

67816



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

59-03

P1-2003-59

Д. Чултэм, М. И. Кривоустов, Ю. А. Батусов,
А. Н. Соснин, И. Адам, О. С. Заверюха, А. В. Павлюк

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ БЫСТРЫХ
НЕЙТРОНОВ В УРАНОВОМ БЛАНКЕТЕ
УСТАНОВКИ «ЭНЕРГИЯ ПЛЮС ТРАНСМУТАЦИЯ»
НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА **ОИЯИ**
ПРИ ЭНЕРГИИ 1,5 ГэВ

Направлено в журнал «Nuclear Tracks and Radiation Measurements»

2003

1. Введение

В наших сообщениях [1-6] и обзоре [7] описаны экспериментальные работы, выполненные в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ по реализации программы «Исследование физических аспектов электроядерного способа производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на релятивистских пучках синхрофазотрона/нуклотрона ОИЯИ» – проект «Энергия плюс трансмутация», и приведены результаты ее осуществления с использованием двухсекционной модели уранового бланкета.

На этой модели бланкета на протонных пучках синхрофазотрона/нуклотрона были получены следующие результаты:

- исследованы спектры масс осколков деления и выходов (n,γ) - и $(n,2n)$ - реакций в урановом бланкете [2];
- получил развитие метод восстановления спектров быстрых нейтронов в широком диапазоне энергий (вплоть до 200 МэВ) [3];
- исследовано пространственно-энергетическое распределение нейтронов в свинцовой мишени и модели уранового бланкета [4];
- разработан так называемый интегратор деления урана [5], позволивший установить, что внутри бланкета преобладают быстрые нейтроны;
- опробована высокоэффективная автоматизированная система измерения трековой информации об энерговыделении в урановом бланкете электроядерной установки [6].

В качестве очередного этапа этих исследований на пучке нового сверхпроводящего ускорителя – нуклотрона [8] выполнено облучение четырехсекционной модели гетерогенной подкритической уран-свинцовой сборки при энергии протонов, равной 1,5 ГэВ. На рис. 1 представлена программа этого эксперимента с указанием названий ядерно-физических процессов, происходящих в U/Pb-сборке, а также типов методик, которые использованы для их изучения.

Среди задач по созданию электроядерной установки и исследованию процессов во входящей в ее состав уран-свинцовой сборке, требующих экспериментального изучения и компьютерного моделирования, важное место занимают исследования спектров нейтронов. В различных частях сборки нейтронные спектры формируются в результате транспорта нейтронов, генерируемых в большой свинцовой мишени под действием пучка первичных релятивистских протонов, и нейтронов, образующихся в процессе деления ядер урана в бланкете.

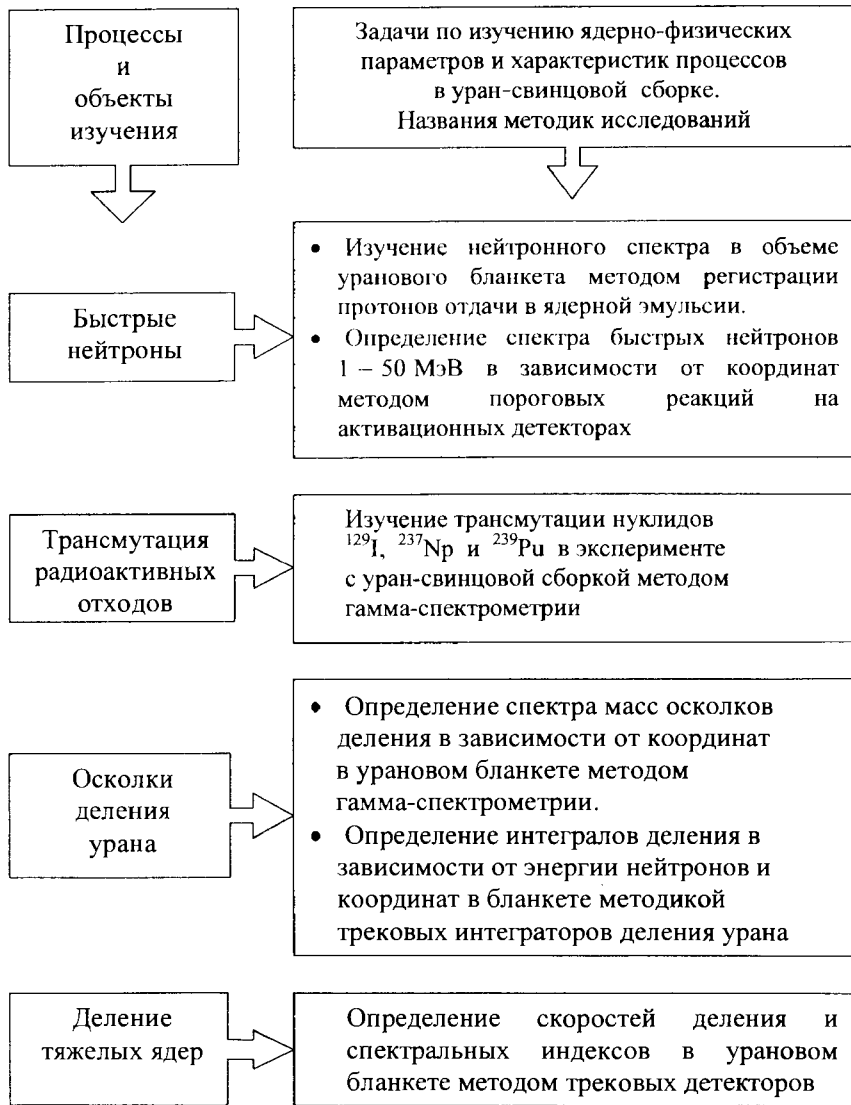


Рис.1. Программа эксперимента по облучению свинцовой мишени с четырехсекционным урановым blankets на протонном пучке сверхпроводящего ускорителя – нуклотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ при энергии 1,5 ГэВ (установка «Энергия плюс трансмутация» [1], схема которой показана на рис. 2)

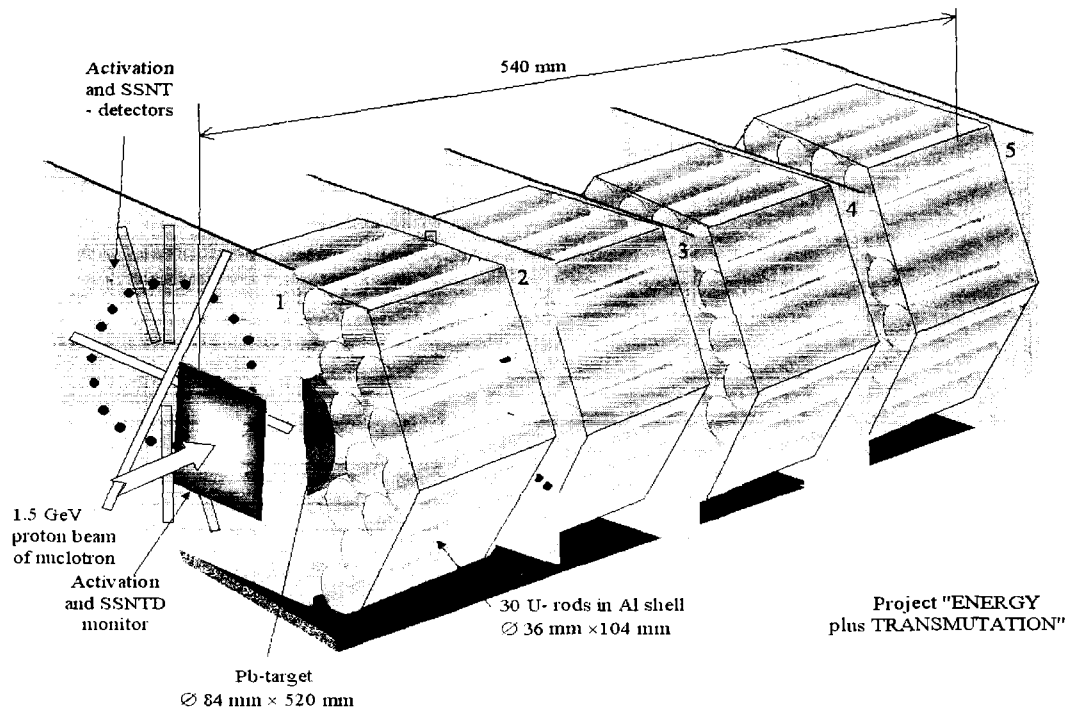


Рис. 2. Схема эксперимента по облучению U/Pb-сборки с четырехсекционным урановым бланкетом на пучке сверхпроводящего ускорителя-нуклотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (Дубна) при энергии протонов 1,5 ГэВ (установка «Энергия плюс трансмутация» [1])

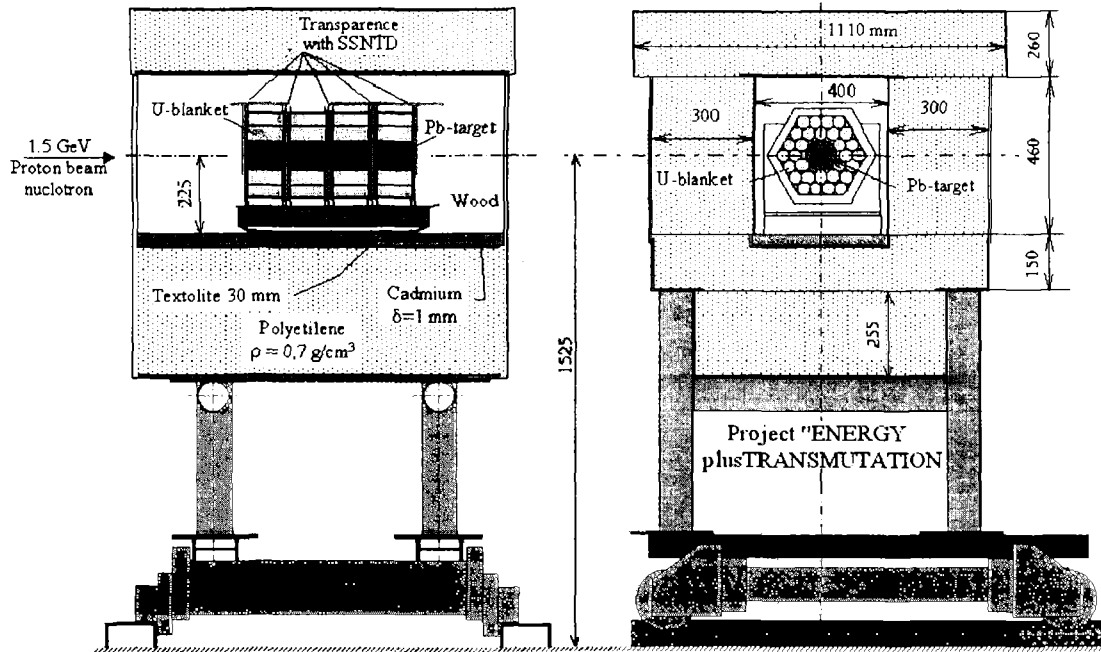


Рис. 3. Схема экспериментальной установки «Энергия плюс трансмутация» [1] со свинцовой мишенью и четырехсекционным урановым бланкетом, облучаемой протонным пучком нуклотрона Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (Дубна)

Настоящая работа посвящена описанию эксперимента по облучению свинцовой мишени с четырехсекционным бланкетом U/Pb-сборки и результатам изучения спектра быстрых нейтронов, полученным эмульсионной методикой регистрации протонов отдачи (см. рис.1).

2. Методика эксперимента: пучок нуклотрона, юстировка U/Pb-сборки и описание уранового бланкета

На рис. 2 и 3 показана схема эксперимента по облучению четырехсекционной модели уран-свинцовой сборки установки «Энергия плюс трансмутация» [1] на пучке нуклотрона.

Средняя интенсивность пучка составляла $1,5 \cdot 10^{10}$ протонов в импульсе, при ширине импульса 0,3 с; временные интервалы между импульсами около 9 с. Юстировка модели U/Pb-сборки относительно направления протонного пучка и определение профиля пучка выполнялись с помощью высокочувствительных поляроидных пленок и ионизационных камер (см. работу [1]).

Полная интенсивность протонного пучка за время облучения уран-свинцовой сборки для выполнения программы, показанной на рис. 1, определялась с помощью монитора из алюминиевой фольги.

Компоновка экспериментальной установки с четырехсекционным урановым бланкетом, включая радиационную защиту-замедлитель, аналогична описанной в нашей публикации [1]. Техническое проектирование конструкции для этой модели выполнено Всероссийским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом атомного энергетического машиностроения (Москва), а изготовление металлической конструкции для четырех секций модели проведено Опытно-экспериментальным производством Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. В работе [1] приведен чертеж секций, из которых на специальной подставке komponуется модель четырехсекционной U/Pb-сборки (см. рис. 3).

На основании результатов облучения, выполненного с целью определения оптимальных размеров свинцовой мишени [9] как одной из составляющих частей U/Pb-сборки, в описываемом эксперименте были приняты следующие размеры мишени: диаметр 8,4 см; общая длина 52 см. Масса мишени составляет 43 кг.

В установку входит четыре секции бланкета, собранные из урановых стержней (уран естественного изотопного состава упакован в герметичные алюминиевые оболочки) со следующими внешними размерами: диаметр 3,6 см, длина 10,4 см. Масса одного стержня равна

1720 г. В каждую секцию входит 30 урановых стержней (см. рис. 3), имеющих общую массу 51,6 кг.

Конструкция упомянутого выше металлического каркаса, в котором монтируются эти стержни, обеспечивает жесткую фиксацию каждого уранового стержня – это позволяло располагать между секциями пластины, на которых с необходимой точностью размещались активационные и твердотельные трековые детекторы.

В ходе эксперимента важное значение имеют вопросы защиты, которые обусловлены повышенными требованиями к радиационной безопасности при облучении U/Pb-сборки высокоэнергетическим пучком с энергией протонов из интервала от 1 до 2 ГэВ и интенсивностью порядка 10^{10} протонов в импульсе. Для проведения облучения сборки использовался контейнер, конструкция которого позволяла размещать радиационную защиту детектирующих систем (см рис.3).

В центре контейнера с замедлителем – защитой (гранулированный полиэтилен, листовой кадмий и свинцовые стенки), поглощающей тепловые нейтроны и гамма-излучение, размещалась четырехсекционная модель U/Pb-сборки с комплектами активационных и твердотельных трековых детекторов и образцами, приготовленными из радиоактивных отходов атомной энергетики для изучения их трансмутации (см. рис.2 и 3). На внутренних стенках контейнера, которые обращены к модели сборки, устанавливались кадмиевые поглотители (толщина 1 мм), уменьшавшие число нейтронов, которые после термализации в объеме замедлителя из гранулированного полиэтилена могли попасть в детекторы и трансмутационные образцы. Этот контейнер (100x106x111 см; общая масса замедляющего вещества составляла более 950 кг) устанавливался на подвижную платформу, которая перемещалась по рельсам на место облучения: фокус ФЗ на канале нуклотрона в измерительном павильоне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

3. Описание эмульсионного спектрометра нейтронов

Спектр нейтронов в четырехсекционной уран-свинцовой сборке формируется в основном в результате их генерации в свинцовой мишени за счет реакций глубокого расщепления и деления ядер свинца, делений ядер уранового blankets и других процессов, сопровождаемых вылетом нейтронов. Одним из эффективных методов измерения спектров быстрых нейтронов во внутренней и поверхностной областях модели U/Pb-сборки является метод регистрации протонов отдачи в ядерной эмульсии. В настоящей работе впервые в экспериментах по электроядерной тематике применен этот метод для измерения спектра быстрых нейтронов,

покидающих сборку из свинцовой мишени и уранового бланкета. Высококочувствительная толстослойная эмульсия G-5 БР (бесподложечная, релятивистская) экспонировалась в спектре нейтронов расщепления и нейтронов деления ядер в урановом бланкете, которые вылетают в радиальном направлении от оси симметрии бланкета. Эта методика позволяет измерить спектры быстрых нейтронов в различных областях уранового бланкета [10].

На рис. 4 приведена схема описываемого эксперимента с использованием эмульсионного спектрометра нейтронов по регистрации протонов отдачи. Ядерная эмульсия в этом облучении имела следующие размеры: 100x25x1,2 мм и помещалась на расстоянии 500 мм от оси симметрии уран-свинцовой сборки над зазором между первой и второй секциями бланкета (см. рис. 2 и 3). В полиэтиленовом замедлителе сделан вертикальный канал (диаметр 30 мм), поверхность которого выложена кадмием. Этот канал служит коллиматором нейтронов. Коллимация пучка нейтронов составляет 3'. Для защиты эмульсии во время облучения от гамма-квантов использовался свинец (толщина 50 мм), а от тепловых нейтронов – гранулированный полиэтилен (толщина 260 мм) и листовой кадмий (толщина 2 мм).

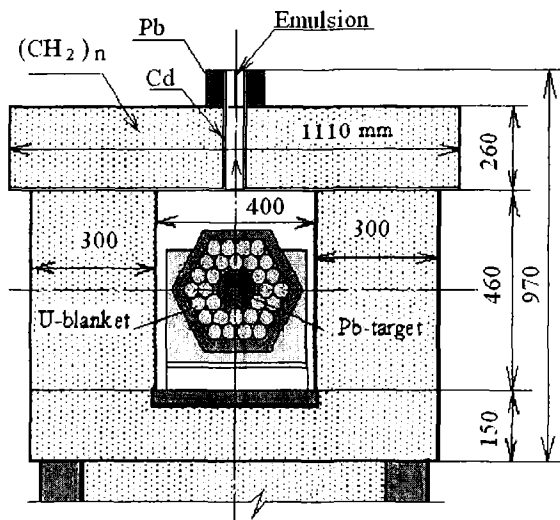


Рис.4. Схема эксперимента по исследованию спектра нейтронов, покидающих урановый бланкет, эмульсионным методом регистрации протонов отдачи на пучке нуклотрона с энергией 1,5 ГэВ (установка «Энергия плюс трансмутация» [1])

Проявление и просушивание ядерной эмульсии выполнялись в Лаборатории высоких энергий, а измерения характеристик треков (длина и направление каждого трека) проводились в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Число измеренных треков составило более 3 тыс. штук.

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Нейтроны, попадая в ядерную эмульсию, могут столкнуться с имеющимися в ней протонами, при этом они испытывают упругие рассеяния, отдавая протону часть или всю кинетическую энергию. Поскольку известны направление нейтронов, движущихся со стороны бланкета, и направление отдачи протонов по измерениям с помощью микроскопа, то могут быть определены углы рассеяния θ между направлениями нейтрона и протона. Энергия протона T_p определяется по измерениям длины трека в эмульсии, а энергия нейтрона T_n может быть вычислена по известной формуле $T_n = T_p(\cos\theta)^2$. Это выражение выводится из законов сохранения энергии и импульса в пренебрежении разницей масс протона и нейтрона.

Обработка треков для определения нейтронного спектра выполнялась с помощью специальной программы, созданной для этих целей в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

На рис. 5 показаны для сравнения экспериментальный и расчетный спектры нейтронов, покидающих объем уранового бланкета. Расчетный спектр получен с помощью метода Монте-Карло с использованием программы DCM/CEM подобно тому, как это сделано в работе [11]. Нейтроны регистрировались в спектре при пересечении площадки на внутренней поверхности замедлителя, равной по площади сечению канала коллиматора в этом эксперименте и расположенной над зазором между первой и второй секциями бланкета (см. рис. 4). Расчетный спектр нейтронов перенормирован на значение максимума экспериментального спектра. Из рис. 5 видно, что расчетный спектр оказывается несколько мягче, чем экспериментальный спектр.

Спектр нейтронов, определенный эмульсионным методом регистрации протонов отдачи, имеет максимум при энергии $1,5 \pm 0,5$ МэВ, а центр тяжести этого спектра находится в области значений энергии 4 – 6 МэВ в зависимости от границ обрезания спектра нейтронов по энергии. Например, при обрезании спектра в интервале 0 – 20 МэВ этот центр находится при энергии $4,3 \pm 0,5$ МэВ, а при обрезании в интервале 0 – 50 МэВ центр тяжести будет находиться при энергии $6,6 \pm 0,5$ МэВ.

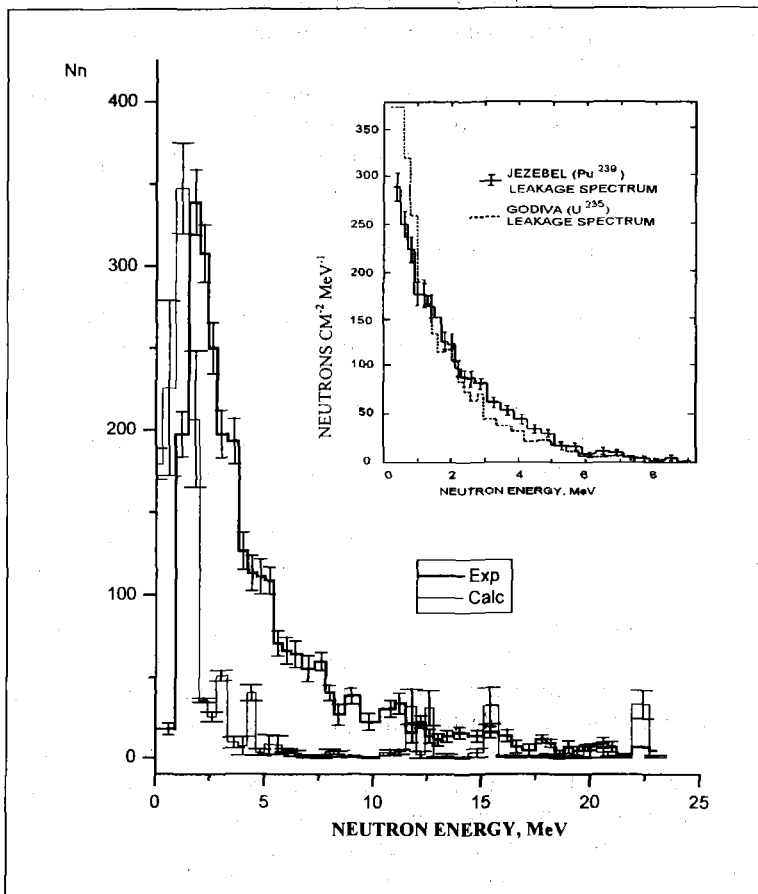


Рис.5. Спектр нейтронов в четырехсекционном бланкете электроядерной установки “Энергия плюс трансмутация”, полученный с помощью эмульсионного метода регистрации протонов отдачи. Эксперимент выполнен на пучке нуклотрона при энергии протонов 1,5 ГэВ. Расчетный спектр получен по программе DCM/CEM [11]. В верхней части рисунка показаны спектры нейтронов из работы [12]

Полученный результат показывает, что спектр нейтронов в урановом бланкете значительно жестче, чем спектр нейтронов деления урана в атомном реакторе, среднее значение энергии которых для ядер урана составляет 1,5 – 2 МэВ.

На рис. 5 кроме расчетного и экспериментального спектров нейтронов в подкритическом урановом бланкете, описанных в настоящей работе, приведен спектр нейтронов утечки из критической плутониевой сборки [12]. Из их сравнения видно, что средняя энергия нейтронов расщепления значительно больше средней энергии нейтронов деления ядер плутония-239 и урана-235.

Результаты, полученные с помощью эмульсионной методики, подтверждают возможность ее применения для исследования спектров нейтронов в различных местах объема уранового бланкета электроядерной установки.

В заключение отметим, что информация о спектре быстрых нейтронов будет использована при анализе данных о трансмутации радиоактивных образцов из йода-129, нептуния-237 и плутония-239, которые экспонировались на поверхности уранового бланкета в этом же эксперименте (см. рис. 1 и [10]), а также для сравнения с результатами компьютерного моделирования спектров нейтронов, генерируемых в объеме уран-свинцовой сборки.

Авторы с искренней благодарностью вспоминают академика А.М.Балдина (1926 – 2001) за поддержку электроядерных и трансмутационных исследований на пучках ускорительного комплекса синхрофазотрон/нуклотрон ОИЯИ. Авторы благодарят А.И.Малахова, В.Н.Пенева, И.А.Шелаева, Н.Н.Агапова, Е.А.Матюшевского, Ю.С.Анисимова и П.И.Зарубина за содействие в решении вопросов создания физической установки и подготовки экспериментов. Персонал инженерно-технических служб Лаборатории высоких энергий, руководимый А.Д.Коваленко, авторы благодарят за обеспечение эффективной работы нуклотрона. Авторы благодарят коллектив Опытного - экспериментального производства Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (руководитель Ю.И.Тятюшкин) за изготовление оборудования, а А.Ф. Елишева и И.И.Марьина за помощь при подготовке облучения уран-свинцовой сборки на пучке нуклотрона.

Авторы благодарят Министерство по атомной энергии России за предоставление материала для уранового бланкета как основной части экспериментальной установки «Энергия плюс трансмутация» [1]. Результаты, которые описаны в настоящей работе, получены при поддержке грантом Международного научно-технического центра (проект МНТЦ 1372: ФЭИ, Обнинск – ОИЯИ, Дубна), а также целевым грантом дирекции ОИЯИ на обеспечение эксплуатации ускорительных и реакторных установок Института.

Литература

1. М.И.Кривоустов, Д.Чултэм, И.Адам и др. О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета на модели U/Pb-сборки электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1,5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2000-168, Дубна, 2000; «Kerntechnik», 2003, 68, p.p.48-56.
2. Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр, М.И.Кривоустов, Ш.Гэрбиш, Ц.Тумэндэмбэрэл, А.В.Павлюк, О.С.Заверюха. Исследование спектров масс осколков деления и выходов (n, γ) - и $(n, 2n)$ -реакций в подкритическом урановом бланкете электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии 1,5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2002-16, Дубна, апрель 2002.
3. Б.А.Марцынкевич, А.М.Хильманович, С.В.Корнеев, И.Л.Рахно, С.Е.Чигринов, М.И.Кривоустов, А.Н.Соснин, Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм, О.С.Заверюха, А.В.Павлюк. Восстановление спектров быстрых нейтронов в широком диапазоне энергий (вплоть до 200 МэВ) в подкритической уран-свинцовой сборке электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация». Сообщения ОИЯИ P1-2002-65, Дубна, июнь 2002.
4. И.В.Жук, М.К.Киевец, М.И.Кривоустов, А.Н.Соснин, Д.Чултэм, В.Вестмайер, Ц.Тумэндэлгэр, О.С.Заверюха, А.В.Павлюк. Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в свинцовой мишени и урановом бланкете электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» при бомбардировке протонами с энергией 1,5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2002-184, Дубна, сентябрь 2002.
5. Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр, М.И.Кривоустов. Трековый интегратор деления урана для исследования энерговыделения в подкритическом урановом бланкете электроядерной установки. Сообщения ОИЯИ P1-2001-128, Дубна, 2001.
6. Л.А.Гончарова, К.А.Котельников, С.П.Кузнецов, Н.Г.Полухина, Н.И.Старков, П.И.Зарубин, О.С.Заверюха, М.И.Кривоустов, В.П.Перельгин, Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм. Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом бланкете электроядерной системы. Препринт 25 Физического Института им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, 2001.

7. А.М.Балдин, А.И.Малахов, А.Н.Сисакян. Некоторые проблемы релятивистской ядерной физики и множественного рождения частиц. Сообщение ОИЯИ Р1-2001-106, Дубна, 2001, стр. 58-59 (принято в журнал ОИЯИ “Физика элементарных частиц и атомного ядра”).
8. Н.Н.Агапов, А.Д. Коваленко, А.И.Малахов. Нуклотрон: основные результаты и планы развития. Атомная энергия, 2002, 93, стр. 479-485.
9. Р.Брандт, М.И.Кривоустов, Д.Чултэм и др. Исследование температурного и нейтронного полей в свинцовой среде при взаимодействии релятивистских протонов. Сообщения ОИЯИ Р1-99-117, Дубна, 1999.
10. И.Адам, М.И.Кривоустов, Д.Чултэм и др. Об эксперименте по калориметрии четырехсекционного уранового blankets электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на пучке нуклотрона ОИЯИ при энергии протонов 1,5 ГэВ. Proc. of the 2-nd International School on Contemporary Physics (9-19 September, 2002, Ulaanbaatar, Mongolia), p.p. 146-159.
11. А.Н.Соснин, М.И.Кривоустов, Д.Чултэм, М.Замани, Р.Одой В.Вестмайер, Х.Роботам, Р.Брандт, С.Р.Хашеми-Нежад. “Моделирование нейтронных спектров в U/Pb-сборке, облучаемой протонами, с помощью метода Монте–Карло. Известия Академии Наук России. Серия физическая, 2002, 66, стр.1494-1496.
12. L.Stewart. Leakage Neutron Spectrum from a Bare ^{239}Pu Critical Assembly. Nuclear science and engineering: 1960, 8, p.p. 595-597.

Получено 3 апреля 2003 г.