений со стороны контролирующих организаций. Повышение  $K_{eff}$  достигается добавлением ТВС в бланкет до максимально допустимого количества (141), либо заменой свинцовых блоков на аналогичные конструкции из бериллия (см. рис. 1), либо реструктуризацией бланкета с заменой свинцовых блоков, окружающих мишень, на ТВС. В последнем случае общее количество топлива не увеличивается, так как на место свинцовых блоков переставляются ТВС с периферии.

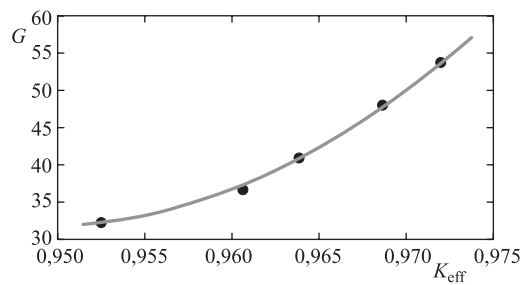


Рис. 2. Зависимость энергетического выхода от коэффициента размножения

Отметим, что первый из вышеперечисленных вариантов в реальности может оказаться неприменимым, поскольку возможность увеличения массы делящегося вещества запроектирована разработчиками на случай, если рассчитанного количества ТВС (133), необходимого для выхода на уровень подкритичности  $K_{\text{eff}} \simeq 0,95$ , окажется недостаточно.

*Таблица 1. Энерговыведение (Вт) в частях различных мишеней при мощности пучка 1 кВт*

Область	Мишень	
	Pb + Pb + Pb	W + Pb + Pb
$\Omega_1$	463	586
$\Omega_2$	158	92
$\Omega_3$	88	78
Всего	709	756

Поскольку бланкет, по сути дела, является «усилителем» энергии, поданной на мишень, то мощность прямо зависит от интенсивности протонного пучка: удвоение интенсивности приводит к удвоению числа делений в активной зоне. Однако повышение тока пучка ведет к повышению энерговыведения в мишени. Так как нагрев мишени происходит в основном за счет ионизационных потерь протонов, падающих на мишень, т. е. нагревается центральная часть мишени по профилю падающего пучка [7], то проблема охлаждения легко решается добавлением сердечника из вольфрама, обладающего высокой плотностью и высокой температурой плавления, в мишень. Конечно, форма и профиль вольфрамового сердечника могут быть различными при условии, что большая часть протонов прореагирует в вольфраме, однако в расчетах объем центральной шестигранной призмы ( $\Omega_1$ ) полностью заполнялся вольфрамом (см. рис. 1). Результаты расчетов энерговыведения в мишени представлены в табл. 1.

### 3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ В РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ

В результате комбинирования различных методик повышения мощности мы остановились на двух вариантах. В первом случае 12 свинцовых блоков, окружающих мишень, заменяются на аналогичные конструкции из бериллия, используется комбинированная мишень с вольфрамовым сердечником для снижения тепловой нагрузки на свинец и бериллий. В результате без замены базового набора ТВС, а следовательно, и массы делящегося вещества  $K_{\text{eff}}$  повышается до 0,974. Во втором случае ТВС с периферии бланкета переставляются на место свинцовых блоков, окружающих мишень, а на место удаленных ТВС вставляются свинцовые вытеснители. Таким образом, для повышения  $K_{\text{eff}}$  до уровня 0,974 требуется на одну ТВС меньше, чем в базовой установке.

Моделирование энерговыведения и нейтронных спектров в экспериментальных каналах проводилось при помощи программы mspnx [8]. Результаты расчетов мощности системы для различных бланкетов и различных уровней подкритичности представлены в табл. 2.

Таблица 2. Энерговыведение (Вт) в электроядерной установке для различных мишеней

Параметры	Состав blankets		
	Pb + Pb + Pb + ТВС (базовый)	W + Pb + Pb + ТВС	W + Pb + ТВС
Количество ТВС	133–141	133	132
$K_{\text{eff}}$	0,95–0,972	0,974	0,974
Коэффициент усиления	30–50	51	57
Мощность пучка, кВт	1	2	2
Мощность установки, кВт	30–50	102	114

#### 4. СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ

Хорошо известно (см., например, [9]), что для трансмутации радиоактивных отходов требуются мощные потоки нейтронов с различной энергией, поэтому особое внимание в расчетах следует уделять спектральным характеристикам плотности потока нейтронов. При помощи внутреннего бериллиевого отражателя удается существенным образом изменить форму спектра нейтронов в экспериментальных каналах. На рис. 3 представлено сравнение результатов моделирования спектров нейтронов в экспериментальном канале, расположенном непосредственно около мишени для базового варианта blankets (протонный пучок мощностью 1 кВт) и для двух обсуждаемых выше модификаций (2 кВт).

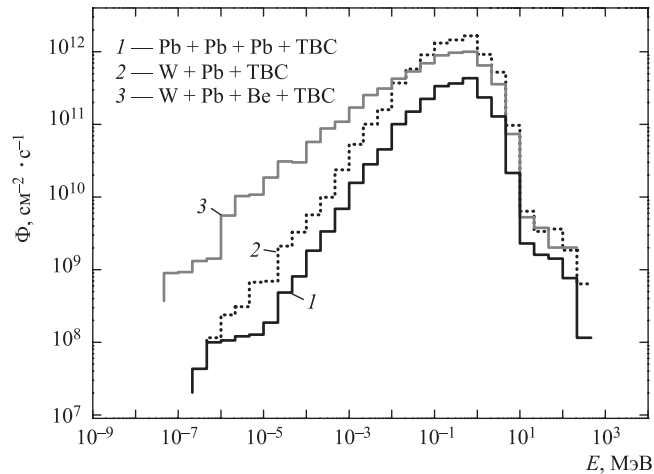


Рис. 3. Поток нейтронов в бине по энергии в экспериментальном канале, расположенном непосредственно около мишени, для различных вариантов модификации blankets. Мощность протонного пучка для базового варианта blankets 1 кВт, для модифицированных 2 кВт

В табл. 3 приведены интегральные значения потока нейтронов в экспериментальных каналах в активной зоне blankets и в отражателе. Как видно из таблицы, предложенные изменения позволяют существенно повысить полный поток нейтронов в экспериментальных каналах.

**Таблица 3. Полный поток нейтронов в экспериментальных каналах ( $10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Нумерация экспериментальных каналов ведется от центра активной зоны к периферии**

Канал	Состав blankets, мощность протонного пучка		
	Pb + Pb + Pb + ТВС (базовый), 1 кВт	W + Pb + Pb + ТВС, 2 кВт	W + Pb + ТВС, 2 кВт
№1	2,10	6,76	8,18
№2	1,98	5,81	7,21
№3	1,70	5,02	6,28
№4	1,41	4,16	5,15
№5	1,12	3,30	3,84
№6	0,92	2,71	3,30

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате операций, описанных в настоящей работе и доступных как до, так и после частичного выполнения экспериментальной программы, удастся добиться существенного увеличения как полного потока, так и плотности потока в различных областях спектра нейтронов. Следует отметить, что проведение подобных перегрузочных работ по реструктуризации базового blankets не выходит за рамки проекта [6]. Описанные модификации расширяют возможности экспериментального изучения вопросов трансмутации долгоживущих продуктов деления и минорных актинидов, а также проблем применения электроядерного способа получения энергии в промышленных масштабах, что, в свою очередь, является первостепенной задачей проекта ПСД.

Один из авторов (П. С. А.) выражает благодарность профессору И. В. Пузынину и профессору С. И. Виницкому за помощь в работе и обсуждение результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барашенков В. С. и др.* Физические аспекты электроядерной установки на основе подкритической зоны реактора ИБР-30 и 660 МэВ протонного фазотрона. Сообщ. ОИЯИ Р2-98-74. Дубна, 1998. 24 с.
2. *Петроченков С. А.* Моделирование эволюции активности свинцовой мишени подкритической сборки // Вестн. РУДН. Сер. «Прикладная и компьютерная математика». 2005. Т.4, №1. С. 115–121.
3. *Polanski A.* Monte Carlo Modeling of Electronuclear Processes in Experimental Accelerator Driven Systems // Acta Phys. Polon. B. 2000. V. 11, No. 1. P. 95.
4. *Barashenkov V. S., Puzynin I. V., Polanski A.* Mathematical Experiments with Electronuclear Systems // J. Comp. Meth. Sci. Eng. 2002. V. 2, No. 1–2. P. 5–11.
5. *Petrochenkov S. A., Polanski A., Puzynin I. V.* Mathematical Modeling of Parameters of Subcritical Assembly in Dubna (SAD). JINR Commun. P11-2005-77. Dubna, 2005. 8 p.

6. *Третьяков И. Т. и др.* Бланкет размножающий подкритический с мишенью. Пояснительная записка. НИКИЭТ, 2004.
7. *Барашенков В. С. и др.* Мишени электроядерных установок // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 4(127). С. 66–73.
8. *Hughes H. G., Prael R. E., Little R. C.* MCNPX. The LANET/MCNP Code Merger. LAND document LA-UR-97-4891. LANL, 1997.
9. *Salvatores M., Slessarev I., Tchistiakov A.* Nuclear Power Development and Hybrid System Pole // Proc. of the Second Intern. Conf. on ADTTA, Kalmar, Sweden, June 3–7, 1996. P. 169–178.

Получено 21 февраля 2006 г.