



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-117

P1-99-117

Брандт, Р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО
И НЕЙТРОННОГО ПОЛЕЙ В СВИНЦОВОЙ СРЕДЕ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ПРОТОНОВ

Направлено в журнал «Kerntechnik»

1999

1. Введение

Р.Брандт¹, Д.В.Беляков, Б.Бисплингофф², А.В.Воронков³, В.М.Дьяченко, П.И.Зарубин, П.С.Казновский⁴, С.П.Казновский⁴, М.И.Кривопустов, Э.-Й.Лангрок⁵, В.Ф.Мищенко⁴, Д.Модоло², Р.Одой², М.Окс¹, И.Н.Острецов⁴, В.П.Пашенко⁴, А.П.Разинков, А.Н.Соснин, Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм, А.Г.Чурбанов³ и Ю.Л.Шаповалов⁴

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) на синхротроне и синхрофазотроне Р.Г.Васильковым и др. [1] и К.Д.Толстовым и др. [2] выполнен обширный цикл работ по изучению физических аспектов электроядерного способа получения энергии.

В 1994-1998 гг. в продолжение этих исследований проведены эксперименты по генерации нейтронов и изучению зашлаковывания и отравления электроядерных реакторов [3], а также трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики (йод-129, нептуний-237 и америций-241) [4].

Обсуждению различных проблем электроядерной технологии как одного из перспективных направлений ядерно-физических исследований, которое можно объединить кратким названием "физика высоких энергий плюс ядерная энергетика", в последние годы посвящено много публикаций (см., например, [5-9]).

Настоящая работа является частью программы исследований ОИЯИ по электроядерной тематике (проект "Энергия+Трансмутация" [9]) и содержит результаты двух экспериментов, проведенных на свинцовой мишени с размерами 50×50×80 см и массой 2300 кг с использованием протонного пучка синхрофазотрона.

Первый эксперимент, описываемый в настоящей работе, был проведен при энергии протонов 1,5 ГэВ с целью изучения замедления нейтронов, генерируемых в p+Pb- взаимодействиях в указанной протяжённой свинцовой мишени.

Нейтронная оболочка ядра свинца является замкнутой ($N_n=126$), вследствие чего сечения поглощения нейтронов малы, т.е. замедляющие и поглощающие свойства свинца удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу электроядерной мишени.

Что касается измерения энергетических характеристик замедляющихся нейтронов внутри большого свинцового блока, облучаемого пучком релятивистских протонов, то возникает ряд методических трудностей, связанных с относительно малой плотностью потока образующихся нейтронов и с большой вероятностью интерференции различных ядерных реакций под действием нейтронов, заряженных частиц и ядерных фрагментов. По этим причинам не были использованы хорошо известные методы измерения нейтронного спектра, такие как времяпролётный, по протонам отдачи, по времени замедления и резонансная активация. В настоящем эксперименте с помощью активационной методики выполнено измерение только интегральных

¹Институт ядерной химии при университете имени Филиппса, Марбург, Германия

²Исследовательский центр, Юлих, Германия

³Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша, Москва, Россия

⁴Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения, Москва, Россия

⁵Исследовательское бюро, Хоерсверда, Германия

выходов реакций на ядрах золота под действием быстрых, резонансных и тепловых нейтронов и получены данные, необходимые для оптимизации размеров свинцовой мишени-конвертора и уранового blankets многоцелевой полномасштабной U/Pb-сборки [9].

Второй эксперимент был выполнен с целью исследования процесса тепловыделения при взаимодействии высокоэнергетического пучка протонов с массивной мишенью из тяжёлого металла. Описание электроядерного эксперимента, проведенного с использованием теплофизической методики, можно найти, например, в работе [5в]. Значение энергии протонного пучка, использованного в настоящем эксперименте, равно 5 ГэВ, т.е. превосходит значение энергии (1 - 2 ГэВ), принятое в различных проектах по созданию электроядерных систем. Необходимо отметить, что при переходе к энергии 5 ГэВ, во первых, область распределения источников тепловыделения расширяется вдоль направления пучка за счет увеличения ядерной длины в свинце до значения $\lambda \sim 35$ см [10]. Это позволяет создать благоприятные методические условия для измерения распределения температуры с улучшенным пространственным разрешением. К тому же возрастает средняя множественность рождения пионов разных знаков [11,12] – что оказывает влияние на пространственное распределение источников тепловыделения.

Таким образом, полученные в этом эксперименте данные о пространственно-временном распределении температуры в сплошной свинцовой среде, а также результаты компьютерного моделирования, выполненного в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша (Москва) [13], будут весьма полезными в изучении мезон-нуклонного каскада и энергетических характеристик полномасштабной уран-свинцовой сборки [9], создаваемой в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (Дубна) при участии Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного энергетического машиностроения (Москва).

2. Мишень. Ускоритель. Мониторинг пучка

В описываемых экспериментах в качестве мишени использовался свинцовый блок (см. рис. 1), на котором был выполнен обширный цикл исследований по генерации нейтронов при бомбардировке пучками протонов и лёгких ядер, ускоряемых на синхрофазотроне ОИЯИ [2,3].

Протонные пучки с энергией 1,5 или 5 ГэВ попадали на свинцовую мишень через углубление с размерами 10×10×20 см. Направление

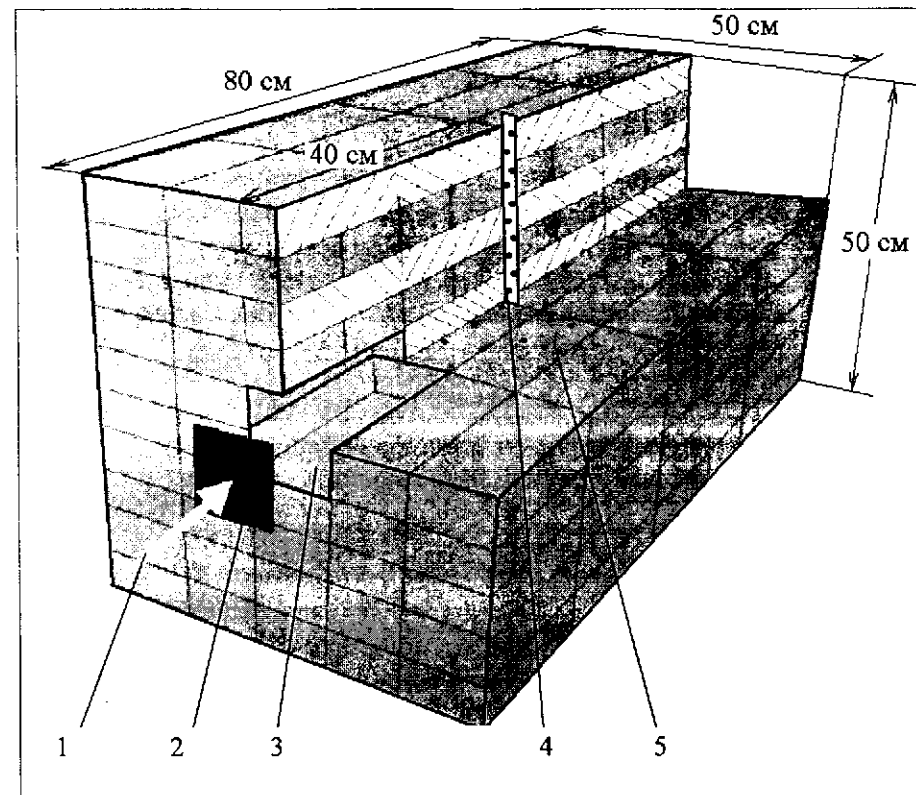


Рис. 1. Схема эксперимента (июнь 1998 г.) по облучению протонными пучками синхрофазотрона с энергиями 1,5 и 5 ГэВ свинцовой мишени (50×50×80 см, масса 2300 кг) с целью изучения энерговыделения и распределения нейтронов. Эта мишень собрана из свинцовых кирпичей, имеющих следующие размеры: 5×10×20 см.

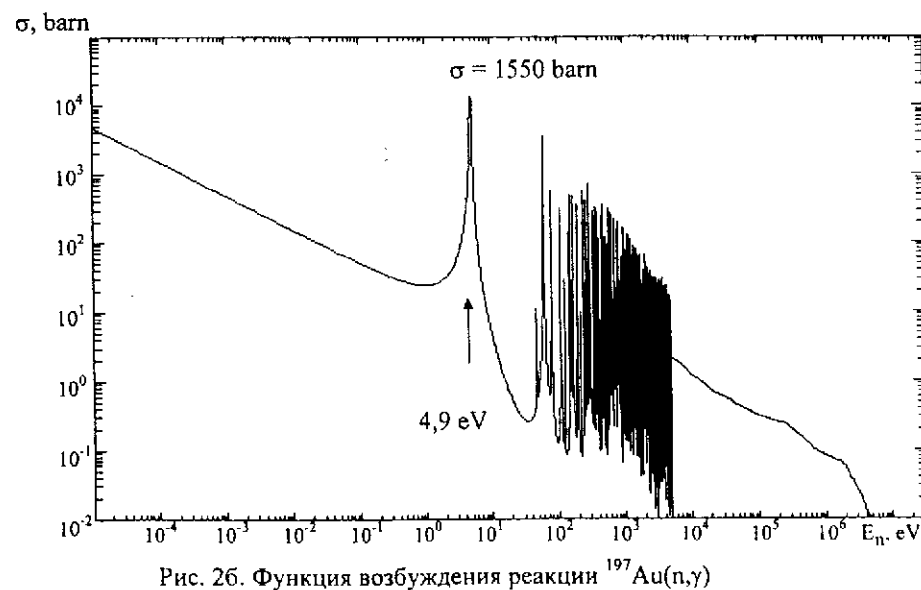
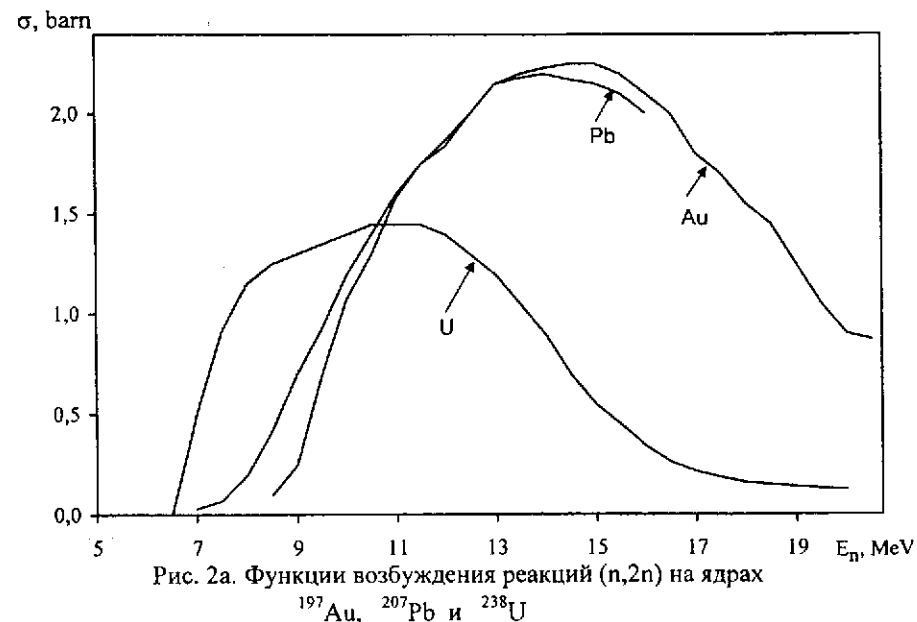
- 1 - протонный пучок из синхрофазотрона;
- 2 - монитор (активационный и SSNT – детекторы);
- 3 - входное окно (10×10×20 см) для ввода протонного пучка внутрь свинцовой мишени;
- 4 - пластина с активационными детекторами из золота (с кадмиевыми экранами и без экранов);
- 5 - места расположения микротермопар (см. рис. 5)

падающего пучка совпадало с горизонтальной осью свинцового блока, а интенсивность пучка составляла примерно 10^{11} протонов/импульс с временными интервалами между импульсами около 9 с. Мониторинг пучка производился с помощью пропорциональных ионизационных камер и активационных и твёрдотельных ядерных трековых детекторов, а определение профиля протонного пучка выполнялось высокочувствительными поляроидными плёнками. Сечение пучка имеет форму, близкую к эллипсу с осями 25 и 30 мм. Рис. 1 иллюстрирует размещение монитора, активационных детекторов и термометрических датчиков на большой свинцовой мишени, использовавшихся в данных экспериментах. Эта мишень тщательно юстировалась относительно направления пучка с помощью поляроидных плёнок.

3. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в протяжённой свинцовой мишени

3.1. *Цель эксперимента.* Для оптимизации геометрических размеров свинцовой мишени-конвертора и уранового blankets U/Pb – сборки, которая создаётся в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для комплексных исследований физических аспектов электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов на пучках синхрофазотрона/нуклотрона ОИЯИ [9], в описываемом ниже эксперименте проведено изучение распределения нейтронов по энергиям и координатам в свинцовом блоке с размерами $50 \times 50 \times 80$ см при энергии протонов 1,5 ГэВ. Кроме этого, задача по исследованию пространственно-энергетического распределения нейтронов в протяжённой мишени представляет значительный интерес и для развития теории адронных ливней в сплошных средах из тяжёлых элементов.

3.2. *Методика эксперимента.* Для изучения характеристик нейтронного поля внутри свинцовой мишени, т.е. определения вкладов тепловых, резонансных и быстрых нейтронов в полный нейтронный спектр, использовались 10 активационных детекторов из золота (каждый из них имеет массу ~ 90 мг); половина этих детекторов была закрыта кадмиевыми экранами толщиной 1 мм, которые полностью поглощают нейтроны с энергией меньше 0,5 эВ. Эти активационные детекторы смонтированы на пластине, которая помещалась внутри свинцового блока на расстоянии 40 см от его торца (см. рис.1). Выбор золота в качестве активационного детектора обусловлен его высокой чувствительностью (большие сечения (n,γ) - и $(n,2n)$ -реакций в исследуемых областях спектра нейтронов; см. рис. 2), а также



оптимальных для облучения и измерений периодов полураспада нуклидов ^{196}Au и ^{198}Au и больших выходов регистрируемых гамма-квантов (см. рис. 3а). Отметим, что наибольший вклад в резонансный интеграл радиационного захвата золота вносит резонанс при энергии 4,9 эВ с сечением 1550 барн, как видно из рис. 2б.

Гамма-спектроскопические исследования этих детекторов производились с помощью Ge(Li)-детектора объемом 50 см^3 и разрешением 2,5 кэВ при энергии 1332,5 кэВ. Методические вопросы измерений и обработки гамма-спектров подробно описаны в наших работах [3,4].

Пространственное распределение быстрых нейтронов изучалось по активности ядер $^{196}\text{Au}^*$, образующихся в реакции $^{197}\text{Au}(n,2n)$, а распределение медленных нейтронов - по активности ядер $^{198}\text{Au}^*$ из реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$.

3.3. Быстрые нейтроны. Как видно из рис. 3б, в радиальном направлении в выходе реакции $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}^*$ наблюдается спад (кривая А), тогда как выход реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}^*$ возрастает (кривая В). Это свидетельствует о том, что спектр нейтронов смягчается при удалении по радиусу от оси симметрии свинцового блока, которая в ходе юстировки совмещалась с направлением бомбардирующего пучка. Подавляющее большинство нейтронов с энергиями $14\pm 5\text{ МэВ}$ покидают область со значениями радиуса около 5 см от указанной оси симметрии (см. рис. 2а и 3б). Поэтому значение диаметра свинцовой мишени как центральной части U/Pb-сборки, оптимально в интервале 8÷10 см, что обеспечит проникновение в урановый бланкет быстрых нейтронов, способных эффективно производить деление ядер ^{238}U (порог деления $E_{\text{п}}=0,8\text{ МэВ}$). Плавное уменьшение выхода $(n,2n)$ -реакции при удалении от продольной оси симметрии свинцового блока показывает, что минимальный радиус так называемый "бесконечной" мишени имеет диффузную границу при значении радиуса около 15 см, за которой размножение нейтронов практически прекращается.

3.4. Тепловые и резонансные нейтроны. Полный выход реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}^*$ и выход реакции поглощения только надкадмиевых нейтронов в зависимости от радиуса R относятся к областям тепловых и резонансных нейтронов. Интегрированные по азимуту относительные выходы $N \times R$ в зависимости от радиуса различаются в этих двух случаях (см. кривые В и С на рис. 3б). При значениях радиуса до 15 см разница существенно меньше, чем при значениях радиуса больше 15 см, что свидетельствует о термализации спектра нейтронов в периферической области свинцового блока.

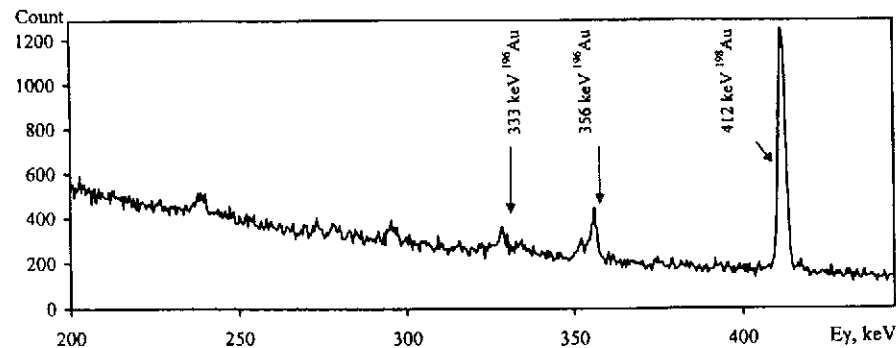


Рис. 3а. Спектр гамма-квантов активационного детектора из золота, облученного нейтронами внутри свинцового блока (см. рис 1)

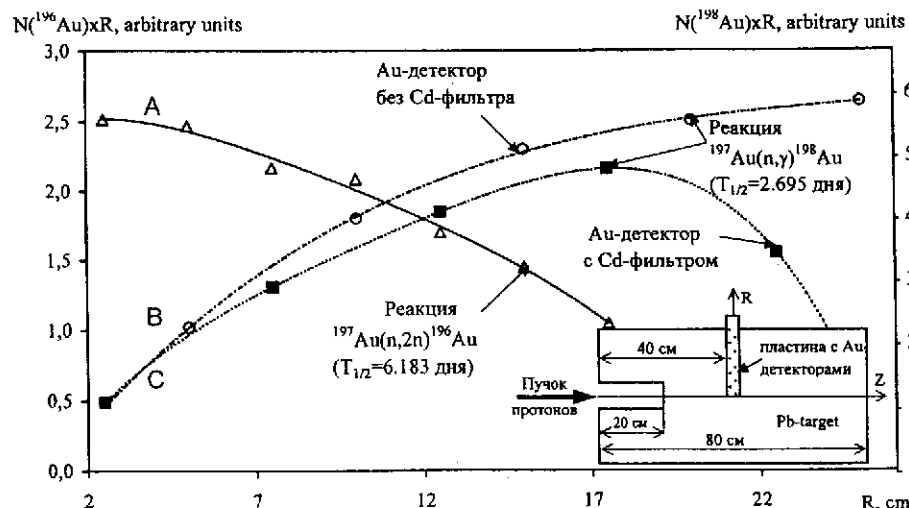
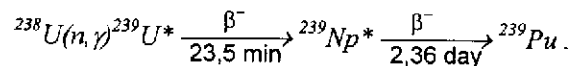


Рис. 3б. Пространственное распределение образования ядер ^{196}Au быстрыми нейтронами в реакции $^{197}\text{Au}(n,2n)$ и ядер ^{198}Au медленными (над- и подкадмиевыми) нейтронами в реакции $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$.

На этом рисунке линии проведены только для соединения экспериментальных точек; по оси ординат отложено произведение $N \times R$, где N-число образовавшихся ядер ^{196}Au и ^{198}Au в указанных реакциях, а R-расстояние от оси мишени до точки расположения активационных детекторов в объеме мишени (см. схему, приведенную в нижней части рисунка, а также рис. 1)

Этот вывод крайне важен при определении внешних размеров уранового blankets U/Pb-сборки, создаваемой для проведения нейтронных и теплофизических исследований [9]. Под термином "blanket" здесь подразумевается часть сборки, составленная не только из урановых стержней, но и, например, из некоторого количества свинцовых стержней, имитирующих жидкометаллический теплоноситель (Hg, Pb, Bi).

Как видно из рис. 36, радиус в интервале 15-25 см оптимален для размещения образцов при исследовании трансмутации радиоактивных отходов тепловыми и резонансными нейтронами. Значение радиуса для размещения этих образцов зависит от композиции уран-свинцового blankets; в каждом конкретном случае требуется измерение радиального распределения общего выхода (n, γ) -реакции. Результат настоящего эксперимента (кривая В на рис. 36) является частным случаем, когда blanket состоит только из свинца. Максимальный выход (n, γ) -реакции наблюдается в области значений радиуса, близких к 20 см. В случае уран-свинцового blankets, скомпонованного преимущественно из естественного урана, резонансный интеграл радиационного захвата в широком энергетическом интервале от 1 эВ до 1 МэВ (см. рис. 4а) ответственен за воспроизводство делящегося материала:



Данные, необходимые для вычисления этого интеграла представлены на рис. 4а и б.

Отметим, что плутоний-239, который образуется в электроядерной системе, подвергается эффективному выжиганию, обусловленному большими значениями сечений деления тепловыми (747 барн) и резонансными (303 барн) нейтронами. Именно это важное обстоятельство обеспечивает не только увеличение энерговыделения, но и безопасность ядерной энергетики в области нераспространения делящихся материалов.

4. Пространственно-временное распределение температуры

4.1. *Методика и калибровка измерений.* Схема эксперимента по исследованию нестационарного распределения температур в объёме свинцовой мишени при её облучении пучком релятивистских протонов с использованием методики на основе высокочувствительных микро-

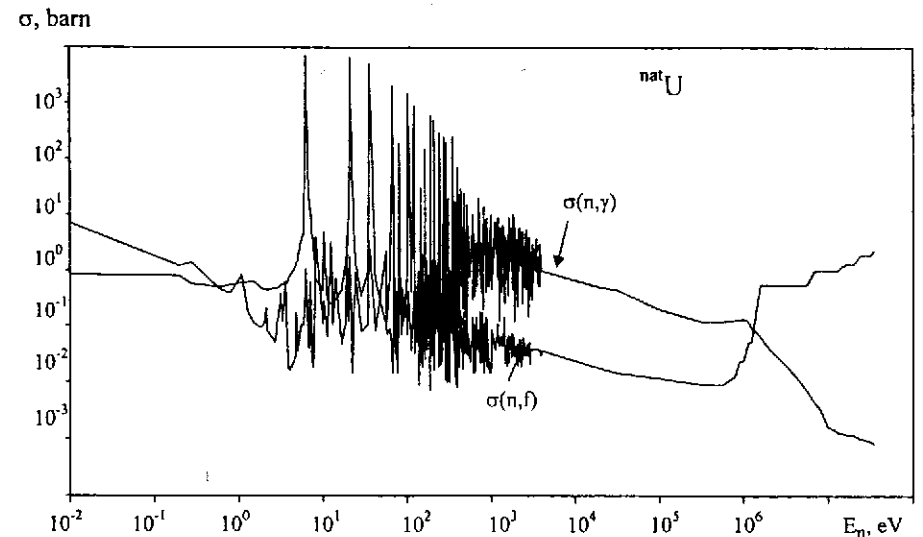


Рис. 4а. Зависимость сечений деления и радиационного захвата для природного урана от энергии нейтронов

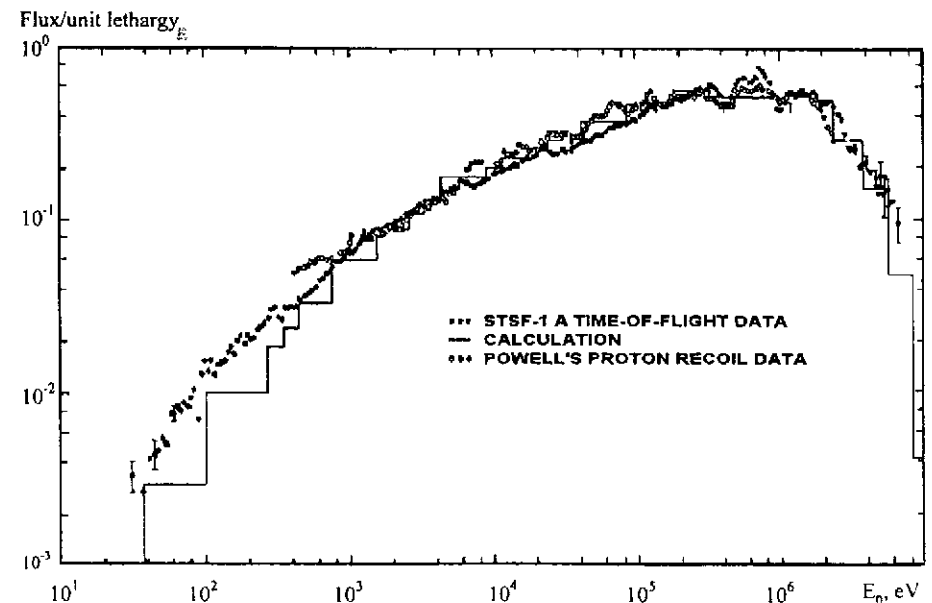


Рис. 4б. Типичный спектр нейтронов подкритической урановой сборки на быстрых нейтронах (пояснения см. в работе [15])

термопар показана на рис. 1 и 5. Характеристики этих микротермопар и специальных средств регистрации сигналов на базе микропроцессоров позволяют надежно зафиксировать изменения температур с точностью 0,02 - 0,03°C.

Эти малоинерционные высокочувствительные микротермопары представляют собой отрезки кабеля марки КТМС длиной 5000 мм и наружным диаметром 1,5 мм. Наружная оболочка такого кабеля выполнена из нержавеющей стали марки 08X18H10T. Внутри кабеля расположены изолированные от внешней оболочки окисью алюминия две жилы хромель-копелевой проволоки диаметром 0,6 мм каждая. Измерительный спай микротермопары (т.е. точка измерения температуры) образован лазерной сваркой жил кабеля. Для обеспечения надежного теплового контакта микротермопары с материалом объекта измерения термопары припаивались к свинцовым пластинам, которые размещались между свинцовыми кирпичами (5×10×20 см) и прижимались пятью слоями таких же кирпичей (см. рис.1). Для исключения ошибок при измерении температуры, обусловленных воздействием внешних электромагнитных полей, измерительный спай изолируется от оболочки кабеля и герметизируется торцевой крышкой, которая приваривается к оболочке герметичным лазерным швом. Выводы микротермопары наращиваются привариванием хромель-копелевой проволоки диаметром 0,6 мм, удобной для подключения компенсационного кабеля; место этого соединения герметизируется эпоксидным компаундом.

Описанная конструкция микротермопары позволяет получать высокую достоверность результатов измерений при инерционности измерительного спая не выше 0,6 с и высокую механическую прочность при длительной эксплуатации.

Такая калориметрическая методика успешно применяется для прецизионных измерений, связанных с диагностикой работы ядерных энергетических реакторов [14].

На физической модели свинцового блока с помощью регулируемого источника тепловыделения были выполнены калибровочные эксперименты с целью

- определения диапазонов измерения температурных градиентов (скорость нагрева) в мишени;
- оптимизации размещения микротермопар в протяжённой мишени;
- калибровки измерительных каналов и аппаратуры.

В ВНИИ атомного энергетического машиностроения и Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша (Москва) были выполнены оценки тепловыделения путём решения задач теплопроводности

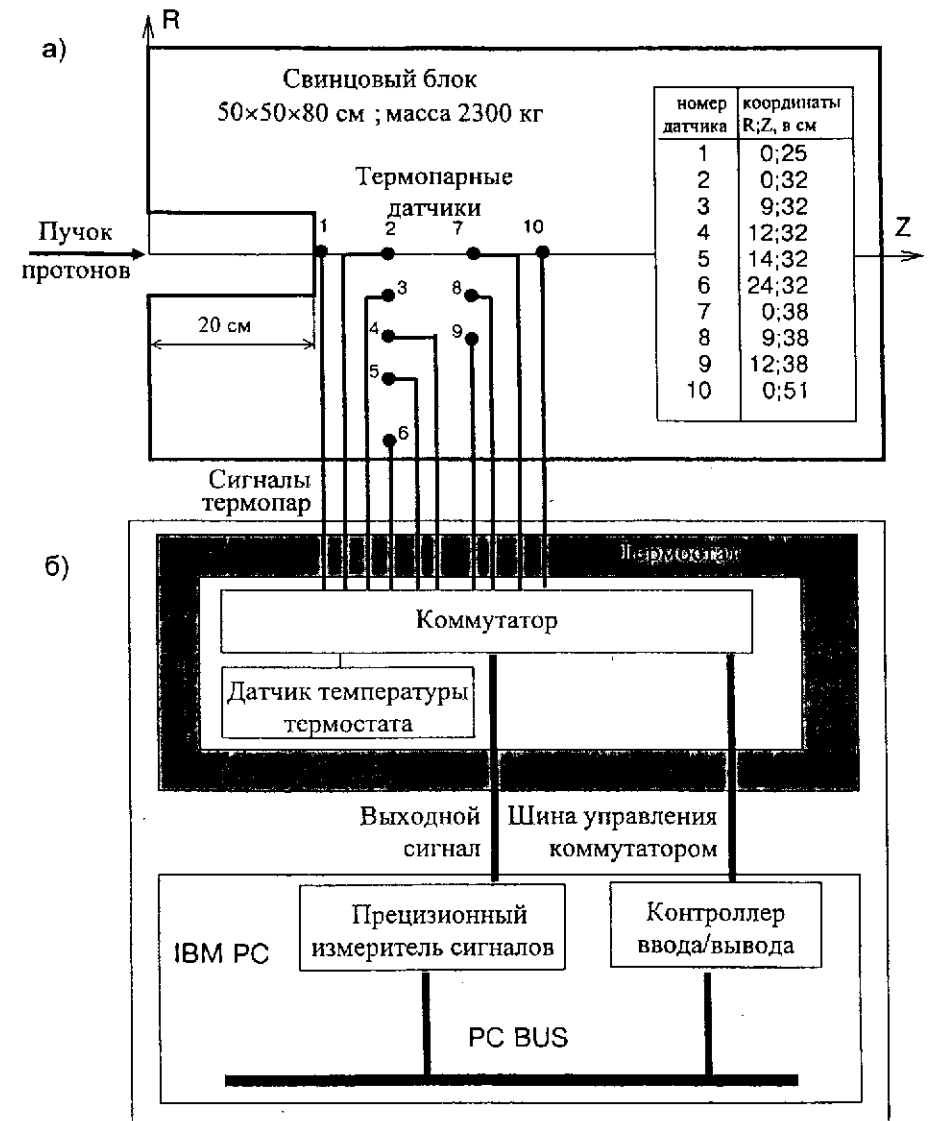


Рис. 5 а). Схема эксперимента (июнь 1998 г.) по изучению энергосвечения в большой свинцовой мишени на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ с использованием термометрической методики на основе малоинерционных микротермопар. В свинцовом блоке по указанным на рисунке координатам установлено 10 термопар в горизонтальной плоскости ($y=0$). б). Блок-схема аппаратуры для измерения температуры в объёме свинцовой мишени, показанной на рис. 1

для (1) - сферической (мишень и область энергосвечения имеют форму концентрических сфер с размерами, эквивалентными по объему реальной мишени) и (2) - цилиндрической (численным методом с использованием соответствующих программ) геометрии.

В свинцовой мишени с учётом экспериментальных данных [2,3] и результатов моделирования и оценок были выбраны координаты для размещения 10 термопар в горизонтальной плоскости. На рис. 5 приведена блок-схема аппаратуры для измерения температуры, которая позволяет визуально наблюдать на дисплее персонального компьютера изменения термограмм в ходе облучения свинцовой мишени.

4.2. *Результаты эксперимента и обсуждение.* На рис. 6 показаны термограммы, полученные в эксперименте с помощью десяти термопар, которые были размещены следующим образом (см. рис. 1 и 5): термопары 1, 2, 7 и 10 располагаются вдоль оси симметрии мишени и направления протонного пучка, при этом термопара 10 находится на глубине 31 см от плоскости падения пучка на мишень. Термопары 2, 3, 4, 5 и 6, а также термопары 7, 8 и 9, расположенные в двух плоскостях (при $Z=32$ и 38 см соответственно), позволяют получить нестационарные распределения температур в радиальных направлениях. При этом термопара 6 размещена на глубине 1 см от поверхности мишени.

Из рассмотрения термограмм можно выявить следующие основные особенности изменения температуры в зависимости от времени в различных точках свинцовой мишени в процессе ее облучения.

- Вдоль оси протонного пучка ($R=0$; см. рис. 5 и 6а) значения температуры в точках 1, 2 и 7 практически совпадают; в этих точках наблюдается мгновенная реакция на изменение режима подачи пучка: происходит непрерывный рост температуры во время облучения и снижение температуры с моментов отсутствия протонного пучка на мишени. Скорость нарастания температур в указанных выше точках составляет около $0,009^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (соответственно, нагревы при продолжительности облучения протонным пучком от 8 до 25 минут составляли от $0,07$ до $0,20^{\circ}\text{C}$). В точке 10 (см. рис. 6а) скорость изменения температуры заметно ниже ($0,004 - 0,005^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), а соответствующие величины нагревов составляют от $0,03$ до $0,10^{\circ}\text{C}$; при этом реакция этой термопары не столь резкая, как отклик термопар в точках 1, 2 и 7.

- По радиусу мишени в плоскости $Z=32$ см скорость изменения температуры непрерывно снижается с удалением от оси пучка (точка 2), тем не менее во всех точках (3, 4, 5 и 6), т.е. включая и периферию мишени ($R=24$ см, точка 6), нагрев зафиксирован практически мгновенно с момента попадания протонного пучка на мишень. За время сеанса

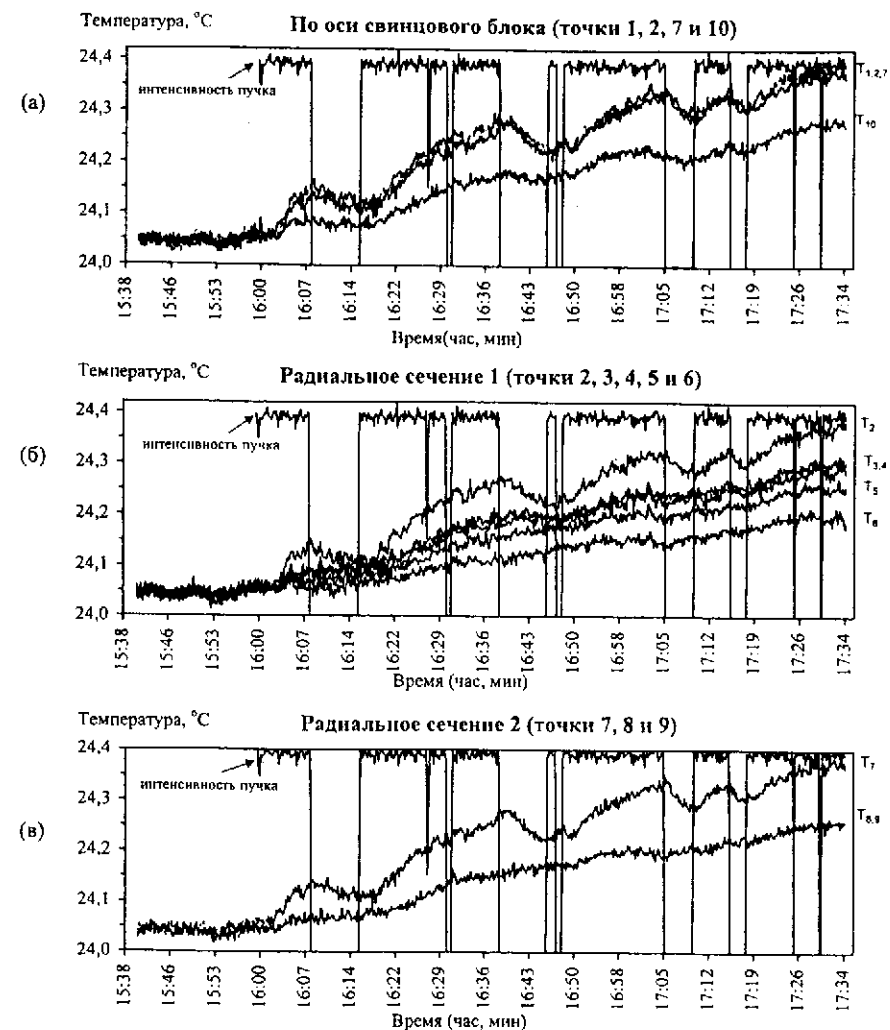


Рис. 6. Термограммы, иллюстрирующие пространственное развитие разогрева свинцового блока (50x50x80 см; масса 2300 кг) в процессе его облучения протонами с энергией 5 ГэВ с учётом включений и отключений пучка. По оси ординат (справа) показаны номера термопарных датчиков T_1-T_{10} , координаты которых приведены на рис. 5а. Кроме этого, на рисунках для иллюстрации показано изменение интенсивности протонного пучка в ходе облучения мишени (в относительных единицах)

(~1,5 часа) нагрев в точке 6 составил $0,15^{\circ}\text{C}$; реакция на изменение подачи пучка на мишень в точках 3 и 4 ($R=9$ и 12 см соответственно) незначительна, а в точках 5 и 6 ($R=14$ и 25 см) практически отсутствует, т.е. происходит непрерывный плавный рост температуры. Как показали предварительные расчеты, выполненные в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша, для случая передачи тепла в радиальном направлении только за счет теплопроводности термодара в точке 6 должна среагировать через $1,5-2,5$ ч, в точке 5 – через $15-20$ мин, а в точках 4 и 9 – через $5-10$ мин после начала облучения мишени. В этих оценках априори учитывалось только взаимодействие протонов с ядрами свинца в ограниченной по размерам центральной области мишени.

• Аналогичная картина в плоскости $Z=38$ см, только в этом случае непрерывный рост температуры (т.е. отсутствие реакции на прекращение облучения мишени) наблюдается уже при $R=9$ см (точка 8).

Из анализа термограмм можно сделать следующие выводы:

1). Совпадение термограмм в точках 1, 2 и 7 означает, что суммарные вклады взаимодействия первичных протонов и вторичных частиц на глубине от 20 до 40 см в тепловыделение практически одинаковы, при этом нагрев происходит мгновенно. Характер термограммы в точке 10 определяется меньшим значением тепловыделения.

2). В радиальных направлениях ($Z=32$ и 38 см) по мере удаления от оси пучка тепловыделение заметно уменьшается. В то же время нагрев во всех точках начинался практически одновременно (без ожидавшегося по расчетным оценкам запаздывания), а его темп оказался выше расчетного значения.

Изменение температуры в точке 6 можно объяснить влиянием повышения температуры окружающей среды (т.е. воздуха в экспериментальном зале), но лишь отчасти, поскольку термодарный датчик 6 заэкранирован слоями свинца (толщина 1 см) и корпусной стали (5 мм) с воздушной прослойкой между свинцом и сталью, имеющей толщину 3 мм.

Полученные результаты позволяют предположить, что в формировании температурного поля и объемного тепловыделения участвуют не только первичные процессы ионизации атомов и расщепления и возбуждения ядер свинца релятивистскими протонами, но и вторичные ядерно-физические процессы, следствием которых являются заряженные продукты адронных и электронно-фотонных ливней, а также осколки высокопорогового деления свинца ($E_{\text{п}} \sim 25$ МэВ), бета- и гамма-излучения короткоживущих радиоактивных нуклидов и др.

Заключение

С целью оптимизации геометрических параметров уран-свинцовой сборки, которая создается в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ для изучения физических аспектов электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов на пучках синхрофазотрона/нуклотрона (проект "Энергия+Трансмутация" [9]), проведено исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в свинцовой среде при энергии протонов $1,5$ ГэВ. Используя томографический метод с применением активационных детекторов из золота, было просканировано нейтронное поле внутри мишени с поперечным сечением 50×50 см и оценены вклады тепловых, резонансных и быстрых нейтронов в полный нейтронный спектр, а также получены данные, необходимые для выбора поперечных размеров уранового бланкета и свинцового нейтрон-генерирующего конвертора U/Pb-сборки.

С помощью калориметрической методики на основе малоинерционных высокочувствительных микротермодар исследованы пространственно-временное распределение температурных полей и уровень энерговыделения в свинцовой мишени ($50 \times 50 \times 80$ см) при её облучении протонным пучком при энергии 5 ГэВ.

Авторы выражают глубокую благодарность академику А.М.Балдину и академику В.И.Субботину за интерес и поддержку исследований по электроядерной тематике, а также А.И.Малахову, В.Н.Пеневу, И.А.Шелаеву и Ю.С.Анисимову за содействие в подготовке и проведении экспериментов на пучках синхрофазотрона.

Персонал инженерно-технических служб Лаборатории высоких энергий ОИЯИ под руководством А.Д.Коваленко авторы благодарят за обеспечение работы синхрофазотрона при облучении свинцовой мишени.

Авторы выражают признательность С.В.Масленникову и А.М.Волощенко за участие в обсуждении экспериментальных результатов, а также Л.С.Золину за конструктивные замечания по тексту публикации.

Настоящая работа выполнена при поддержке целевых грантов, выделенных на исследования по электроядерной тематике Полномочными Представителями Монголии и Польши в ОИЯИ, и также целевого гранта дирекции Института на обеспечение работы ускорительных и реакторных установок Объединенного института ядерных исследований.

Литература

1. Р.Г.Васильков и др. Электроядерный метод генерации нейтронов. Атомная энергия, 1970, 29, 151.
Р.Г.Васильков и др. Об электроядерном бридинге. УФН, 1983, 139, 435.
- 2.а) В.А.Воронко, ... К.Д.Толстов. Генерация нейтронов в протяжённой свинцовой мишени. Атомная энергия, 1990, 68, 449.
б) В.А.Воронко, ..., К.Д.Толстов. Энергия генерации нейтронов легкими ядрами в свинцовом блоке. Краткие сообщения ОИЯИ №2(53), 5, Дубна, 1992.
в) К.Д.Толстов. Физические аспекты электроядерного способа получения атомной энергии. Сообщение ОИЯИ, 18-89-778, Дубна, 1989.
г) К.Д.Толстов. Моделирование электроядерного способа получения атомной энергии и трансмутации радиоактивных отходов. Доклад о проекте «Энергия» на 72-й сессии Ученого совета ОИЯИ 25 июня 1992 г., Сообщение ОИЯИ, 18-92-303, Дубна, 1992.
- 3.а) D.Chultem et. al. Measurement of the neutron component in a shower generated in a Lead target by relativistic nuclear beam. Nuclear Instr. and Methods in Physical Research, A381(1996) 488;
б) Б.Тумэндэмбэрэл, Д.Чултэм. Проблемы зашлаковывания и отравления электроядерного реактора. Краткие сообщения ОИЯИ 1(75)-96, Дубна, 1996.
4. M.I.Krivopustov et.al. First Experiments on Transmutation Studies of I-129 and Np-237 Using Relativistic Protons of 3,7 GeV. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1997, 222, 267.
R.Brandt, ..., M.I.Krivopustov et. al. Transmutation of Radioactive Waste with the Help of Relativistic Heavy Ions. JINR Preprint E1-97-349, Dubna, 1997; Kerntechnik, 1998, 63, 167.
- 5.а) C.Rubbia et. al. An Energy Emplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Acceleration. CERN/AT/93-47(ET), 1993.
б) C.Rubbia. The energy amplifier concept : A solid-phase accelerator-driven Th/U-233 breeder for nuclear energy production with minimal actinide waste. Proc. of 1994 Int. Conf. on Accelerator-Driven. Transmutation Technologies and Applications (USA, Las Vegas, 1994).
в) S.Andriamonje et al. Experimental determination of the energy generated in nuclear cascades by a high energy beam. Phys.Lett. B348 (1995) 697.
6. В.Н.Михайлов. Интенсивные нейтронные пучки на ускорителях. Краткие сообщения ОИЯИ, 6(80)-96, 17, Дубна, 1996.
7. В.И.Субботин. Двадцать первый век-век ядерной энергетики. ЭЧАЯ, 1998, 29, 333; Ускорители могут сделать ядерную энергетику более безопасной. Сообщение ОИЯИ, P1-99-97, Дубна, 1999.
8. В.П.Дмитриевский. Электроядерный метод получения энергии. ЭЧАЯ, 1997, 28, 815.
9. М.И.Кривоустов, Д.Чултэм. Об экспериментах по электроядерной технологии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на пучках синхрофазотрона. "Новости ОИЯИ", 1998, 3 (ноябрь), 27, Дубна.
10. Б.М.Бобченко и др. Измерение полных неупругих сечений взаимодействия протонов от 5 до 9 ГэВ/с и π - мезонов с ядрами в диапазоне импульсов от 1,75 до 6,5 ГэВ/с. ЯФ, 1979, 30, 1553.
11. Ц.Баатар, А.П.Гаспарян и др. Множественность π - мезонов в неупругих взаимодействиях протонов с ядрами С и Та в интервале импульсов 2-10 ГэВ/с. ЯФ, 1980, 32, 1372.
12. M.Antinucci et al. Lett. Nuovo Chimento. Multiplicities of Charged Particles up to ISR Energies. 1973, 6, 121.
13. А.М.Волощенко и др. Использование метода дискретных координат для расчета переноса адронного каскада в веществе в двумерной геометрии. Тезисы докладов VII Российской научной конференции "Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок", (22-25 сентября 1998 г., Обнинск), 99.
14. Е.С.Глушков, В.Е.Демин, Н.Н.Пономарёв-Степной, А.А.Хрулёв. Тепловыделение в ядерном реакторе. Энергоатомиздат, Москва, 1985.
15. Fast reactor spectrum measurement and their interpretation. A technical report. IAEA-138, Vienna, 1971, 55.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1999 года.