

P11-2005-77

С. Петроченков, А. Поляньски, И. Пузынин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ ПСД (SAD)**

Петроченков С., Поляньски А., Пузынин И. P11-2005-77
Моделирование параметров подкритической сборки ПСД (SAD)

Предлагаемый концептуальный проект экспериментальной подкритической сборки в Дубне (ПСД, по-английски SAD) основан на применении МОХ-топлива в активной зоне с тепловой мощностью 25 кВт. Это соответствует коэффициенту размножения $k_{\text{эфф}} = 0,95$ и мощности пучка ускорителя 1 кВт. Для выбора оптимальных параметров установки для планирующихся экспериментов была смоделирована подкритическая сборка, управляемая существующим в ОИЯИ протонным ускорителем на энергию 660 МэВ. Для расчета нейтронных спектров, энерговыделения и эффективной дозы использовалось моделирование методом Монте-Карло. Некоторые результаты представлены в работе.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Перевод авторов

Petrochenkov S., Polanski A., Puzynin I. P11-2005-77
Modeling of Parameters of Subcritical Assembly SAD

The accepted conceptual design of the experimental Subcritical Assembly in Dubna (SAD) is based on the MOX core with a nominal unit capacity of 25 kW (thermal). This corresponds to the multiplication coefficient $k_{\text{eff}} = 0.95$ and accelerator beam power 1 kW. A subcritical assembly driven with the existing 660 MeV proton accelerator at the Joint Institute for Nuclear Research has been modelled in order to make choice of the optimal parameters for the future experiments. The Monte Carlo method was used to simulate neutron spectra, energy deposition and doses calculations. Some of the calculation results are presented in the paper.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Comminucation of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

В ОИЯИ создается демонстрационная экспериментальная электроядерная установка на базе ускорителя — фазотрона ЛЯП ОИЯИ, в которой в качестве тепловыделяющих элементов (твэлов) подкритической сборки выбраны серийно выпускаемые в России МОХ-твэлы реактора БН-600. Маломощный протонный пучок (максимальный ток 3,2 мкА) и, соответственно, выход нейтронов из свинцовой мишени определяют полную тепловую мощность установки. Эффективный коэффициент размножения установки ограничен величиной 0,95. Установка является прототипом будущих подкритических реакторов промышленного масштаба.

В работе представлены результаты расчетов различных параметров проектируемой подкритической сборки в Дубне (далее ПСД), а именно: спектры и количество нейтронов и протонов, вылетающих из свинцовой мишени; спектры нейтронов в вертикальных и горизонтальном каналах; спектры нейтронов, вылетающих с поверхности свинцового отражателя ПСД; энерговыделение в мишени и в активной зоне (АЗ); время жизни нейтронов. Расчет энерговыделения обусловлен необходимостью проектирования системы охлаждения установки. Спектры нейтронов в экспериментальных каналах служат для определения характеристик подкритической сборки с точки зрения планируемых научных экспериментов — определения скорости трансмутации образцов минорных актинидов и продуктов деления, размещенных в этих каналах. Спектры нейтронов, вылетающих с поверхности свинцового отражателя, необходимы для расчетов в качестве источника нейтронов для определения толщины бетонной защиты в разных помещениях проектируемой установки.

СПЕКТРЫ И КОЛИЧЕСТВО НЕЙТРОНОВ И ПРОТОНОВ, ВЫЛЕТАЮЩИХ ИЗ СВИНЦОВОЙ МИШЕНИ

Для расчетов использовалась модель свинцовой мишени радиусом 8,24 см и длиной 60 см.

В табл. 1 представлены результаты расчетов выхода нейтронов из свинцовой мишени с использованием разных моделей (Бертини, каскадно-экситонной модели) и библиотек сечений (ENDF6, LA150). Расчеты сделаны с использованием MCNPX-кода [3].

Как видно из таблицы, максимальное количество нейтронов получается при использовании каскадной модели Бертини (BER) и испарительной модели Резерфорда и набора сечений для нейтронов при энергии ниже 20 МэВ (ENDF6). А минимальное количество нейтронов получается при использова-

Таблица 1. Сравнение выхода нейтронов из свинцовой мишени

Модель и библиотека	Число нейтронов на один протон
CEM ENDF6	11,77
BER ENDF6	13,38
BER LA 150	11,84
CEM LA150	10,21

нии каскадно-экситонной модели (CEM) и библиотеки сечений для протонов и нейтронов при энергии ниже 150 МэВ (LA150).

Результаты расчета нейтронных и протонных спектров на поверхности свинцовой мишени, при использовании CEM и ENDF6, представлены на рис. 1.

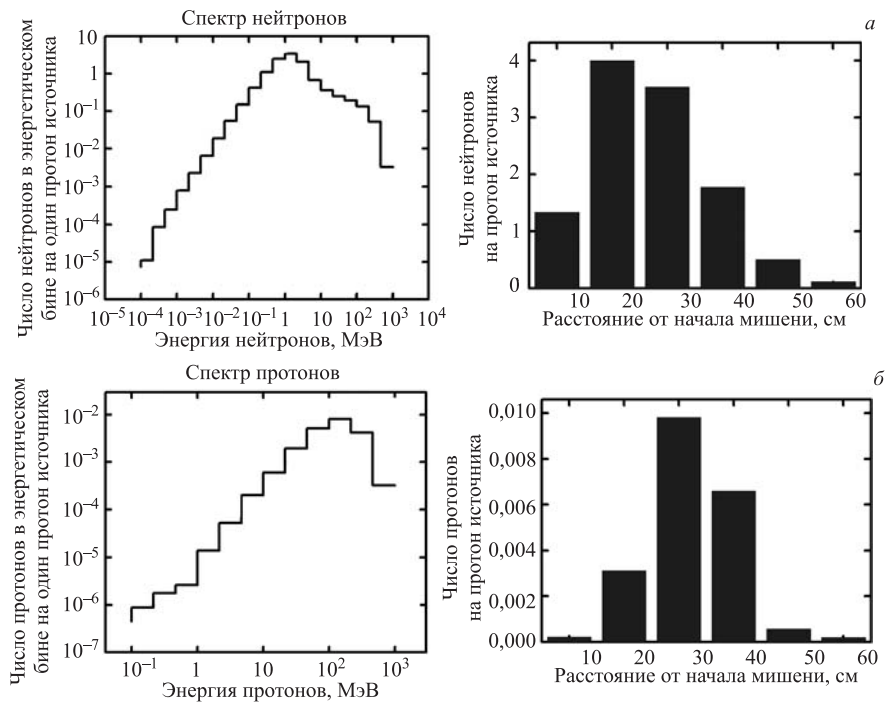


Рис. 1. Спектры нейтронов (а) и протонов (б), выходящих из свинцовой мишени

Расчеты были проведены для цилиндрической мишени, разбитой на шесть цилиндрических сегментов высотой 10 см. В точке ввода пучка в мишень есть вакуумный канал глубиной 10 см. Как видно из рисунка, максимальный выход нейтронов получается с поверхности сегмента, находящегося на расстоянии 10–20 см от начала мишени, а минимальный — на конце мишени. Соответственно, максимальный выход протонов получается с поверхности сегментов, находящихся на расстоянии 20–40 см от начала мишени. На расстоянии более 40 см поток протонов резко падает, так как длина пробега протона с энергией 660 МэВ в свинце составляет 30 см.

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Расчеты проделаны для следующих основных параметров установки, заложенных в проекте [1]:

- мощность пучка протонов, падающего на мишень, — не более 1,0 кВт ($I = 1,52$ мкА);
- направление ввода пучка в мишень — вертикальное, снизу;
- диаметр пятна протонного пучка на мишени — не более 30 мм;
- топливная композиция — (70,5 % UO_2 + 29,5 % PuO_2);
- содержание ^{235}U в уране — 0,4 % (масс.);
- плотность топлива (расчетная) — $10,2$ г/см³;
- коэффициент размножения — $\approx 0,95$;
- тепловая мощность сборки — 25 кВт;
- материал мишени — Pb;
- охлаждение blankets — принудительное воздушное;
- охлаждение мишени — принудительное воздушное.

Геометрические параметры твэла и ТВС:

- диаметр твэла (по оболочке) — 6,9 мм;
- внешний диаметр топливной таблетки — 5,95 мм;
- высота топливной части твэла — 580 мм.
- шаг твэла по треугольной решетке — 7,95 мм;
- количество твэлов в ТВС — 18;
- максимальное количество ТВС в сборке — 141;
- масса МОХ-топлива в одном твэле — $\approx 164,5$ г;
- масса МОХ-топлива для полной загрузки — 417,45 кг.

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

На рис. 2 представлена схема активной зоны [2], принятой для расчета нейтронных характеристик в вертикальных экспериментальных каналах. В центре находится свинцовая мишень (серый цвет). Вокруг свинцовой мишени расположены топливные элементы с МОХ-топливом — это и есть активная зона (черный цвет). За активной зоной находится свинцовый отражатель (серый цвет).

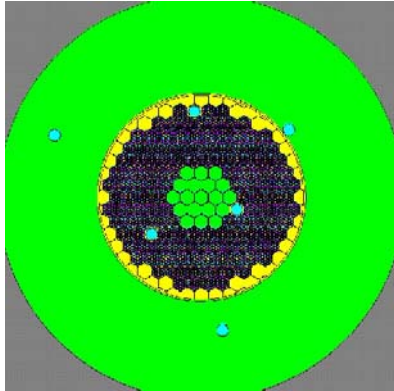


Рис. 2. Схематический вид подкритической сборки реактора

Расчеты сделаны в трех вертикальных экспериментальных каналах, которые находятся в активной зоне, и в трех каналах, расположенных в свинцовом отражателе (см. рис. 2). Результаты расчетов представлены на рис. 3, 4.

Как видно из рис. 3, характер спектра меняется от начала активной зоны до конца — количество высокоэнергетических нейтронов уменьшается от мишени к отражателю.

В свинцовом отражателе в области промежуточных энергий спектры нейтронов похожи, а разница наблюдается в области высоких энергий. Самый жесткий спектр наблюдается в канале, расположенном рядом с активной зоной.

В свинцовом отражателе в области промежуточных энергий спектры нейтронов похожи, а разница наблюдается в области высоких энергий. Самый жесткий спектр наблюдается в канале, расположенном рядом с активной зоной.

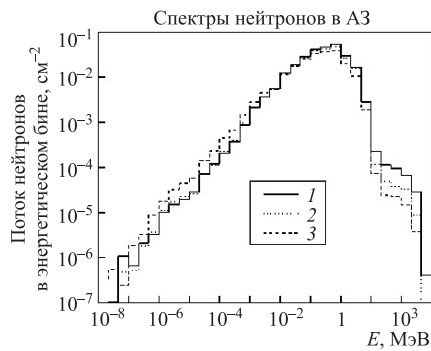


Рис. 3. Спектры нейтронов в активной зоне в трех экспериментальных каналах (1 — рядом с мишенью, 2 — в середине топливной части, 3 — рядом с отражателем)

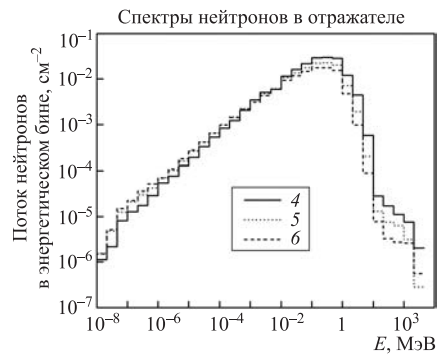


Рис. 4. Спектры нейтронов в свинцовом отражателе в трех экспериментальных каналах

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Для расчетов спектров нейтронов в горизонтальном канале использовалась модель, представленная на рис. 5.

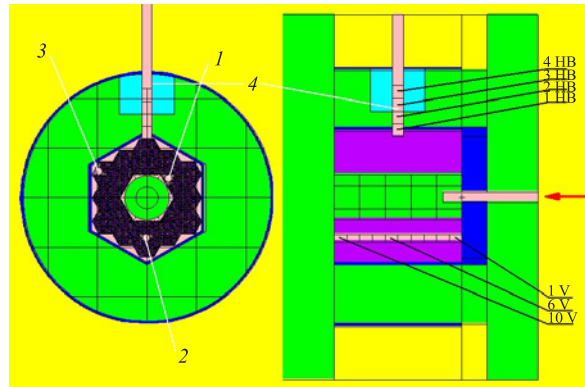


Рис. 5. Геометрия подкритической сборки, принятая для расчетов спектров нейтронов в горизонтальном канале для двух случаев — с бериллием вокруг канала и без него

Горизонтальный канал находится посередине активной зоны. Рассмотрены два варианта. Первый вариант: канал помещен в свинцовом отражателе. Второй вариант: канал окружен цилиндрическим бериллиевым блоком диаметром 10 см и высотой 10 см.

Сравнительные спектры нейтронов рассчитаны в цилиндрических сегментах горизонтального канала с бериллиевой вставкой (3НВ и 4НВ) и без нее (3Н и 4Н) (см. рис. 6).

Как видно из рис. 6, добавка бериллиевый вкладыша существенно меняет спектр нейтронов, и появляется дополнительный пик тепловых нейтронов. Поскольку бериллиевый вкладыш находится на конце свин-

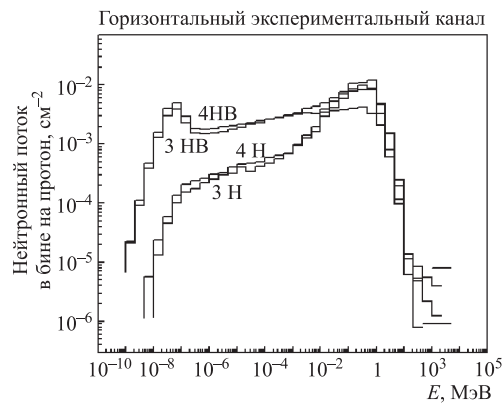


Рис. 6. Сравнение спектров нейтронов в горизонтальном канале с бериллиевой вставкой (3НВ и 4НВ) и без нее (3Н и 4Н)

цового отражателя, то он не сильно влияет на коэффициент размножения нейтронов, который для этого варианта получается также ниже 0,95.

Полный поток нейтронов на один протон в сегментах горизонтального канала:

$$\begin{aligned} 1Н &— 0,157 \text{ см}^{-2}; \\ 2Н &— 0,144 \text{ см}^{-2}; \\ 3Н &— 0,111 \text{ см}^{-2}; \\ 4Н &— 0,078 \text{ см}^{-2}. \end{aligned}$$

Интегральная по спектру величина полного потока нейтронов приблизительно равна $10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что позволяет исследовать скорости реакций трансмутации различных изотопов.

ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В СВИНЦОВОЙ МИШЕНИ И АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В табл. 2 представлены подробные результаты расчетов энерговыделения в конструкционных элементах активной зоны мишени.

Таблица 2. Результаты расчетов энерговыделения в конструкционных элементах (приведены только суммарные данные)

Наименование элемента	Энерговыделение	
	МэВ/протон	кВт*
Центральный свинцовый блок мишени	306	0,463636
6 свинцовых блоков, окружающих центральный блок	103	0,156061
Второй слой свинцовых блоков (12)	57,7	0,087424
Первый слой ТВС	2337,64	3,541879
Второй слой ТВС	3212,97	4,868136
Третий слой ТВС	3687,74	5,587485
Четвертый слой ТВС	4278,91	6,483197
Пятый слой ТВС	2986,25	4,524621
Полное энерговыделение в АЗ и мишени	16970,21	25,71244
*При пучке 1 кВт.		

Как видно из таблицы,

- энерговыделение в мишени 0,707 кВт;
- энерговыделение в активной зоне 25,005 кВт.

Из расчетов следует, что основное энерговыделение, вызванное делением в МОХ-топливе, происходит в активной зоне. Обращает на себя внимание относительно малое энерговыделение за счет ионизационных потерь и реакций расщепления в мишени по сравнению с вкладом низкоэнергетического деления в АЗ. Энерговыделение настолько мало, что предложенное воздушное охлаждение эффективно справляется с отводом выделяющегося тепла как в АЗ, так и в мишени. При взаимодействии протонов с воздухом появляется наведенная активность, рождаются радиоактивные изотопы аргона и бериллия, поэтому требуется обратить особое внимание на контроль и фильтрацию воздуха, выбрасываемого в атмосферу.

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ СНАРУЖИ ПСД

При облучении установки пучком протонов с энергией 660 МэВ из свинцового отражателя вылетает 108,53 нейтронов на один протон источника: 46,96 — с боковой цилиндрической поверхности, 34,75 и 26,82 — с нижней и верхней граней соответственно. На рис. 7–10 ниже представлено распределение выхода нейтронов из сегментов поверхностей отражателя, а также энергетические и угловые спектры выхода нейтронов со всех трех поверхностей.

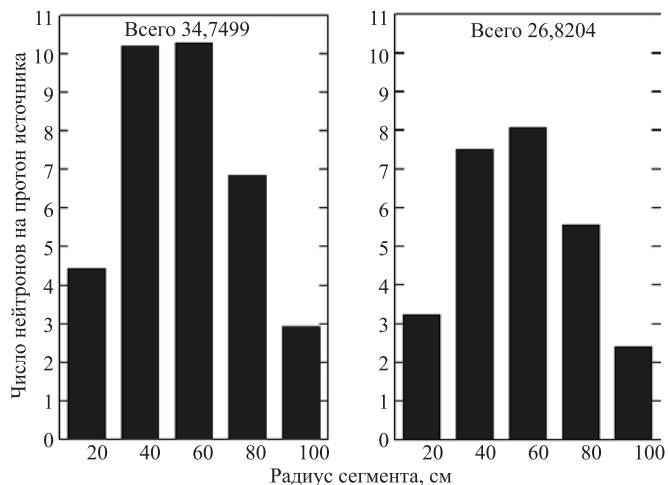


Рис. 7. Число нейтронов, вылетающих с нижней (слева) и верхней (справа) поверхности цилиндрического свинцового отражателя на разном радиальном расстоянии от оси цилиндра

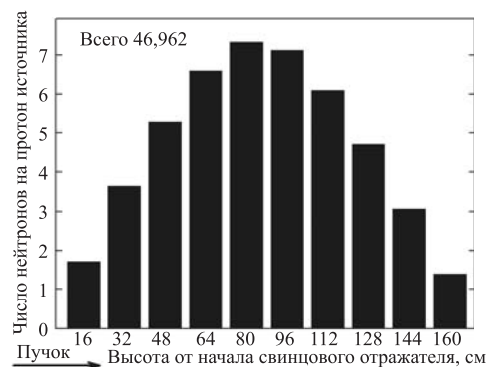


Рис. 8. Число нейтронов, вылетающих с боковой поверхности цилиндрического свинцового отражателя на разной высоте

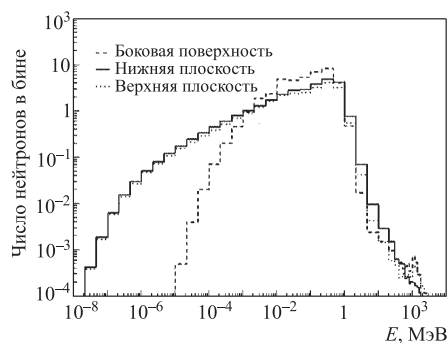


Рис. 9. Энергетические спектры нейтронов, вылетающих из свинцового отражателя с боковой, нижней и верхней поверхностей

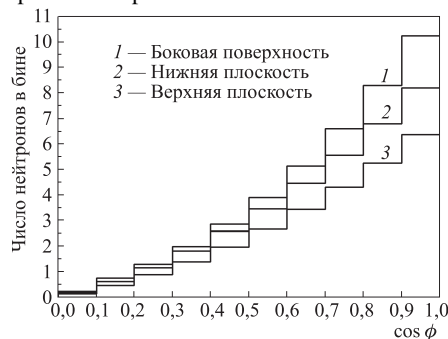


Рис. 10. Угловые распределения нейтронов, вылетающих с боковой, нижней и верхней поверхностей свинцового отражателя. Угол ϕ отсчитывается от нормали поверхности

ЛИТЕРАТУРА

1. Construction of the Subcritical Assembly with Combined Neutron Spectra Driven by Proton Accelerator at Proton's Energy 660 MeV for Experiments on Long Lived Fission Products and Minor Actinides transmutation. Project Manager: Shvetsov V. N.; Leading Institution: JINR (Joint Institute of Nuclear Research) (Dubna, Moscow reg.) Project ISTC 2267, 2003.
2. *Третьяков И. И. и др.* Основные концептуальные положения установки SAD. М.: НИКИЭТ, 2001.
3. *Hughes H. G., Prael R. E., Little R. C.* MCNPX. The LANET/MCNP Code Merger. X-Division Research Note XTM-RN(U)97-012. LA-UR-97-4891, Los Alamos National Laboratory (April 1997).

Получено 1 июня 2005 г.

Редактор *Е. В. Калинин*

Подписано в печать 2.08.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,69. Тираж 310 экз. Заказ № 54982.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/