

УДК 539.173.4; 536.51

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УРАНОВОГО ОБРАЗЦА, ОБЛУЧАЕМОГО ВТОРИЧНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

*В.И.Батин, Д.В.Батин¹, В.В.Борисов, Н.М.Владимирова,
В.Г.Георгиев², В.М.Дробин, В.С.Королев, М.И.Кривопустов,
С.В.Семашко, Л.С.Спасов², С.Г.Стеценко*

Проведено измерение температуры уранового образца, облучаемого вторичными частицами, образующимися в свинцовой мишени при взаимодействии с пучком протонов с энергией 1,5 ГэВ и средней интенсивностью $3,9 \cdot 10^9$ прот./с в течение 260 мин. Наблюдалось коррелированное с интенсивностью пучка изменение показаний термодатчиков на основе кварцевого резонатора. Оценка средней мощности, выделившейся в образце, сделанная на основе теплофизической модели, составляет 3,1 мВт и в пределах погрешности совпадает с величиной средней мощности $(3,4 \pm 0,5)$ мВт, полученной на основе данных детектора осколков деления. Чувствительность измерительного канала — 1 мК.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Temperature Measurement of the Uranium Sample Irradiated with Secondary Neutrons

V.I.Batin et al.

The measurement of temperature of the uranium sample irradiated with secondary particles, formed in a lead target, is carried out. The target was irradiated with a proton beam with the energy of 1.5 GeV and intensity $3.9 \cdot 10^9$ p./s during 260 minutes. The thermometers on the basis of quartz resonators have fixed changes of the uranium sample temperature, which correlated on time with beam intensity. The estimation of the average energy allocated in the sample, by using these data and thermophysical model, is made; it is equivalent to 3.1 mW. This value coincides with the value of the average energy of (3.4 ± 0.5) mW, obtained by using the solid state track detector. The sensitivity of the measuring channel was 1 mK.

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

¹Московский инженерно-физический институт

²ИФТТ БАН, София

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании физических процессов в урановых и ториевых мишенях, облучаемых высокоэнергетическими частицами и ядрами, одним из параметров, интересующих исследователей, является количество теплоты, выделившееся в делящемся материале [1,2,10]. Для определения этого параметра, как правило, используются различные варианты калориметрических методов [3], суть которых сводится к регистрации динамического изменения температуры делящегося материала. Надо отметить, что проведение подобного рода исследований сопряжено с достаточно серьезными трудностями, т. к. из-за ограничений по интенсивности первичного пучка необходимо регистрировать очень малые ($\sim 10^{-2}$ К) изменения температуры, и поэтому термодатчики должны иметь высокую чувствительность.

Наиболее высокими метрологическими характеристиками обладают кварцевые термодатчики [4,5,6]. В этих приборах используется свойство некоторых типов кварцевых резонаторов изменять собственную частоту при изменении температуры. Кристалл резонатора в этом случае играет двоякую роль. Он является частью с одной стороны частото-задающей цепи генератора, а с другой — термочувствительного элемента. Конструктивно датчик представляет собой пластинку кварца, помещенную в стальной корпус, который, для увеличения тепловой проводимости между резонатором и корпусом датчика, заполнен азотом или гелием. Чувствительный элемент с помощью экранированного кабеля соединяется с электронной схемой, обеспечивающей возбуждение резонатора и съем сигнала с датчика.

Цель данной работы состоит в проверке методики прямого измерения малых тепло-выделений с помощью кварцевых термодатчиков в условиях интенсивного фона вторичных частиц (γ , η и т.д.).

Использованные в данной работе термодатчики имеют следующие параметры:

Резонансная частота	— 26,6 МГц (300 К)
Чувствительность	— ~ 1000 Гц /К*
Порог чувствительности	— 0,0001 К
Нелинейность выходной хар-ки	— $\sim 0,07$ К*
Масса датчика	— (0,950 \pm 0,01) г
Габаритные размеры	— (11 \times 13,5 \times 3,5) мм

*В диапазоне 233–425 К

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для проверки методики калориметрических измерений с термодатчиком на основе кварцевого резонатора был разработан детектор (рис. 1) и проведено измерение температуры облучаемого уранового образца детектора в сеансе синхрофазотрона в июне 1998 г. Алюминиевый цилиндр с металлическим ураном естественной смеси был помещен в двухслойный термостат из пенопласта. На торце цилиндра располагался термодатчик Т1. Между внешним и внутренним кожухом термостата находился второй, опорный, термодатчик Т2.

Детектор располагался в центре над свинцовой мишенью, помещенной в пенопластовый термостат. Вся сборка была уложена в деревянный короб $\sim 1 \times 1 \times 1$ м (рис. 2,3), обшитый изнутри листовым кадмием и заполненный гранулированным полиэтиленом.

Во время сеанса мишень облучалась пучком протонов синхрофазотрона ЛВЭ с энергией 1,5 ГэВ/с и интенсивностью $3,9 \cdot 10^9$. Облучение длилось 4 часа 20 мин, полный интеграл $4,8 \cdot 10^{13}$ протонов. Показания датчиков регистрировались один раз в секунду. Чувствительность измерительного канала составляет $1 \cdot 10^{-3}$ К. Измерения начались за 1,5 ч до начала облучения и закончились через 25 мин после его окончания.

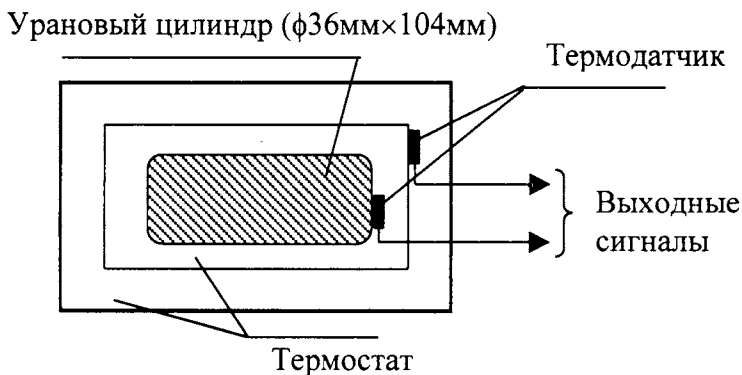


Рис. 1. Эскиз детектора

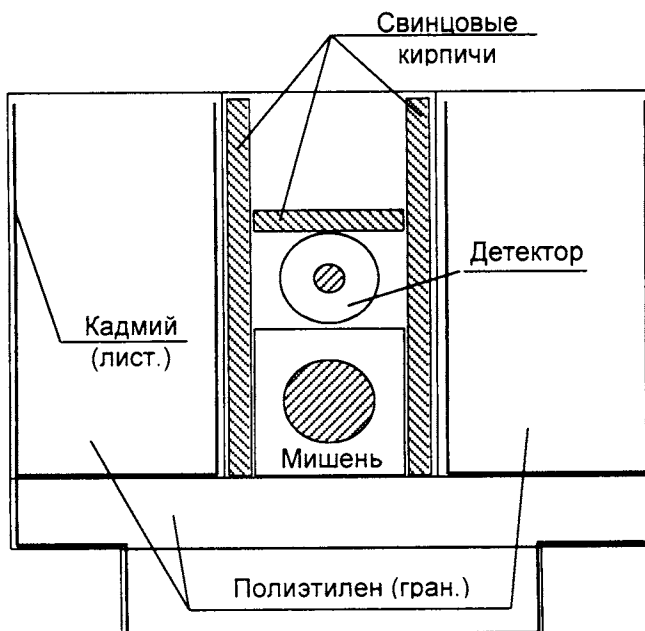


Рис. 2. Эскиз установки

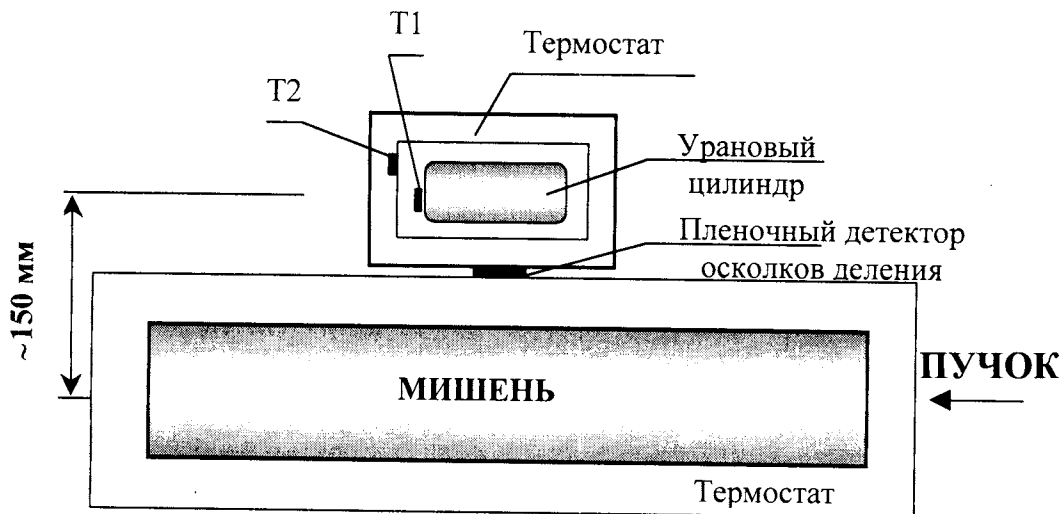


Рис. 3. Расположение детектора относительно мишени (вид сбоку, детали установки не показаны)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Графики изменения температуры, зарегистрированной датчиками Т1 и Т2 совместно с данными об интенсивности пучка, приведены на рис. 4. Нормированный график интенсивности иллюстрирует характер поведения пучка во время сеанса облучения мишени. Графики Т1 и Т2 показывают изменение температуры относительно начальной точки. При этом график Т1 показывает изменение температуры поверхности уранового образца детектора, а график Т2 — изменение температуры внутри кожуха термостата. Разность температур Т1 и Т2 в момент начала измерений составляла $\sim 0,5^\circ \text{C}$ (520 мК). Детектор до размещения в установке в течение нескольких дней находился в более теплом помещении и был установлен примерно за три часа до начала облучения. Поэтому к началу измерений детектор не находился в тепловом равновесии с установкой, в которой температура была ниже. Уменьшение температуры, зарегистрированное до начала облучения обоими датчиками, вызвано процессом теплообмена детектора и установки. Кроме этого, измерения проводились на фоне общего понижения температуры окружающей среды (время измерений $\sim 15 \text{ ч} - 21 \text{ ч } 30 \text{ мин}$).

Графики температур Т1 и Т2 показывают, что с началом облучения падение температуры в детекторе замедлилось. При этом изменение температуры поверхности уранового образца коррелирует с изменением интенсивности пучка (рис. 4). Наблюдаемое замедление падения температуры может быть следствием:

- изменения характеристик датчика, вызванное его облучением;
- тепловыделением в уране вследствие его деления.

Оба датчика находятся в потоке вторичных частиц: нейтронов, заряженных частиц и γ -излучения, которые влияют на параметры датчиков. Однако, поскольку датчики Т1 и Т2 находятся в одинаковых условиях (физически расположены в непосредственной близости один от другого), изменение их параметров, вызванное облучением, должно быть одного порядка.

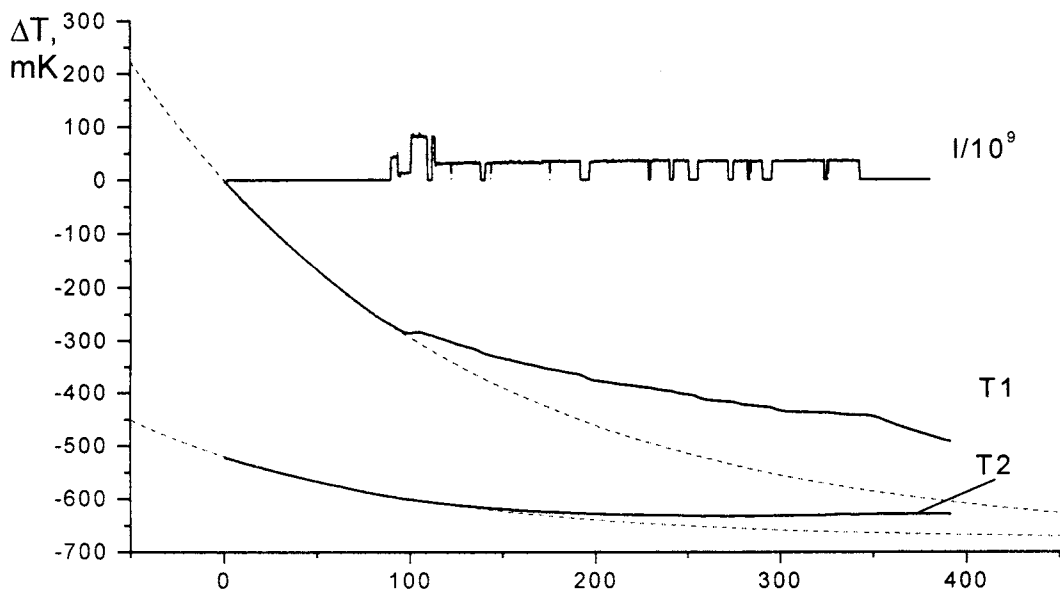


Рис. 4. Графики изменения температур T1 и T2

Влияние нейтронных потоков на кварцевые резонаторы изучено достаточно хорошо [8], и, в зависимости от типа резонатора, это влияние может приводить как к увеличению, так и к уменьшению собственной резонансной частоты прибора, вызывать обратимые и необратимые изменения в структуре кристалла. Все доступные данные, приводимые в литературе, говорят о том, что существенные изменения в структуре кварца происходят при нейтронных потоках $> 10^{10}$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, а в нашем случае предварительная оценка показывает, что максимальный поток нейтронов должен составлять не более $10^6 - 10^7$ $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. По-видимому, величина воздействия нейтронного потока на датчики в данном случае лежит ниже порога чувствительности измерительного тракта.

Оценить с достаточной точностью влияние заряженных частиц и γ -излучения на датчики в данный момент не представляется возможным, и поэтому полностью исключить наличие такого влияния нельзя. Однако отсутствие явной корреляции показаний датчика T2 с интенсивностью позволяет сделать предположение, что такое влияние мало и не вызывает заметных изменений.

Сравнивая между собой показания датчиков, мы видим, что у датчика T1 наблюдается отклик на скачки интенсивности, у датчика T2 такого отклика не наблюдается. Если бы у датчиков изменились их характеристики, то такое изменение было бы одинаковым для обоих датчиков. Таким образом, можно считать, что регистрируемые изменения показаний датчиков имеют тепловую природу.

4. ОЦЕНКА МОЩНОСТИ, ВЫДЕЛЯЕМОЙ В УРАНОВОМ БЛОКЕ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Хотя измерения проводились только в одной точке поверхности уранового образца и в одной точке внутри термостата, анализ показывает, что для получения оценки средней

мощности температуру поверхности уранового образца можно считать одинаковой для всех точек, и плотность потока тепла с поверхности также можно считать одинаковой по всей поверхности.

От времени сборки системы до начала измерения прошло около 3,5 ч, за это время нестационарный процесс теплопроводности должен был перейти в регулярный режим, при котором температура $T(x, y, z, t)$ любой точки внутри тела или системы тел изменяется по закону

$$T(x, y, z, t) = T_c + A \cdot U(x, y, z) \cdot e^{-mt},$$

где T_c — температура на границе системы.

Температура $\Delta T = T - T_0$, отсчитываемая от некоторой начальной температуры T_0 , тогда будет иметь следующий вид:

$$\Delta T = T_c - T_0 + A \cdot U(x, y, z) \cdot e^{-mt},$$

поскольку в начальный момент $\Delta T = 0$, следовательно, и окончательно:

$$A \cdot U(x, y, z) = T_c - T_0,$$

где m — темп регулярного режима.

Приведенное выражение находится в хорошем согласии с экспериментальными данными для временного интервала, предшествующего облучению, $m_2 = (8,25 \pm 0,09) \cdot 10^{-3}$, $T_c - T_{02} = 141,5 \pm 1,3$; $m_1 = (5,92 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$, $T_c - T_{01} = 656 \pm 2$.

В стадии регулярного режима распределение температуры в урановом образце можно считать равномерным, и поэтому можно положить температуру поверхности равной средней по объему температуре урана. Далее везде считается $T_s = \langle T \rangle_v = T$. Уравнение теплового баланса в этом случае:

$$C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + q_n \cdot S = P,$$

где C — теплоемкость образца; q_n — плотность потока тепла с поверхности блока; S — площадь поверхности; P — мощность, выделяемая в блоке. В отсутствие источников тепла

$$q_n = -\frac{C}{S} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Используя регулярный режим, получаем для q_n :

$$q_n = -m \cdot \frac{C}{S} \cdot (\Delta T - T_c + T_0).$$

И далее

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + m \cdot (\Delta T - T_c + T_0) = \frac{P}{C}.$$

Решая это уравнение, находим для ΔT :

$$\Delta T = (T_c - T_0) \cdot (1 - e^{-mt}) + \frac{P}{mC} \cdot (1 - e^{-m(t-t_0)});$$

t_0 — время начала выделения мощности.

Применяя полученную зависимость к экспериментальным данным, мы находим среднюю мощность, выделяемую в уране, усредненной по всему интервалу времени облучения $P = 3,1$ мВт.

Показания датчика T2, а также «тонкая структура» в графике T1, вызванная скачками интенсивности, качественно и количественно объясняются приведенной моделью.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕТЕКТОРА ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Для проверки результатов, полученных с помощью теплофизической модели, произведен расчет энергии, выделившейся в урановом образце за счет деления ядер урана. При этом для определения количества событий деления использовался детектор, состоящий из урановой фольги толщиной 50 мкм того же изотопного состава, что и уран образца, и находящейся с ней в плотном контакте лавсановой пленки толщиной 160 мкм (регистраются с 90% эффективностью осколки деления ядер урана, вылетевшие в 2π). Определение количества событий деления ядер урана в образце проводилось в предположении, что поток нейтронов и других, вызывающих деление ядер, частиц, одинаков по энергетическому спектру и в области уранового образца, и пленочного детектора, а по интенсивности отличается на отношение квадратов расстояний от оси пучка. Использование такого детектора, при вышеуказанном допущении, позволяет определить количество событий деления без энергетического спектра нейтронов и измерения сечений деления урана нейтронами различных энергий, а также без измерения интенсивности первичного пучка протонов.

Для определения числа событий деления и расчета энерговыделения использованы следующие данные:

Вес образца		1720 г
Высота		104 мм
Диаметр		36,5 мм
Плотность урана	ρ	19,04 г/см ³
Расчетная толщина алюминиевого покрытия		1,65 мм
Вес алюминиевого покрытия		58,4 г
Вес урана в образце		1659 г
Длина блока металлического урана	L	100,7 мм
Диаметр	D	33,2 мм
Эффективно работающий слой урана	d	$4,5 \cdot 10^{-3}$ г/см ²
Плотность треков в детекторе	N_1	$1,13 \cdot 10^6$ тр./см ²
Эффективность регистрации осколков	α	0,7
Расстояние от центра пучка до детектора	R_1	85 мм
Расстояние от центра пучка до центра образца	R_2	150 мм
Величина энерговыделения в одном делении	K	$2,59 \cdot 10^{-11}$ Дж
Время облучения	Δt	$1,41 \cdot 10^4$ с

Количество событий деления ядер урана:

$$N^{\text{дел}} = \pi \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \frac{N_1}{\alpha} \cdot \frac{L\rho}{d},$$

и мощность, выделившаяся в урановом образце:

$$P = \frac{N^{\text{дел}} K}{\Delta t}.$$

Величина энерговыделения при одном событии деления урана принималась равной 162 МэВ — энергии осколков деления, всеми остальными источниками энерговыделения (η , γ и т.д.) пренебрегали из-за небольшого размера уранового образца и малого времени измерения. Величина средней мощности, полученная на основе данных детектора осколков деления, составляет $(3,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ Вт.

6. ВЫВОДЫ

Совпадение результатов, полученных двумя независимыми методами, позволяет сделать вывод о том, что предложенный способ прямого измерения малых тепловыделений в условиях интенсивного фона вторичных частиц вполне работоспособен и показывает хорошие результаты.

Большой запас по чувствительности детектора позволяет существенно (в 20–30 раз) уменьшить массу уранового образца и соответственно уменьшить габаритные размеры детектора.

Предложенная методика позволяет проводить on-line измерения тепловыделений при существенном уменьшении времени облучения, с заранее заданной требуемой точностью. Это утверждение иллюстрирует график зависимости относительной погрешности определения средней мощности от времени измерения (рис. 5).

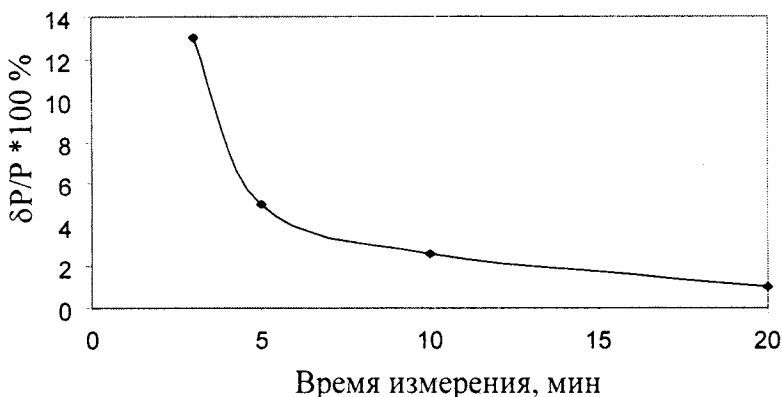


Рис. 5. Зависимость величины ошибки от длительности временного интервала

Авторский коллектив приносит глубокую благодарность руководству отдела Физики многочастичных систем ФИАН (отдел «Дубна») за поддержку данной работы, а также профессору И.А.Шелаеву и профессору С.А.Хорозову за очень полезные обсуждения и рекомендации по обработке экспериментального материала.

Литература

1. Михайлов В.Н. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1996, №6[80]-96, с.17.
2. Rubbia C. — Physics Letters, 1995, v.B348, с.697.
3. Ашш Ж. и др. — Датчики измерительных систем. М.; Мир, 1992.
4. Малов В.В. — Пьезорезонансные датчики. М.; Энергия, 1978.
5. Спасов Л., Дробин В. и др. — Препринт ОИЯИ, 1996.
6. Кварцевый термопреобразователь ТПР-К. Техническое описание и паспорта датчиков № 393, Н028, Н032, Н002, Н024, 825.
7. Баков А. и др. — Атомная энергия, 1980, т.48 вып.1, с.39.
8. Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем. (пер. с англ.) Под ред. В.Н.Быкова и С.П.Соловьева, М.: Атомиздат 1967.
9. Юревич В.И. и др. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1998, №3[89]-98, с.65.
10. Проблемно-тематический план научно-исследовательских работ и международного сотрудничества ОИЯИ на 1999 год.