

УДК 621.384.664

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО НЕЙТРОННЫХ СПЕКТРОВ В ОБЛУЧАЕМОЙ ПРОТОНАМИ U/Pb-СБОРКЕ

© 2002 г. А. Н. Соснин¹, М. И. Кривоустов¹, Д. Чултем¹, М. Замани², М. Манолопулу², Р. Одой³, В. Вестмайер⁴, Х. Роботам⁴, Р. Брандт⁵, П. Фатер⁵, С. Р. Хашеми-Нежад⁶

Нейтронные спектры в U/Pb-сборке, облучаемой протонами, оценены посредством моделирования процесса методом Монте-Карло. Исследование выполнено в рамках проекта “Энергия плюс трансмутация”, реализуемого на протонных пучках синхрофазотрона/нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ. Обсуждается пространственное распределение плотности потока нейтронов.

За последние годы большое внимание во всем мире уделяется разработке безопасных методов производства ядерной энергии и изучению возможности одновременного решения проблемы утилизации долгоживущих радиоактивных отходов современной ядерной энергетики. В качестве одного из таких методов рассматривается электроядерный метод генерации нейтронов с последующей утилизацией этих нейтронов в подкритических сборках (см., например, [1]). Установки такого типа обычно включают в себя достаточно мощный ускоритель протонов (энергия протонов около 1 ГэВ, ток протонов порядка 10 мА), первичную мишень, конвертирующую протонный пучок в поток вторичных нейтронов (как правило, рассматривают мишени, состоящие из тяжелых элементов, таких как свинец, висмут, или вольфрам) и подкритический бланкет (или, другими словами, массивная оболочка, состоящая из делящихся материалов с низким обогащением, коэффициент размножения нейтронов в таких бланкетах может достигать значения $k_{eff} \approx 0.98$).

В этой связи в ОИЯИ проведен целый ряд экспериментов на пучках синхроциклотрона и синхрофазотрона по облучению больших мишеней из средних и тяжелых элементов для изучения характеристик первичных мишеней электроядерных установок [2–8]. Однако следует подчеркнуть, что эксперименты с использованием гетерогенных композиций мишеней и бланкетов, состоящих из делящихся веществ, существенно отличаются от облучений протяженных мишеней, направленных на изучение генерации вторичных нейтронов. Именно поэтому в 1999–2001 гг. в Лаборато-

рии высоких энергий ОИЯИ была принята программа “Энергия плюс трансмутация” и были проведены пробные облучения модель гибридной электроядерной установки, содержащей свинцовую цилиндрическую мишень и бланкет из естественно-го урана. Как мишень, так и бланкет были разбиты на секции, что позволило разместить детекторы, регистрирующие нейтроны и осколки деления, на поверхности и по объему мишени. Секции бланкета представляли собой два гексагональных контейнера, заполненных стержнями, изготовленными из природного урана, упакованного в тонкую алюминиевую оболочку. Каждый стержень имеет массу 1.72 кг, диаметр 3.6 см и длину 10.4 см. Каждая секция бланкета содержала 30 таких стержней, общая масса урана в бланкете составила 103 кг. В центре этих секций располагается свинцовая мишень диаметром 8.4 см и длиной 52 см. Уран-свинцовая сборка окружена биологической защитой, состоящей из слоев кадмия и свинца, и 1 м³ гранулированного полиэтилена. Уран-свинцовая сборка облучается протонами с энергией 1.5 ГэВ. Методические вопросы, связанные с конструкцией установки и с проведением этих экспериментов подробно обсуждаются в [2].

Экспериментальные спектры нейтронов измерялись с помощью набора пороговых активационных и твердотельных ядерных трековых детекторов [2]. В частности, активационные детекторы были размещены на центральной детекторной пластине, устанавливаемой между секциями бланкета, на расстоянии 7.5 см от оси пучка, твердотельные трековые детекторы располагались вдоль радиуса секции на расстояниях 1, 3, 6, 8.5, 11, 13.5 см. Одна из целей и задач этой экспериментальной программы – получение данных для модернизации компьютерных кодов [8–11].

Для того чтобы получить предварительные данные о полях вторичных частиц в различных частях мишени и бланкета такой установки, в том числе о множественности и спектре нейтронов, нами были проведены расчеты с использованием дуб-

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

²Aristotle University, Thessaloniki, Greece.

³FZ Juelich, Germany.

⁴GKS, Moelln/Marburg, Germany.

⁵Philipps University, Marburg, Germany.

⁶Sydney University, Australia.

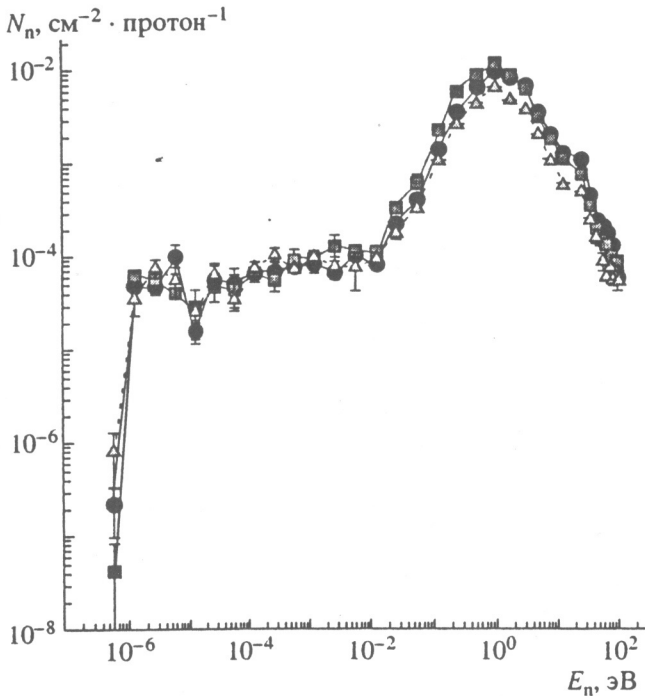


Рис. 1. Расчетный спектр нейтронов в плоскости центральной детекторной пластины установки “Энергия плюс трансмутация” [2] на расстоянии $R = 7.5$ см от оси симметрии уран-свинцовой сборки. Приведена зависимость от длины L первичной свинцовой мишени, выступающей за пределы переднего торца уранового бланкета навстречу падающему пучку протонов с энергией 1.5 ГэВ. Спектр нормирован на один налетающий первичный протон и на единицу площади поверхности. Обозначения на рисунке: ● – $L = 5$, ■ – 10 , ▲ – 15 см.

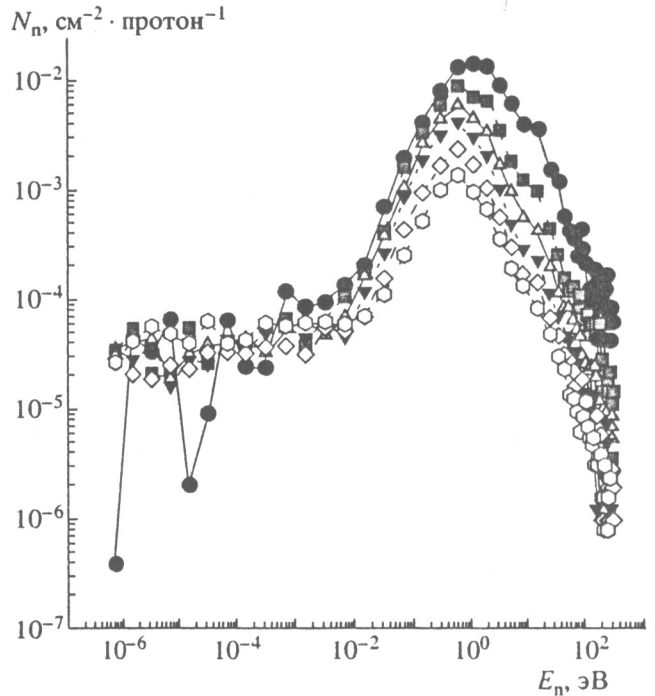


Рис. 2. Расчетный спектр нейтронов в плоскости центральной детекторной пластины установки “Энергия плюс трансмутация” [2]. Приведена радиальная зависимость на различных расстояниях R от оси симметрии уран-свинцовой сборки, облучаемой протонами с энергией 1.5 ГэВ. Спектр нормирован на один налетающий первичный протон и на единицу площади поверхности. Обозначения на рисунке: ● – $R = 1$, ■ – 3 , ▲ – 6 , ▼ – 8.5 , ◇ – 11 , ○ – 13.5 см.

ненской каскадной модели [11] в следующем приближении. Нами рассматривалась приближенная форма секций бланкета, в расчетах гексагональные секции были заменены эквивалентными по объему цилиндрами. Считалось, что материал бланкета гомогенно распределен по объему. Наличие воздушных зазоров в стыках между стержнями было учтено соответствующей поправкой плотности материалов, входящих в состав бланкета. В расчетах учтено наличие биологической защиты, схема размещения которой приведена в [2]. Расчеты позволили оценить зависимость плотности потока нейтронов от относительного положения свинцовой мишени и уранового бланкета и определить оптимальное взаимное расположение основных частей установки. На рис. 1 показано распределение плотности потока нейтронов в зазоре между секциями бланкета на расстоянии 7.5 см от оси сборки в зависимости от длины L той части свинцовой первичной мишени, которая выступает из бланкета вперед относительно протонного пучка. Из рисунка видно, что зависимость плотности потока нейтронов от этого параметра слабая, тем не менее, из соображения оптимального использования энергии пучка протонов, выглядит предпочтительным уста-

новление мишени так, чтобы примерно 5–10 см свинцовой мишени выступали за пределы переднего торца уранового бланкета навстречу протонному пучку.

Кроме того, расчеты позволили оценить радиальное распределение плотности потока нейтронов в бланкете установки. На рис. 2 приведена радиальная зависимость плотности потока нейтронов от расстояния между осью симметрии установки и местом регистрации в зазоре между секциями мишени и бланкета. Видно, что в целом спектр нейтронов оказывается весьма жестким, причем спад плотности потока нейтронов – весьма заметным в высокоэнергетической части спектра, в которой энергия нейтронов превышает 1 МэВ.

Одновременно нами была проведена оценка эффективного коэффициента размножения нейтронов k_{ef} в модели уран-свинцовой сборки. Оценка математического ожидания значения отношения множественности нейтронов, относящихся к предыдущему и последующему поколениям, показывает, что величина k_{ef} в такой установке не превышает значения 0.2, что связано в основном с ограниченными размерами модели уранового бланкета и тем обстоятельством, что значитель-

ная часть нейтронов покидает поверхность модели U/Pb-сборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обсуждены результаты расчетных исследований параметров свинцовой мишени с урановым blanketом, облучаемой протонами с энергией 1.5 ГэВ. Показано, что плотность потока нейтронов слабо зависит от длины первичной свинцовой мишени, выступающей из blanketа навстречу падающему пучку протонов. В то же время пространственное распределение плотности потока нейтронов характеризуется весьма резкой радиальной зависимостью, наиболее заметной в области относительно высокой энергии нейтронов, превышающей 1 МэВ. Эффективный коэффициент размножения нейтронов в такой установке составляет порядка $k_{ef} = 0.2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rubbia C. et al.* // Report CERN/LHC/97-01(EET). 1997; *Andriamonije S. et al.* // Report CERN/SPSLC95-17. 1995; *Phys. Lett. B.* 1995. V. 348. P. 697.
2. *Krivopustov M.I., Chultem D., Tumendelger Ts. et al.* // JINR Preprint P1-2000-168, Dubna, 2000 (submitted to *Kerntechnik*).
3. *Krivopustov M.I. et al.* // Proc. XV Seminar High Energy Physics Problems. Dubna, Russia, 2000.
4. *Krivopustov M.I. et al.* // *Radioanal. Nucl. Chem.* 1997. V. 222. P. 267.
5. *Chultem D., Damdinsuren C. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods. A.* 1996. V. 381. P. 488.
6. *Тумэндэмбрэрэл Ц., Чултэм Д.* // Кр. сообщения ОИЯИ. 1996. № 1(75). С. 75.
7. *Тумэндэмбрэрэл Ц., Кривопустов М.И., Чултэм Д. и др.* // Сообщение ОИЯИ P1-99-247. Dubna, 1999.
8. *Brandt R., Krivopustov M.I., Chultem D. et al.* // JINR Communication P1-99-117, Dubna, 1999.
9. *Hashemi-Nezhad S.R., Krivopustov M.I., Sosnin A.N. et al.* // JINR Preprint E1-2000-291. Dubna, 2000.
10. *Hashemi-Nezhad S.R., Krivopustov M.I., Sosnin A.N. et al.* // JINR Preprint E1-2000-291. Dubna, 2000.
11. *Polanski A., Sosnin A.N., Toneev D.D.* // JINR Preprint E2-91-562. Dubna, 1991.