

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА ДЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С МИШЕННОЙ СБОРКОЙ КВИНТА ТРЕКОВЫМИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

*М. Ю. Артюшенко^а, В. А. Воронко^а, К. В. Гусак^б, И. В. Жук^б,
М. Г. Кадыков^в, А. С. Потапенко^б, А. А. Сафронова^б, В. В. Сотников^а,
С. И. Тютюнников^в, В. И. Фурман^в, В. В. Чилап^з, А. В. Чиненов^з*

^а ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

^б Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны, Минск

^в Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^з Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш», Москва

Представлены результаты измерений параметров пучка на мишени при облучении подкритической урановой сборки КВИНТА дейтронами с энергиями 1, 4 и 8 ГэВ. Информация о положении пучка падающих частиц относительно оси сборки и о его реальных геометрических параметрах позволяет корректно анализировать данные о пространственных распределениях скоростей реакций внутри мишенной сборки и сравнивать их для различных сеансов облучения, а также моделировать эксперименты программами типа MCNPX, GEANT4, FLUKA и др.

The results of measurements of the deuteron beams parameters with energies of 1, 4 and 8 GeV at the irradiation of the uranium subcritical assembly QUINTA are presented. The data obtained on the incident beam position relative to the axis of the target and on the real geometric parameters of the beam allow one to analyze correctly the spatial distribution of reaction rates within the target assembly and compare these measured in different irradiation runs as well as to simulate experiments by such codes as MCNPX, GEANT4, FLUKA, etc.

PACS: 29.40.Wk; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты измерений параметров пучков дейтронов в экспериментах с подкритической урановой сборкой КВИНТА [1], облучаемой дейтронами с энергиями 1, 4 и 8 ГэВ. Измерения проводились в декабре 2011 г. и марте 2012 г. на нуклотроне Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в рамках проекта «Исследование глубокоподкритичных электроядерных систем и возможности их применения для производства энергии и трансмутации РАО» [2]. Этот проект нацелен на исследование ряда ядерно-физических аспектов применения новой схемы электроядерного метода, основанной на ядерных релятивистских технологиях (схема ЯРТ) [3, 4]. Урановая мишенная сборка КВИНТА массой ~ 512 кг моделирует центральную область квазibesконечной (с пренебрежимо малой утечкой нейтронов) активной зоны ЯРТ-реактора.

Основные задачи экспериментов с мишенной сборкой КВИНТА:

1. Отработка методик измерения основных характеристик ядерно-физических процессов, происходящих в активной зоне под действием релятивистских бомбардирующих частиц, необходимых для подготовки экспериментов на квазibesконечной урановой мишени массой ~ 21 т, имеющейся в ОИЯИ.

2. Фундаментальные и прикладные исследования особенностей взаимодействия релятивистских частиц с массивными размножающими мишенями.

В настоящей работе проводился контроль юстировки мишенной сборки относительно оси падающего пучка, определение положения пучка на мишени, а также его размера и формы при выполнении указанных выше экспериментов. Эта информация необходима для корректного анализа измеряемых пространственных распределений скоростей реакций внутри мишенной сборки и для возможности сравнения этих данных, полученных в различных сеансах облучения, а также для моделирования экспериментов программами типа MCNPX, GEANT4, FLUKA и др.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения параметров дейтронного пучка на мишени использовались твердотельные трековые детекторы ядер (ТТДя) [5,6] с радиаторами из естественного свинца, называемые сенсорами (рис. 1). ТТДя позволяют определить распределение плотности скоростей реакции деления ^{235}Pu , вызванного падающими дейтронами. Сенсоры размещались непосредственно на входе в окно ввода пучка в свинцовом бланкете, окружающем урановую мишень (рис. 2).

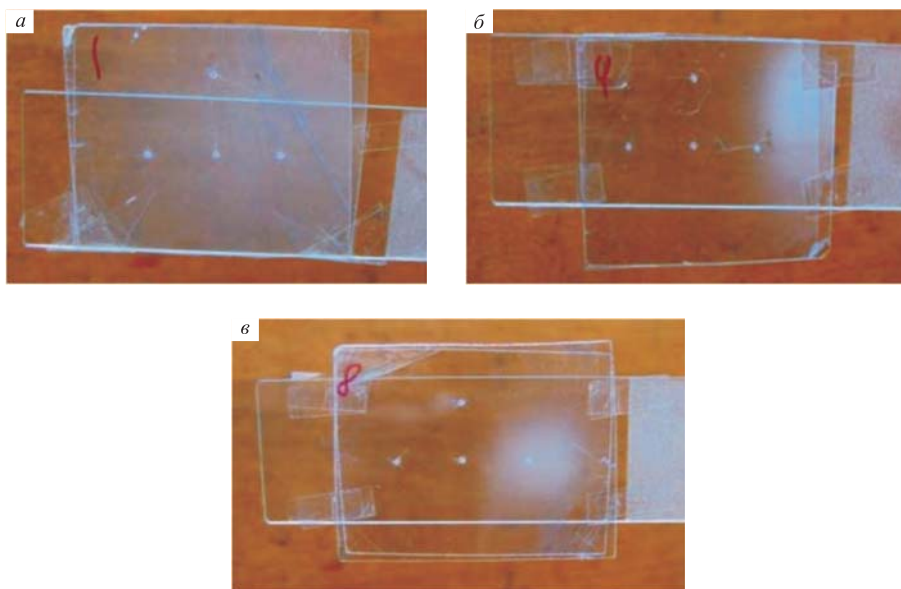


Рис. 1. Твердотельные трековые детекторы (искусственная слюда), облученные пучком дейтронов с энергиями: а) 1 ГэВ; б) 4 ГэВ; в) 8 ГэВ



Рис. 2. Место расположения сенсоров

Необходимо отметить некоторые достоинства и недостатки методики определения параметров падающего пучка с помощью ТТДя.

Среди достоинств:

— возможность размещать сенсоры непосредственно на мишени, что позволяет находить реальное положение центра пучка относительно центра мишени;

— параметры пучка, определенные при помощи ТТДя, представляют собой интегральные характеристики для данного сеанса облучения, что позволяет использовать их в программных кодах монте-карловского моделирования процессов взаимодействия релятивистских частиц с веществом мишени без предварительной обработки.

— возможность обработки данных off-line, что позволяет использовать большое количество сенсоров для точного определения параметров аппроксимирующей функции формы пучка.

В принципе, положение пучка относительно мишени может изменяться в ходе облучения из-за нестабильности магнитного поля системы вывода. В этом случае невозможно применить аппроксимацию функцией Гаусса конечного распределения скоростей реакции деления свинца. Однако в экспериментах, описанных в настоящей работе, система магнитного вывода пучка работала устойчиво (по on-line данным профилометра пучка), так что положение центра выведенного пучка не изменялось со временем.

Все использованные радиаторы являлись «толстыми» источниками осколков деления, т. е. для них выполнялось условие

$$d_q \gg \bar{R}_0, \quad (1)$$

где d_q — толщина слоя i -го нуклида в радиаторе; \bar{R}_0 — средний пробег осколков деления в веществе радиатора.

Сенсоры с толстыми радиаторами не требуют калибровки каждого сенсора в отдельности, при этом в конечном расчете погрешности определения скорости реакции деления отсутствует вклад от ошибки измерения толщины радиатора. Легкость в изготовлении сенсоров дает возможность массовых измерений [6].

Однако сенсоры с толстыми радиаторами имеют и ряд недостатков. Поскольку радиатор имеет толщину, значительно превышающую средний пробег осколков деления, то ТТДя регистрируют лишь один осколок деления. Поэтому невозможно однозначно установить (по двум коррелированным осколкам), оставлен ли трек осколком деления свинца или продуктом реакции фрагментации ядер, вызванной внутриядерным каскадом. Так как регистрируется только один некоррелированный осколок деления (в передней или задней полусфере сенсора), то для корректного расчета скорости реакции необходимо учитывать кинематику процесса деления.

Первый из указанных эффектов существен лишь при энергии налетающей частицы, превышающей 500–600 МэВ (условный порог фрагментации тяжелых ядер — 2–3 МэВ/нуклон). При этом вероятность образования легких фрагментов и ядер промежуточной массы, выходящих из радиатора в материал трекового детектора и имеющих ионизационную способность, достаточную для того, чтобы образовать латентный трек, повышается с ростом энергии налетающих частиц.

Для исследования зависимости коэффициента чувствительности ТТДя от массового распределения осколков деления и их кинетической энергии применялась программа FLUKA, модель внутриядерного каскада INC и модель нуклон-нуклонных взаимодействий RQMD-2.4. Расчеты показали, что величина относительного уменьшения эффективности регистрации с уменьшением заряда иона для толстых радиаторов составляет не более 3 % для искусственной слюды и лавсана. Соответственно, полный вклад этого эффекта в относительное изменение коэффициента чувствительности сенсора (с учетом осколков деления и фрагментов промежуточной массы) составил $\sim 0,5\%$ и был учтен при анализе результатов измерений.

Учет влияния кинематики процесса деления ядер свинца на плотность треков на поверхности ТТДя необходим во всем диапазоне энергий налетающих частиц. Эффект передачи импульса делящимся ядрам свинца компенсируется сэндвичеобразной конструкцией сенсора, поскольку треки регистрируются в геометрии 4π .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные распределения плотностей треков осколков деления свинца, характеризующие пространственное распределение налетающего пучка дейтронов на переднем торце урановой мишени, приведены на рис. 3. Эти распределения хорошо аппроксимируются трехмерной функцией Гаусса. Рассчитанные по экспериментальным данным параметры гауссовых распределений положения пучка приведены в табл. 1 и 2. Указанная в таблицах ширина пика на полувысоте (FWHM) для гауссова распределения выражается через его дисперсию σ как

$$\text{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2 \ln 2}.$$

Рис. 4 дает наглядное представление о положении пучка дейтронов относительно центральных урановых стержней мишенной сборки. На рисунке приведены 2D-проекции трехмерных распределений интенсивности воздействия пучка дейтронов на входную поверхность мишенной сборки КВИНТА с обозначением сечения урановых стержней. Полуоси малого и большого эллипсов, показанные жирной линией, отвечают параметрам 1σ и 2σ соответствующего гауссова распределения из табл. 1 и 2. Интеграл по площади ма-

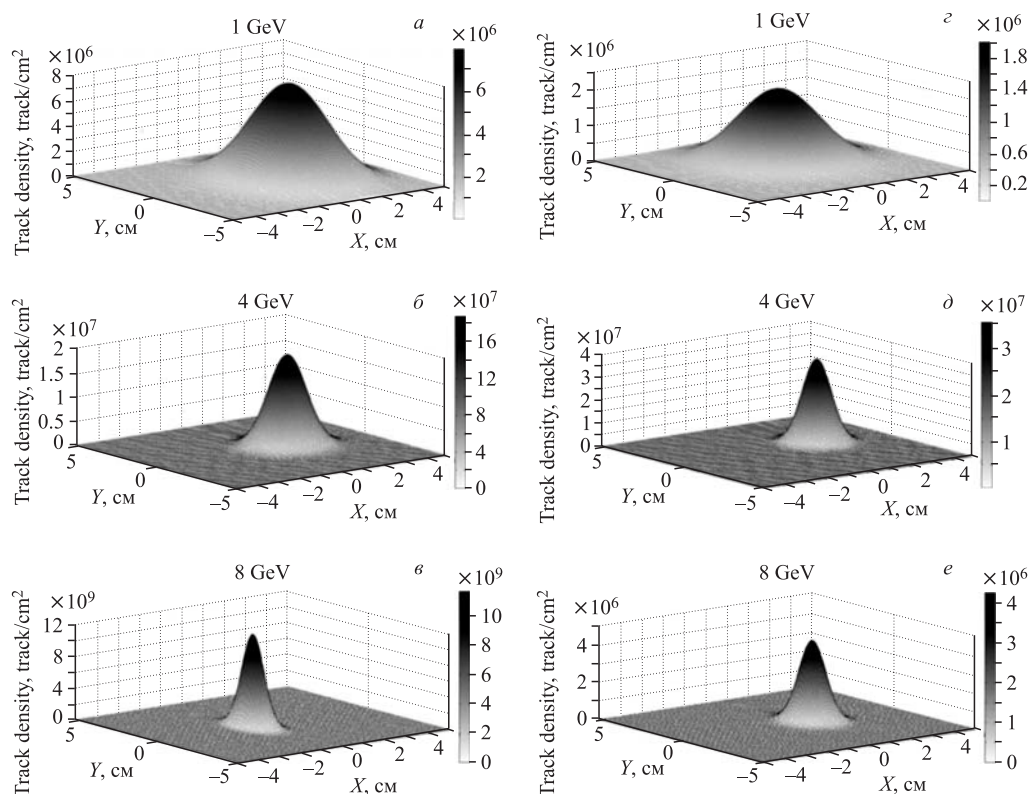


Рис. 3. Пространственные распределения пучка на урановой мишени, измеренные для энергий дейтронов: а, з) 1 ГэВ, б, д) 4 ГэВ, в, е) 8 ГэВ в сеансах декабря 2011 г. и марта 2012 г. соответственно

Таблица 1. Пространственное положение первичного пучка (сеанс декабря 2011 г.)

Энергия дейтронов, ГэВ	Координаты центра пучка, см		FWHM, см	
	X_c	Y_c	$FWHM_X$	$FWHM_Y$
1	$1,3 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,3$
4	$1,4 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,2$
8	$-0,5 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$

Таблица 2. Пространственное положение первичного пучка (сеанс марта 2012 г.)

Энергия дейтронов, ГэВ	Координаты центра пучка, см		FWHM, см	
	X_c	Y_c	$FWHM_X$	$FWHM_Y$
1	$0,6 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$
4	$2,0 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$
8	$1,2 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$

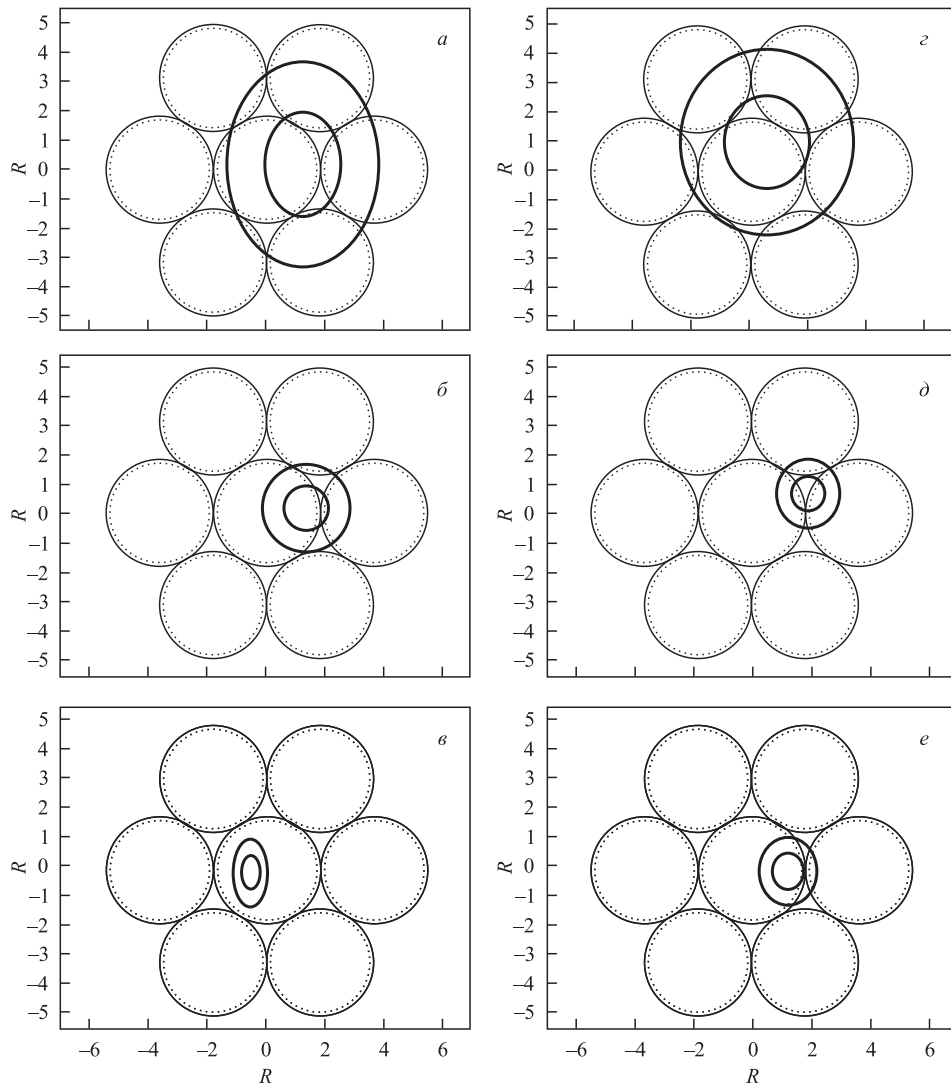


Рис. 4. Пространственное положение пучка дейтронов на торце мишенной сборки КВИНТА, спроектированное на сечение составляющих ее урановых стержней: а) энергия дейтронов 1 ГэВ, б) 4 ГэВ, в) 8 ГэВ, сеанс декабря 2011 г.; з) энергия дейтронов 1 ГэВ, д) 4 ГэВ, е) 8 ГэВ, сеанс марта 2012 г.

лого и большого эллипсов даст соответственно 68 и 95% полного числа дейтронов, упавших на мишень.

Чтобы выяснить, какая часть пучка попала непосредственно в делящийся слой на входе в мишенную сборку, было проведено интегрирование распределения по лицевой поверхности урановых стержней. Расчет был сделан с помощью пакета MATLAB. Понятно, что прохождение падающих дейтронов через сборку без взаимодействия с делящимся материалом не происходит ввиду того, что ее ось повернута относительно оси пучка на $\sim 2^\circ$.

Однако для корректного анализа экспериментальных данных о пространственном распределении количества делений и наработанных ядер ^{239}Pu внутри мишенной сборки и для получения соответствующих интегральных величин наряду с поправками координат расположения детектирующих систем необходимо учитывать обсуждаемый эффект в каждом конкретном сеансе облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения положения пучка на массивной мишени, а также его размеров и формы, при облучении ее релятивистскими частицами, определяют корректность анализа измеряемых пространственных распределений различных ядерных реакций, протекающих в объеме мишени. В случае рассматриваемой в данной работе мишенной сборки КВИНТА это, в первую очередь, деление ядер ^{238}U и наработка изотопа ^{239}Pu , регистрируемые различными детекторами, расположенными внутри и на поверхности сборки.

Для точного определения положения и геометрических параметров пучка на мишени была применена методика с использованием ТТДя. Разрешение метода составляло 1 мм. Положение пучка на мишени определялось для экспериментов 2011–2012 гг., в которых мишенная сборка КВИНТА облучалась дейтронами с энергиями 1, 4 и 8 ГэВ.

Полученные данные о реальных геометрических параметрах пучка падающих дейтронов и его положении относительно оси сборки позволили получить [7] ценную экспериментальную информацию о ядерно-физических процессах, происходящих в мишенной сборке КВИНТА, вплоть до энергии падающих частиц 8 ГэВ. Кроме того, была создана база для корректного моделирования проведенных экспериментов различными кодами типа MCNPX, GEANT4, FLUKA и их тестирования путем сравнения с результатами измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kadykov M. G. et al.* About the Possibilities of the ADS, Based on the Use of Natural Uranium or Thorium for Energy Production and Processing of Nuclear Waste // Proc. of the 13th Intern. Sci. Conf. Electric Power Engineering 2012, Brno, Czech Republic, 2012. V. 1. P. 69–75.
2. *Adam J. et al. (E&T-RAW Collab.)*. Study of Deep Subcritical Electronuclear Systems and Feasibility of Their Application for Energy Production and Radioactive Waste Transmutation. JINR Commun. E1-2010-61. Dubna, 2010.
3. *Балдин А. А. и др.* Ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) для производства энергии и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Результаты первых экспериментов по физическому обоснованию ЯРТ // Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8, вып. 6. С. 1007–1023.
4. *Чилап В. В. и др.* Ядерная релятивистская энергетика — физико-технические основы и результаты первых экспериментов // Вестн. НЯЦ РК. 2011. № 4(48). С. 68–76.
5. *Zhuk I. V. et al.* Determination of High-Energy Proton Beam Profile Using Track Detectors // Rad. Meas. 2008. V. 43. P. 219–224.
6. *Малыхин А. П. и др.* Измерение трековыми детекторами распределений плотности деления на критических сборках // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-энер. наук. 1970. № 2. С. 16–23.
7. *Furman W. I. et al.* Recent Results of Study of ADS with 500 kg Natural Uranium Target Assembly QUINTA Irradiated by Deuterons with Energies from 1 to 8 GeV at JINR Nuclotron // Proc. of XXI IHER. PoS. MC. 2000. V. 086.

Получено 28 декабря 2012 г.