

P1-2001-128

Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр, М.И.Кривопустов

**ТРЕКОВЫЙ ИНТЕГРАТОР ДЕЛЕНИЯ УРАНА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ
В ПОДКРИТИЧЕСКОМ УРАНОВОМ БЛАНКЕТЕ
ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ**

Направлено в журнал «Nuclear Tracks and Radiation Measurements»

1. Постановка задачи

Главной энергетической характеристикой подкритического blankets является коэффициент усиления мощности, который представляет собой отношение мощности тепловыделения в blankets за счет деления урана к мощности, вносимой в мишень протонным пучком $P_{\text{beam}} = I \times E_p$.

Для измерения мощности тепловыделения в урановом blankets авторы использовали следующие два метода:

1. Измерение абсолютного числа событий деления ядер урана с помощью твердотельных ядерных трековых детекторов [1];
2. Термометрические измерения с помощью высокочувствительных полупроводниковых терморезисторов и микротермопар [1, 2].

Настоящая работа посвящена разработке и применению новой модификации метода измерения тепловыделения с помощью трековых детекторов, а именно - методу интегратора деления урана (ИДУ), который позволяет определять парциальные интегралы деления ядер урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами.

2. Принцип действия интегратора деления урана

Трековый ИДУ представляет собой комплект четырех детекторов осколков деления с радиаторами из тонкого слоя оксида урана U_3O_8 . Для иллюстрации на рис.1 показана схема интегратора деления урана. Эти четыре трековых детектора размещаются внутри уранового blankets в местоположениях, эквивалентных по нейтронному спектру, фактически симметричных относительно оси сборки в цилиндрической системе координат (Z,R). В приведенной ниже таблице даны характеристики ИДУ.

Урановые слои (U_3O_8), из которых приготовлены радиаторы трековых детекторов, нанесены на алюминиевую подложку. Толщина этих слоев составляет около 5 микрон, что примерно в два раза превосходит эффективный пробег осколков деления урана в слое U_3O_8 : $R_{3ф} = 2,7$ мкм.

Из-за пропорциональности числа событий деления каждого из изотопов урана его концентрации в радиаторе числа событий деления ядер урана-235 в двух разных радиаторах заметно отличаются друг от друга ($C_1/C_2=18$), в то время как числа событий деления ядер урана-238 остаются близкими: $(100-C_1) / (100-C_2) = 0,95$ (см. работу [3]).

Ниже показано, что такая зависимость числа событий деления изотопов от их концентраций в радиаторах ИДУ и особенности функций возбуждения реакции деления обоих изотопов урана позволяет определить соотношение парциальных интегралов деления в урановом blankets.

Таблица. Характеристики элементов интеграторов деления урана

Номер детектора	1	2	3	4
Толщина уранового радиатора, мкм	5	5	5	5
Концентрация изотопа ^{235}U в радиаторе, %	$C_1=5,4$	$C_2=0,3$	$C_1=5,4$	$C_2=0,3$
Толщина кадмиевого экрана, мм	1	1	0	0

Спектр нейтронов условно можно разделить на три области энергий: тепловых, резонансных и быстрых нейтронов. Границы между этими областями совпадают с краем поглощения резонанса кадмия ($E_n \approx 1$ эВ) и порогом деления ^{238}U (≈ 1 МэВ), в окрестностях которых отношение $\alpha = \sigma_\gamma/\sigma_f$ близко к единице (см. рис. 2, на котором показаны функции возбуждения n,γ - и n,f - реакций для естественного урана).

Скорости деления урана в этих трех областях нейтронного спектра выражаются следующими формулами:

$$\lambda_t = \int_0^{1eV} \Phi_n(E) \sigma_f^5(E) dE, \quad \lambda_r = \int_{1eV}^{1MeV} \Phi_n(E) \sigma_f^5(E) dE, \quad \lambda_f = \int_{1MeV}^{\infty} \Phi_n(E) \sigma_f^8(E) dE.$$

Определяемые с помощью трековых детекторов числа событий деления (N_1, N_2, N_3 и N_4 ; здесь индекс числа событий деления совпадает с номером детектора на рис. 1) и искомые скорости деления (λ_t, λ_r и λ_f) можно связать следующими приближенными равенствами:

$$0 \times \lambda_t + c_1 \times \lambda_r + \lambda_f \approx N_1,$$

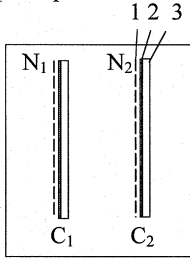
$$0 \times \lambda_t + c_2 \times \lambda_r + \lambda_f \approx N_2,$$

$$c_1 \times \lambda_t + c_1 \times \lambda_r + \lambda_f \approx N_3,$$

$$c_2 \times \lambda_t + c_2 \times \lambda_r + \lambda_f \approx N_4.$$

Включение в состав ИДУ четвертого детектора с обедненным ураном связано с необходимостью “застраховаться” от потери информации в тех областях бланкета, где плотность треков может оказаться большой, или наоборот, наличие третьего детектора с радиатором из обогащенного урана позволяет увеличить статистику в тех местах бланкета, где плотность потока нейтронов мала.

с Cd-фильтром



без Cd-фильтра

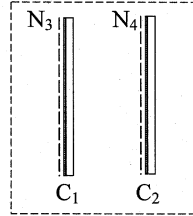


Рис. 1. Схема интегратора деления урана: 1- лавсановая пленка, 2- урановый слой и 3- алюминиевая фольга (другие обозначения см. в тексте)

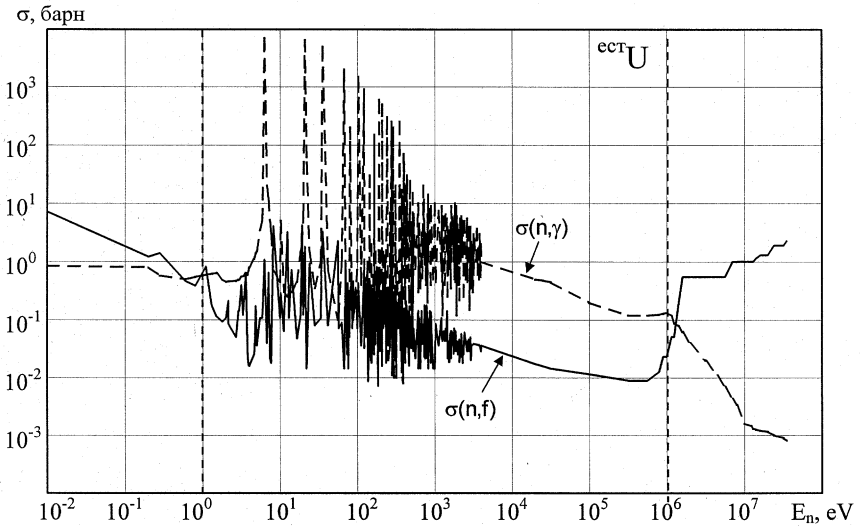


Рис. 2. Функции возбуждения n,γ- и n,f- реакций для урана естественного изотопного состава

Определив парциальные скорости деления в разных точках бланкета путем решения матричных уравнений

$$\begin{pmatrix} 0 & c_1 & 1 \\ 0 & c_2 & 1 \\ c_1 & c_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_t \\ \lambda_r \\ \lambda_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 & c_1 & 1 \\ 0 & c_2 & 1 \\ c_2 & c_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_t \\ \lambda_r \\ \lambda_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_4 \end{pmatrix},$$

нетрудно рассчитать парциальные числа событий деления и, следовательно, энерговыделение по объему уранового бланкета:

$$\Lambda_t = c \cdot \frac{V}{\Delta V} \cdot \frac{1}{n} \sum_Z \sum_R \lambda_t(Z, R);$$

$$\Lambda_r = c \cdot \frac{V}{\Delta V} \cdot \frac{1}{n} \sum_Z \sum_R \lambda_r(Z, R);$$

$$\Lambda_f = (1-c) \cdot \frac{V}{\Delta V} \cdot \frac{1}{n} \sum_Z \sum_R \lambda_f(Z, R);$$

где

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \frac{N_3 - N_1}{c_1} \quad \text{или} \quad \lambda_t = \frac{N_4 - N_2}{c_2} \\ \lambda_r &= \frac{N_1 - N_2}{c_1 - c_2} \\ \lambda_f &= \frac{c_1 N_2 - c_2 N_1}{c_1 - c_2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- скорости деления ядер урана} \\ \text{в произвольно выбранной} \\ \text{точке в цилиндрической} \\ \text{системе координат } (Z, R). \end{array}$$

V - объем уранового бланкета;

ΔV - объем эффективного слоя урана в интеграторе деления;

n - число точек измерений, которые равномерно размещены в объеме бланкета;

c - концентрация ядер изотопа ^{235}U в бланкете из естественного урана.

3. Применение трекового ИДУ в эксперименте по калориметрии уранового бланкета

В нашем сообщении [1] описаны методические вопросы эксперимента по калориметрии уранового бланкета установки «Энергия плюс трансмутация» с использованием различных методик, включая трековую (см. рис.3, на котором приведена схема этого эксперимента). Обсуждаемая в настоящей работе методика ИДУ применена для измерения парциальных интегралов событий деления с помощью

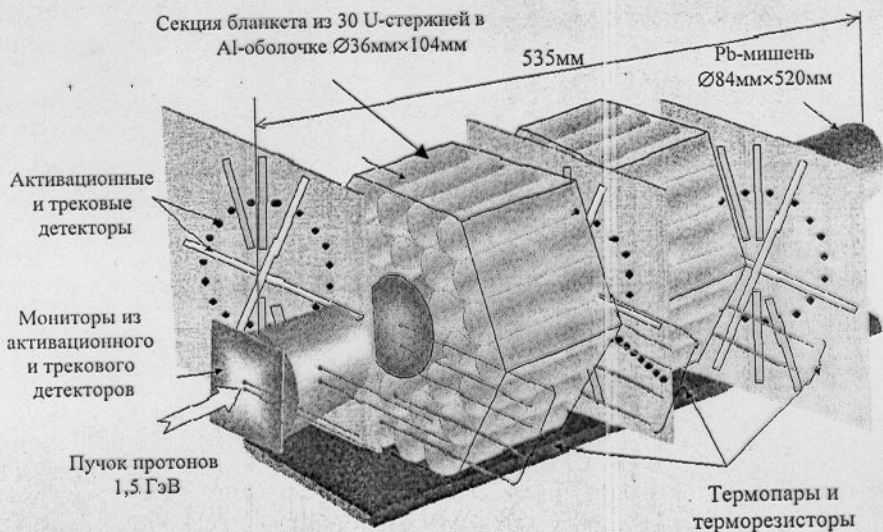


Рис. 3. Схема эксперимента по облучению модели U/Pb-сборки на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ (установка «Энергия плюс трансмутация»)

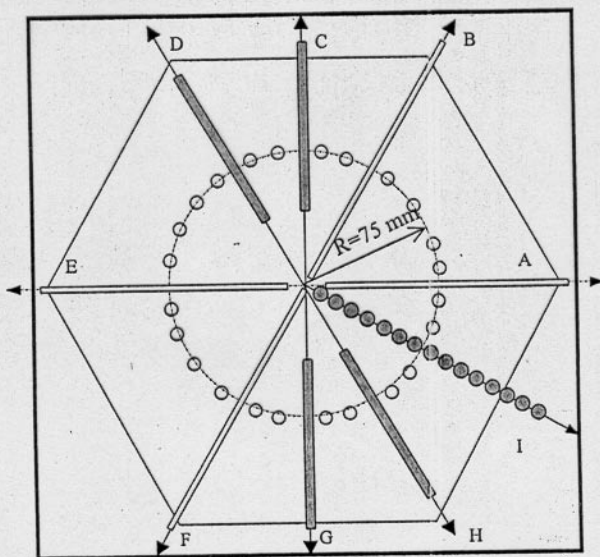


Рис. 4. Расположение активационных и трековых детекторов на центральной пластине с размерами $30 \times 30 \times 0,3$ см (см. рис. 3 и нашу работу [1]). Эксперимент по облучению модели уран-свинцовой сборки на протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ (установка «Энергия плюс трансмутация»)

трековых детекторов [1], а термометрическая методика [1,2] использовалась для измерения общего тепловыделения в зависимости от времени облучения уран-свинцовой сборки. Таким образом, методика трекового ИДУ и термометрия являются взаимно комплементарными.

На рис. 4 показано расположение твердотельных трековых и активационных детекторов на пластине, которая, в свою очередь, помещается между секциями уранового бланкета. Типичные изображения двух участков трековых детекторов (с разной плотностью треков), размещенных на этой пластине по направлениям С, D, G и H — с кадмиевым фильтром и А, В, Е и F — без кадмиевых фильтров, показаны на рис. 5.

Из результатов отдельного определения числа делений нейтронами в различных энергетических областях спектра (тепловые N_t , резонансные N_r и быстрые N_f нейтроны), приведенных на рис. 6, видно, что метод трекового ИДУ обеспечивает получение подробного распределения числа событий деления в выбранных сечениях уранового бланкета с высоким пространственным разрешением, иначе говоря, ИДУ позволяет получать топографию событий деления ядер урана в объеме бланкета.

С помощью интегратора деления урана могут быть определены отношения парциальных скоростей деления ($\lambda_t : \lambda_r : \lambda_f$) в каждой точке измерения (Z,R), а также по всему объему бланкета ($\Lambda_t : \Lambda_r : \Lambda_f$) без измерения спектра нейтронов $\Phi(E_n)$ и без привлечения функций возбуждения $\sigma_f^5(E_n)$ и $\sigma_f^8(E_n)$ в широком диапазоне энергий нейтронов от тепловых до быстрых областей, в том числе и без использования групповых сечений.

4. О возможности применения ИДУ на основе активационной методики

Наряду с методикой трекового ИДУ, предложенной в настоящей работе, возможно использование так называемого активационного ИДУ. В основе обеих методик лежит регистрация осколков деления, причем в трековом ИДУ определяется число треков от осколков деления, образующихся в радиаторах (обедненный и обогатненный уран) и попадающих в трековые ядерные детекторы, а в активационном ИДУ регистрируются гамма-кванты осколков деления, образующиеся в радиаторах, которые в этом случае являются активационными детекторами. Поэтому для ИДУ на основе активационной методики толщины обедненных и обогатненных слоев урана должны быть существенно больше, чем в случае трековых ИДУ из-за различия эффективностей регистрации гамма-квантов и осколков деления.



Рис. 5. Типичное изображение треков, образованных осколками деления ядер урана с плотностью $4.52 \cdot 10^6$ тр./см² (вверху) и $0.5 \cdot 10^6$ тр./см² (внизу).

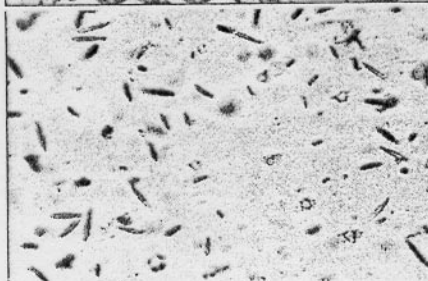
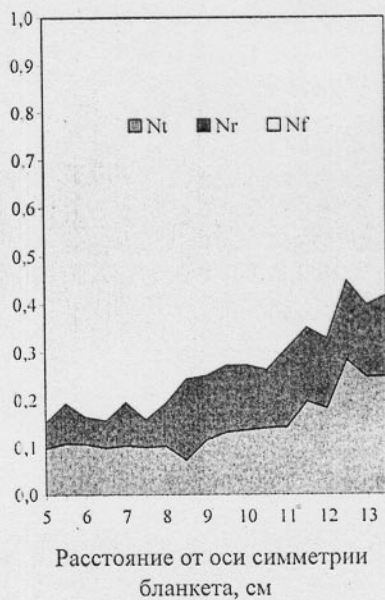


Рис. 6. Относительные вклады тепловых, резонансных и быстрых нейтронов в процесс деления естественного урана в объеме blankets (см.рис.2).



Для активационного ИДУ наиболее подходящими являются долгоживущие осколки деления урана, такие, как ^{103}Ru ($T_{1/2}=39,25$ дн.), ^{141}Ce (35,5 дн.), ^{140}Ba (12,7 дн.), ^{131}I (8,0 дн.) и др., имеющие большие сечения образования и гамма-переходы с большими квантовыми выходами.

Отметим, что активационная методика ИДУ обеспечивает достаточную статистическую точность только при значительных потоках нейтронов, в отличие от трековой методики.

Результаты использования активационных интеграторов деления урана для калориметрии модели подкритического бланкета электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» [1] будут приведены в отдельной публикации.

5. Заключение

Просмотр треков в большом числе трековых ИДУ, которые экспонируются в различных сечениях уран-свинцовой сборки (рис.3) электроядерной установки, может быть произведен с помощью микроскопа с программным управлением автоматическим сканированием, что позволит достичь более высокой производительности и точности определения числа треков по сравнению с трудоемким визуальным просмотром на обычном микроскопе. При различных толщинах и режимах травления трековых детекторов плотность треков может достигать значений до 10^7 тр./см².

Трековый интегратор деления урана является сплошным (непрерывным) детектором в отличие от дискретного расположения активационных детекторов (рис. 4). Это качество позволяет существенно увеличить число каналов съема информации.

Высокое пространственное разрешение (ограниченное только размерами треков), а также большая скорость обработки трековой информации делает методику ИДУ для определения парциальных интегралов деления весьма перспективной в исследованиях распределений тепловыделения в объеме уранового бланкета при взаимодействии с нейтронами полихроматического спектра, генерируемыми в электроядерной мишени.

Таким образом, описанный в данной работе интегратор деления урана на основе трековой методики как физический прибор по существу открывает принципиально новые возможности для получения топографической картины сложных ядерно-физических процессов.

Авторы выражают благодарность А.И.Малахову, Ю.С. Анисимову и П.И.Зарубину за интерес и поддержку исследований по электроядерной тематике.

Персонал инженерно-технических служб Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, руководимый А.Д.Коваленко, авторы благодарят за обеспечение эффективной работы синхрофазотрона при облучении уран-свинцовой сборки электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация». Авторы выражают признательность О.С.Заверюхе и Е.М.Павлюк за помощь в оформлении настоящей публикации.

Авторы благодарят Министерство Российской Федерации по атомной энергии за предоставление материала для уранового бланкета, в экспериментах на котором был использован описываемый в данном сообщении интегратор деления урана. Настоящая работа выполнена в рамках программы экспериментов по электроядерной технологии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 00-02-16476) и гранта МНТЦ (проект 1372).

Литература

1. М.И.Кривопустов, Д.Чултэм, Ц.Тумэндэлгэр и др. О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета U/Pb-сборки электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2000-168, Дубна, август 2000 (принято в журнал "Kerntechnik").
2. Р.Брандт, ..., М.И.Кривопустов, ..., Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм и др. Изучение температурного и нейтронного полей в свинцовой среде при взаимодействии релятивистских протонов. Сообщение ОИЯИ P1-99-117, Дубна, 1999.
3. Х.Абдулаев, А.Капусцик, О.Отгонсурэн, В.П.Перелыгин, Д.Чултэм. Определение концентрации делящихся веществ в твердых телах. ПТЭ, 1968, 2, 73.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июня 2001 года.

Чултэм Д., Тумэндэлгэр Ц., Кривопустов М.И.
Трековый интегратор деления урана для измерения энерговыделения
в подкритическом урановом бланкете электроядерной установки

P1-2001-128

Настоящая работа посвящена разработке и применению новой модификации метода измерения энерговыделения в урановом бланкете электроядерной установки с помощью трековых детекторов, а именно методу интегратора деления урана, который позволяет определить парциальные интегралы деления ядер урана при облучении нейтронами непрерывного спектра. Важное достоинство этого метода заключается в том, что с его помощью могут быть определены отношения парциальных скоростей деления в каждой точке измерения, а также по всему объему бланкета без измерения спектра нейтронов $\Phi(E_n)$ и без привлечения функции возбуждения $\sigma_f^5(E_n)$ и $\sigma_f^8(E_n)$ в широком диапазоне энергий нейтронов от тепловых до быстрых областей, в том числе групповых сечений.

Этот метод был успешно опробован в первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1,5 ГэВ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Chultem D., Tumendelger Ts., Krivopustov M.I.
Uranium Fission Track Integrator
for Measurement of Energy Production
in the Subcritical Uranium Blanket of Electronuclear Assembly

P1-2001-128

Using nuclear track detectors in the uranium blanket of electronuclear assembly partial fission integrals have been measured.

The merit of this method lies in the fact that uranium fission integrals are determined in every points of measurement as well as in whole volume of blanket.

In addition, not only measurement of neutron spectra $\Phi(E_n)$ but also without going into details of excitation functions: $\sigma_f^5(E_n)$ and $\sigma_f^8(E_n)$ in wide range of energies, without recourse to group averaged cross sections are not required.

The method was tested in the experiment on uranium blanket of electronuclear assembly «Energy plus transmutation» calorimetry at 1.5 GeV beam from synchrophasotron (JINR).

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 04.10.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,67

Тираж 375. Заказ 52884. Цена 67 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области