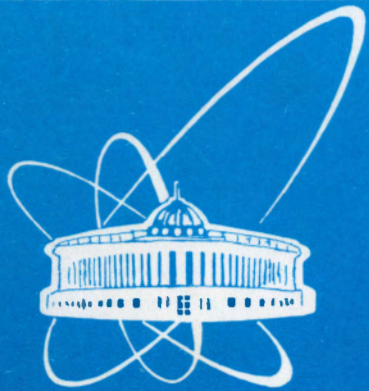


00-168



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

00-168

P1-2000-168

Кривоустов М.И.

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

Направлено в журнал «Kerntechnik»

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

2000

М.И.Кривоустов, Д.Чулгэм, И.Адам, М.П.Белякова, В.Г.Калинников,  
Л.А.Ломова, А.В.Павлюк, В.П.Перельгин, А.Полански, Е.В.Садовская,  
А.Н.Соснин, Ж.Сэрэтэг

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Ц.Тумэндэлгэр, Ш.Гербиш, Ж.Ганзориг

*Национальный университет, Улан-Батор, Монголия*

П.С.Казновский, С.П.Казновский, С.Г.Лобанов, В.Ф.Мищенко,  
Б.И.Фонарев, Ю.Л.Шаповалов

*ВНИИ Атомного энергетического машиностроения, Москва*

Р.Одой

*Исследовательский центр (FZJ), Юлих, Германия*

А.М.Хильманович, Б.А.Марцинкевич, С.В.Корнеев

*Институт физики НАНБ, Минск*

Э.Лангрок

*Исследовательское бюро (IBL), Хойерсверда, Германия*

И.В.Жук, М.К.Киевец, Е.М.Ломоносова

*Институт проблем энергетики НАНБ, Минск*

Р.Брандт, В.Вестмайер, Х.Роботам

*Институт ядерной химии при Университете Филиппса, Марбург,  
Германия*

М.Билевич, А.Войцеховский, З.Стругальский

*Институт атомной энергии, Свек, Польша*

В.Вагнер, А.Куглер

*Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия*

Р.С.Хашеми-Нежад

*Университет, Сидней, Австралия*

М.Замани

*Университет, Тессалоники, Греция*

Ж.Адлофф, М.Дэбовэ

*Университет-центр ядерных исследований, Страсбург, Франция*

## 1. Программа исследований, физическая установка и методики экспериментов

В наших сообщениях [1-3] приведена научная программа и описание экспериментальной установки «Энергия плюс трансмутация» (см рис. 1 и 2), создаваемой в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ по проекту «Исследование физических аспектов электроядерного способа получения энергии и изучение трансмутации радиоактивных отходов на пучках синхрофазотрона/нуклотрона ОИЯИ». В этих работах содержится обсуждение:

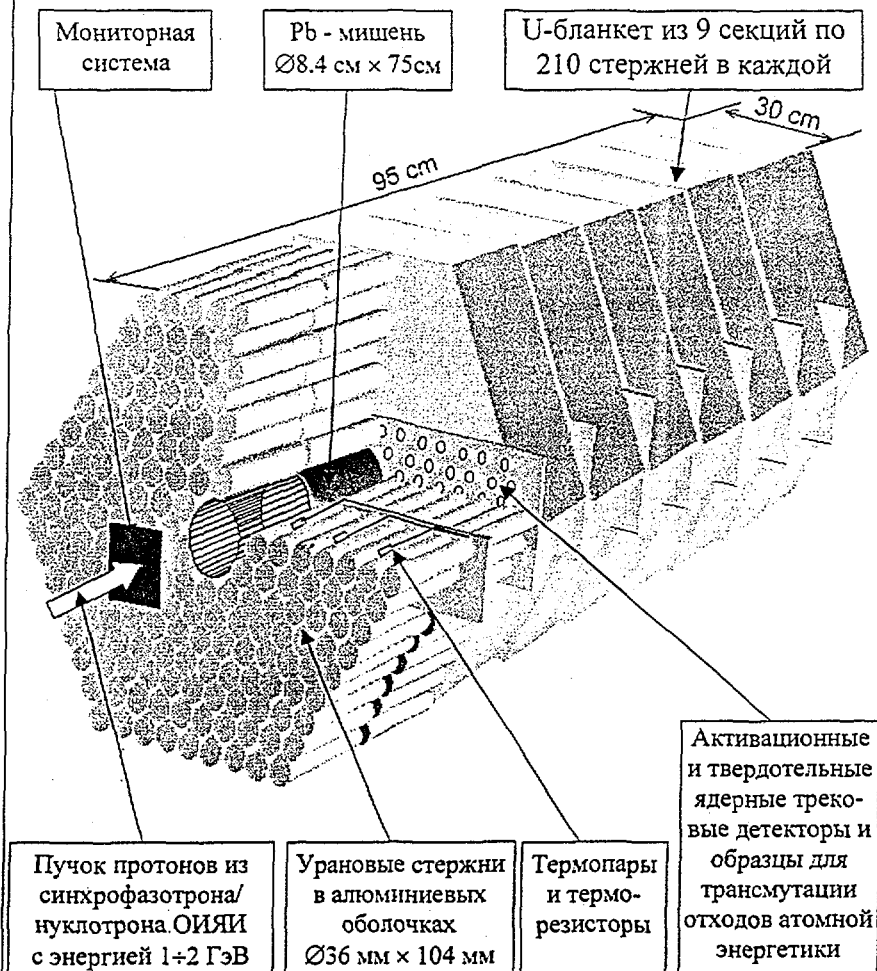
- программы методических и физических исследований;
- основных принципов работы гибридной электроядерной системы, в состав которой входят ускоритель, мишень и бланкет из делящегося вещества;
- специальной металлической конструкции для размещения уранового бланкета и свинцовой нейтрон-производящей мишени-конвертора;
- систем мониторингирования пучков, дозиметрического контроля и обеспечения радиационной безопасности;
- многоканальных систем детектирования излучений (нейтроны, гамма-кванты, осколки деления), генерируемых при взаимодействии пучков релятивистских протонов и образующихся вторичных частиц с ядрами свинцовой мишени и уранового бланкета;
- систем автоматизации эксперимента, сбора данных и их обработки.

На протяжении нескольких десятилетий в ОИЯИ на пучках синхроциклотрона и синхрофазотрона [4-11] выполнено большое число экспериментов по облучению больших мишеней из средних и тяжелых элементов (железо, медь, вольфрам, свинец, висмут, уран). Эти работы были посвящены изучению ядерно-физических процессов в мишени - как одной из частей электроядерной установки. Однако такая установка должна содержать еще одну важнейшую составляющую: бланкет из делящегося вещества (торий, уран, плутоний или их композиции). При этом основная роль бланкета состоит в значительном усилении (увеличении) мощности ускоренного пучка, вводимой в мишень, за счет деления ядер бланкета нейтронами, которые образуются и размножаются в этой мишени и, покидая ее поверхность, попадают в бланкет.

Следует подчеркнуть, что эксперименты с использованием делящегося вещества в виде, например, уранового бланкета, окружающего мишень, существенно отличаются от облучений протяженных мишеней, которые были нацелены в основном на изучение генерации и размножения нейтронов.

*Логическим продолжением многолетних исследований процессов в мишенях стал качественный переход к экспериментам на гибридной установке, состоящей из свинцовой мишени и бланкета из естественного урана, который был сделан описываемым в настоящей публикации экспериментом. Это облучение выполнено в ноябре 1999 г. на протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ. Фактически этот эксперимент является первым в ОИЯИ по исследованию физических аспектов электроядерного способа получения энергии.*

**Проект: «Моделирование электроядерного способа получения энергии и изучение трансмутации радиоактивных отходов на пучках синхрофазотрона / нуклотрона ОИЯИ»**  
 (коллорабация «Энергия плюс трансмутация»)



**Рис. 1. Установка «Энергия плюс Трансмутация»**

Установка будет размещена в измерительном павильоне ЛВЭ

Рис. 2. Программа экспериментальных исследований проекта «Энергия плюс трансмутация» [1-3]

<p>П Р О Г Р А М М А</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• энерговыделение и энергозатраты на генерацию одного нейтрона</li> <li>• размножение и баланс нейтронов</li> <li>• коэффициент усиления мощности</li> <li>• образование и распад радиоактивных продуктов</li> <li>• сечения трансмутации радиоактивных отходов: альфа-актиниды, продукты деления и активации</li> <li>• оптимизация параметров электроядерных установок</li> <li>• выработка практических рекомендаций по созданию прототипа трансмутационной установки</li> <li>• данные для совершенствования кодов и программ компьютерного моделирования электроядерных процессов</li> </ul>
--	--

Калориметр деления урана на релятивистских пучках синхрофазотрона/нуклотрона



Данный эксперимент выполнен в варианте бланкета, состоящего из двух секций, каждая из которых собрана из 30 урановых стержней. Из методик и детекторных систем, составляющих *калориметр деления урана* (см. [2,3] и рис. 2), в эксперименте использовались теплофизическая, активационная и твердотельная трековая методики, которые были успешно апробированы в наших работах по электроядерной тематике и трансмутации, выполненных в 1995-99 гг. на протонных пучках синхрофазотрона ОИЯИ [1-3,7-11].

## 2. Методика эксперимента: ускоритель, мониторинг пучка и радиационная защита

Схема эксперимента по калориметрии свинцовой мишени и уранового бланкета на протонном пучке синхрофазотрона при энергии 1,5 ГэВ показана на рис. 3.

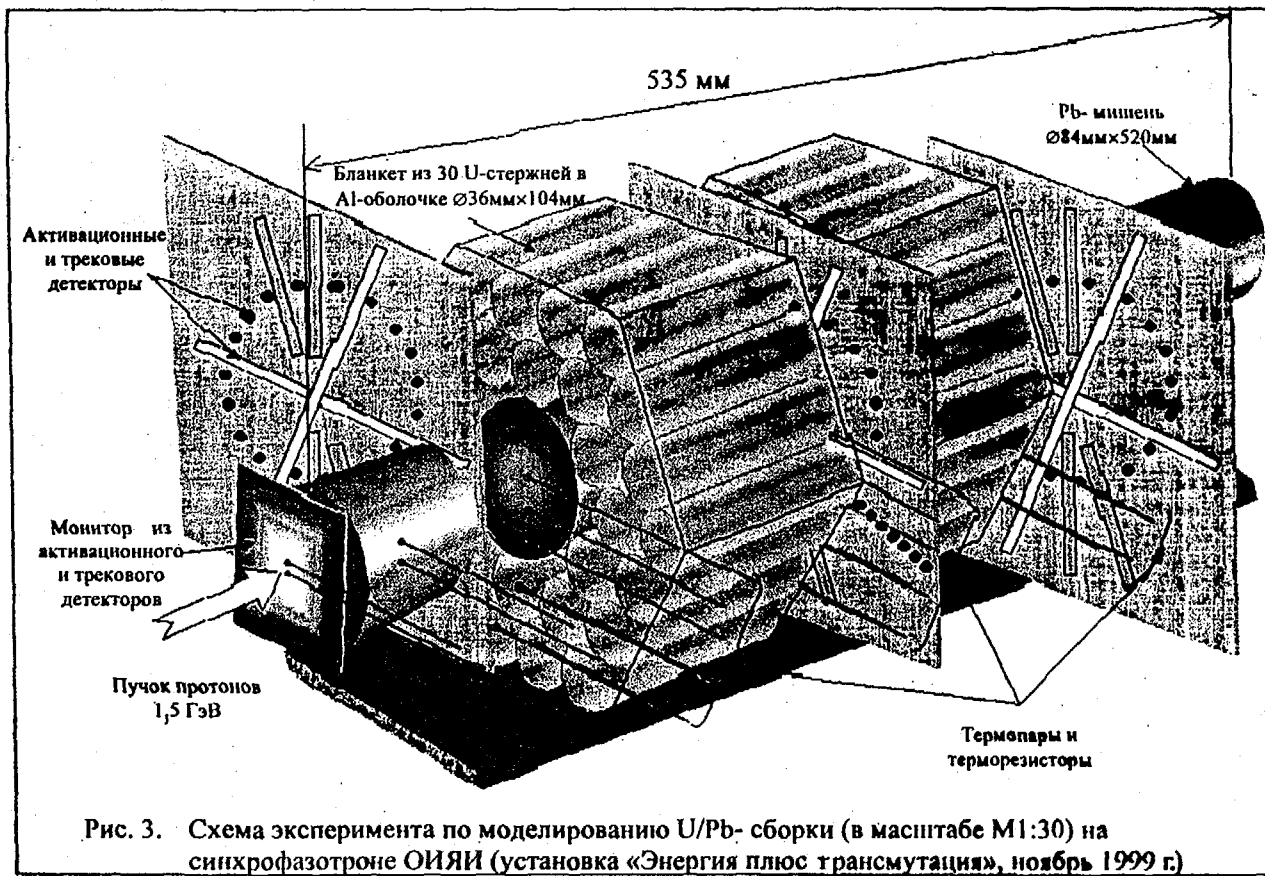
Направление протонного пучка, падающего на свинцовую мишень, совпадает с ее горизонтальной осью симметрии. Средняя интенсивность пучка составляла не менее  $1 \cdot 10^{11}$  протонов в импульсе при ширине импульса, равной 0,35 с; при этом временные интервалы между импульсами составляют около 9 с. В качестве монитора интенсивности и флюенса протонного пучка в настоящей работе использовались (как и в ранее проведенных нами облучениях [9,10]) активационные и твердотельные ядерные трековые детекторы. Определение профиля пучка и тщательная юстировка модели U/Pb-сборки относительно направления пучка выполнялись с помощью высокочувствительных полароидных пленок и ионизационных камер.

В ходе эксперимента по облучению сборки из свинцовой мишени и уранового бланкета высокоэнергетичным протонным пучком важное значение имеют вопросы биологической защиты, обусловленные повышенными требованиями к радиационной безопасности. В связи с этим для проведения облучения был модернизирован контейнер для размещения защиты от нейтронного и гамма-излучений, которая использовалась ранее в наших экспериментах [9]. Схема компоновки экспериментальной установки, включающей свинцовую мишень и урановый бланкет, приведена на рис. 4.

В центре контейнера с замедлителем-защитой (гранулированный полиэтилен с добавкой карбида бора, свинцовые стенки и листовой кадмий) размещалась модель уран-свинцовой сборки, оснащенная комплексом различных активационных и трековых детекторов и термометрических датчиков. Установка кадмиевых поглотителей на внутренних стенках контейнера, обращенных к модели U/Pb-сборки, значительно уменьшала число нейтронов, которые после термализации в объеме полиэтиленового замедлителя могли попасть в активационные и трековые детекторы. Этот контейнер (100×106×111 см, общий вес около 950 кг) устанавливался на подвижную платформу, которая перемещалась по рельсам из закрытого помещения на место облучения: фокус ФЗ в экспериментальном павильоне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

## 3. Основные системы модели уран-свинцовой сборки

Принципиальная схема модели полномасштабной уран-свинцовой сборки [1-3], реализованная в масштабе 1:30, показана на рис.3. Техническое проектирование модели (см. рис. 5) выполнено специалистами Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного энергетического машиностроения (Москва), а изготовление металлической конструкции модели произведено Опытно-







экспериментальным производством Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Рис. 3 иллюстрирует следующие основные части модели уран-свинцовой сборки и их взаимное расположение:

- **мониторная система установки**, в состав которой входят активационные и твердотельные ядерные трековые детекторы [9,12];
- **многосекционная свинцовая мишень**, состоящая из дисков (диаметр 8,4 см, общая длина мишени 52 см; масса всей мишени равна 43 кг);
- **две секции бланкета**, собранные из урановых стержней (уран естественного изотопного состава упакован в герметичную алюминиевую оболочку) со следующими внешними размерами: диаметр 3,6 см, длина 10,4 см; масса одного стержня 1720 г). В состав каждой секции входит по 30 урановых стержней, имеющих общую массу 51,6 кг. Конструкция металлического каркаса (см. рис. 5), в котором монтируются урановые стержни, после сборки позволяла жестко фиксировать положение каждого стержня – это необходимо для обеспечения надежного контакта термометрических датчиков, прижимаемых к торцам урановых стержней;
- **три пластины** (передняя, центральная и задняя) из стеклотекстолита (30×30×0,3 см), на которых размещались комплекты активационных и твердотельных ядерных трековых детекторов. На пластинах количество детекторов составляло от 30 до 60 штук. Описание одной из детекторных пластин, включая названия физических характеристик, для определения которых устанавливаются различные детекторы, приведено в п. 4.1.

Методику совместного использования активационных и трековых детекторов, подробно описанную в нашей работе по калориметрии электроядерной свинцовой мишени при энергии протонов 1,5 ГэВ [9], мы называем *активационной томографией и осколочной радиографией*.

- **термометрические датчики**, размещенные как снаружи, так и внутри секционированной свинцовой мишени, а также на боковых и торцевых поверхностях урановых стержней обеих секций бланкета для on-line измерений пространственно-временного изменения температуры с целью определения уровня тепловыделения в мишени и модели бланкета в ходе эксперимента на протонном пучке (подробности, относящиеся к этим датчикам, см. п. 4.2 и рис. 7).

#### 4. Описание калориметра деления урана

Комплекс диагностических методик и аппаратуры (активационные и твердотельные ядерные трековые детекторы и теплофизические методики) образует *калориметр деления урана* экспериментальной установки «Энергия плюс трансмутация» [1-3].

**4.1. Размещение активационных и трековых детекторов.** С учетом конструкции секций уранового бланкета (см. рис. 5) и свинцовой мишени комплекты активационных и трековых детекторов размещаются на так называемых детекторных пластинах. На рис. 6 показана схема одной из таких пластин.

**4.1.1.** На центральной пластине, на линии, перпендикулярной оси симметрии, размещались твердотельные трековые детекторы, изготовленные в виде сплошных полосок с радиаторами из урана (обедненного и обогащенного изотопом уран-235), в направлениях А, В, F и Н под углами 0, 60, 180 и 240° – без кадмиевого фильтра и в

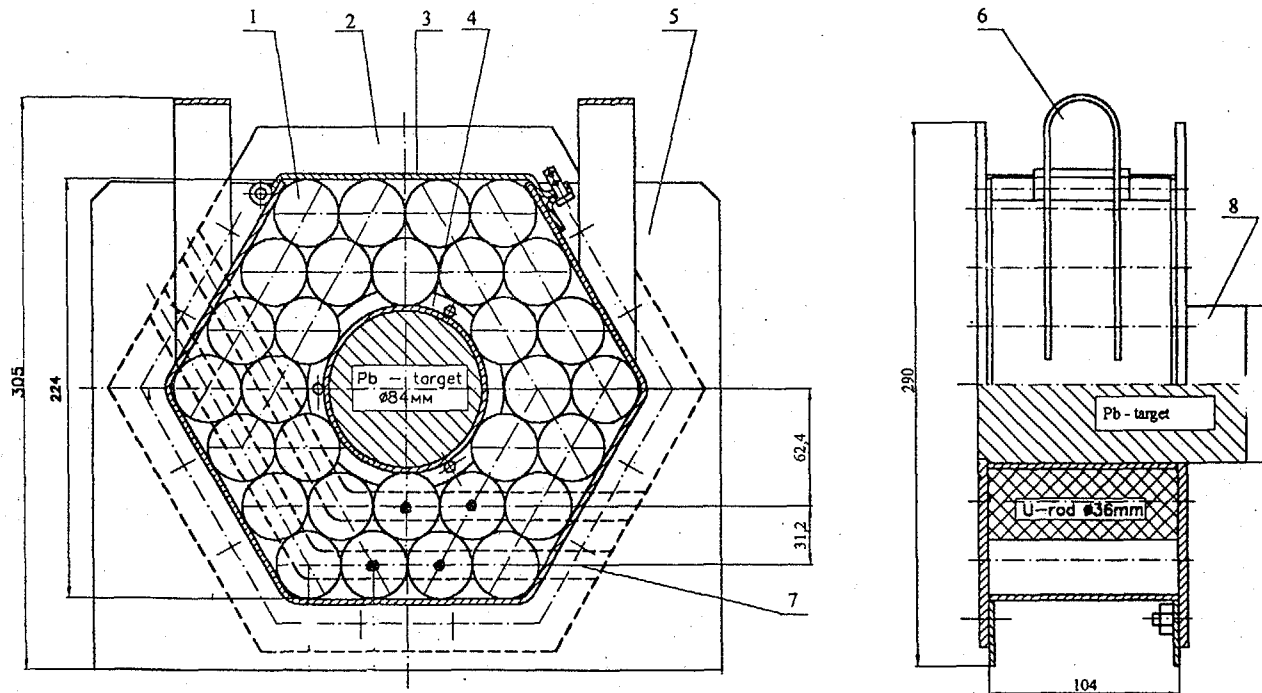


Рис.5. Конструкция модели секции уранового blankets и свинцовой мишени. 1-урановые стержни в герметичной алюминиевой оболочке с размерами: диаметр 36 мм, длина 104 мм, 2-крышка, 3-корпус, 4-центральная втулка, 5-фланец, 6-скоба для транспортировки секции, 7-каналы для проводки и крепления микротермопар, 8-свинцовая мишень.

направлениях С, D, I и J под углами 90, 120, 270 и 300° – с кадмиевым фильтром.

Отметим, что выбор указанных углов обусловлен только необходимостью удобства размещения большого количества детекторов, так как модель U/Pb-сборки обладает осевой симметрией, а нейтронный спектр, в свою очередь, будет идентичен относительно этой же оси симметрии.

На основании результатов подсчета треков определяются *парциальные интегралы деления ядер естественного урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами* в зависимости от радиуса модели уранового blankets. Описание этой методики изучения характеристик деления ядер приведено в п. 5.3.

4.1.2. В направлении К (330°) с интервалом в 1 см от оси симметрии этой пластины, совпадающей с осью симметрии мишени-blankета, помещались 16 активационных детекторов в виде таблеток из урана естественного изотопного состава (диаметр 8 мм, толщина 1 мм, вес ~ 0,9 г) для изучения выходов  $(n, \gamma)$ -,  $(n, 2n)$ - и  $(n, f)$  – реакций на ядрах урана-238.

На передней и задней пластинах (см. рис. 3) помещались аналогичные комплекты пороговых активационных и трековых детекторов для изучения выше-названных процессов в передней части первой секции и задней части второй секции модели уранового blankets.

4.1.3. В настоящем эксперименте для измерения *скоростей пороговых ядерных реакций* использовался комплект мишеней из следующих 23 химических элементов с естественным содержанием изотопов: C, F, Mg, Si, S, Al, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Rh, Cd, In, Au, Hg, Pb, Bi и Np. Эти детекторы размещаются на окружности с радиусом 7,5 см на каждой из детекторных пластин, показанных на рис. 3 и 6.

Полученные значения скоростей реакций позволяют восстановить спектр быстрых нейтронов для рассматриваемой модели U/Pb- сборки, а также рассчитать наведенную активность химических элементов, которые могут быть использованы как конструкционные материалы для создания электроядерных и других ядерно-физических установок.

Для выполнения этой части работы применялся метод активационных детекторов. Спектр гамма-квантов ядер-продуктов регистрировался с помощью Ge-спектрометра высокого разрешения и эффективности.

4.1.4. Для измерения *радиального распределения скоростей деления*  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , спектрального индекса  $\frac{\sigma_f^{232\text{Th}}}{\sigma_f^{235\text{U}}}$  и событий высокопорогового деления  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{209}\text{Pb}$  в мишени и blankets использовалась методика твердых ядерных трековых детекторов.

Точки для измерений выбирались на центральной пластине (рис. 6) на двух направлениях E и G под углами 135 и 225° соответственно. На этих направлениях имелось по 6 точек измерений. Точка 1 располагалась в центре пластины на оси симметрии мишени, а точки 2, 3, 4, 5 и 6 - на расстояниях 30, 60, 85, 110 и 135 мм от центра соответственно.

В точках измерений помещались сэндвичи, состоящие из мишени-радиатора и твердотельного трекового детектора. В качестве этого детектора использовался лавсан (полиэтилентерефталат), обладающий высокой эффективностью регистрации осколков деления и характеризующийся низким собственным фоном. В эксперименте использовались следующие мишени-радиаторы: уран с обогащением 90% по изотопу уран-235, естественный уран, торий-232, висмут-209, природный свинец, уран-234,

уран-236, нептуний-237, тантал-181 и золото-197.

Мишени-радиаторы из урана с обогащением 90% по изотопу уран-235, естественного урана и тория-232 представляли собой фольги, изготовленные из соответствующих материалов методом холодной прокатки с предварительным отжигом в вакууме. Они являлись "толстыми", т.е. для них выполнялось условие  $d \gg R$ , где  $d$  - толщина мишени-радиатора, а  $R$  - средний пробег осколков деления в материале мишени-радиатора.

Мишени-радиаторы из висмута и свинца представляли собой тонкие слои  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{208}\text{Pb}$  толщиной  $1 \text{ мг/см}^2$ , нанесенные на диски из алюминия. Мишени-радиаторы из урана-234, урана-236 и нептуния-237 были изготовлены методом послойного нанесения соответствующего изотопа на алюминиевую подложку; для этих мишеней выполнялось условие  $d < R$ . Мишени-радиаторы из тантала и золота представляли собой тонкие фольги, имеющие толщину несколько мкм.

В точках 1-6 (азимут  $135^\circ$ ) помещался набор сэндвичей с мишенями-радиаторами из урана с обогащением 90% по изотопу уран-235, естественного урана и тория-232, а в точках 1-6 (азимут  $225^\circ$ ) - сэндвичи с мишенями-радиаторами из висмута-209 и природного свинца. Дополнительно в точке 3 (азимут  $135^\circ$ ) располагались сэндвичи с набором следующих мишеней-радиаторов:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{197}\text{Au}$ .

**4.2. Методики теплофизических измерений.** В описываемом эксперименте для исследования пространственно-временных распределений температур в свинцовой мишени и урановом бланкете использовались две термометрические методики на основе микротермопар и полупроводниковых терморезисторов.

4.2.1. Схема размещения *высокочувствительных микротермопар* в модели уран-свинцовой сборки приведена на рис. 7. Размещение датчиков осуществлялось с учетом осевой симметрии этой сборки и необходимости получения максимально возможной информации о тепловыделении в объеме свинцовой мишени и уранового бланкета.

Методика и средства термометрии на основе микротермопар, разработанные Всероссийским научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом атомного энергетического машиностроения (Москва), подробно описаны в наших сообщениях [10].

С учетом методических результатов, полученных в исследованиях на большом свинцовом блоке с размерами  $50 \times 50 \times 80 \text{ см}$  [10], в трех сечениях секционированной свинцовой мишени на расстояниях вдоль оси  $Z$ , равных 51, 106 и 214 мм от переднего торца мишени, были размещены восемь микротермопар со следующими номерами: (21 и 22), (3, 4 и 5) и (10, 11 и 12). Термопары размещались на расстоянии 1 мм (по оси  $Z$ ) от торцевых поверхностей свинцовых дисков в трех точках по радиусу:  $R = 0, 15$  и  $30 \text{ мм}$ . Заделка термопар осуществлялась вводом их в радиальные высверленные каналы с последующей зачеканкой спаев через торцевые поверхности дисков.

Для изучения динамики тепловыделения в бланкете микротермопары с номерами (6+9), (13+16) и (17+20) устанавливались по центру торцов урановых стержней (по четыре стержня в каждой секции бланкета) в трех сечениях по оси  $Z$  на расстояниях 108, 212 и 327 мм от переднего (по ходу пучка) торца мишени. Эти микротермопары были прижаты к торцевым поверхностям урановых стержней с

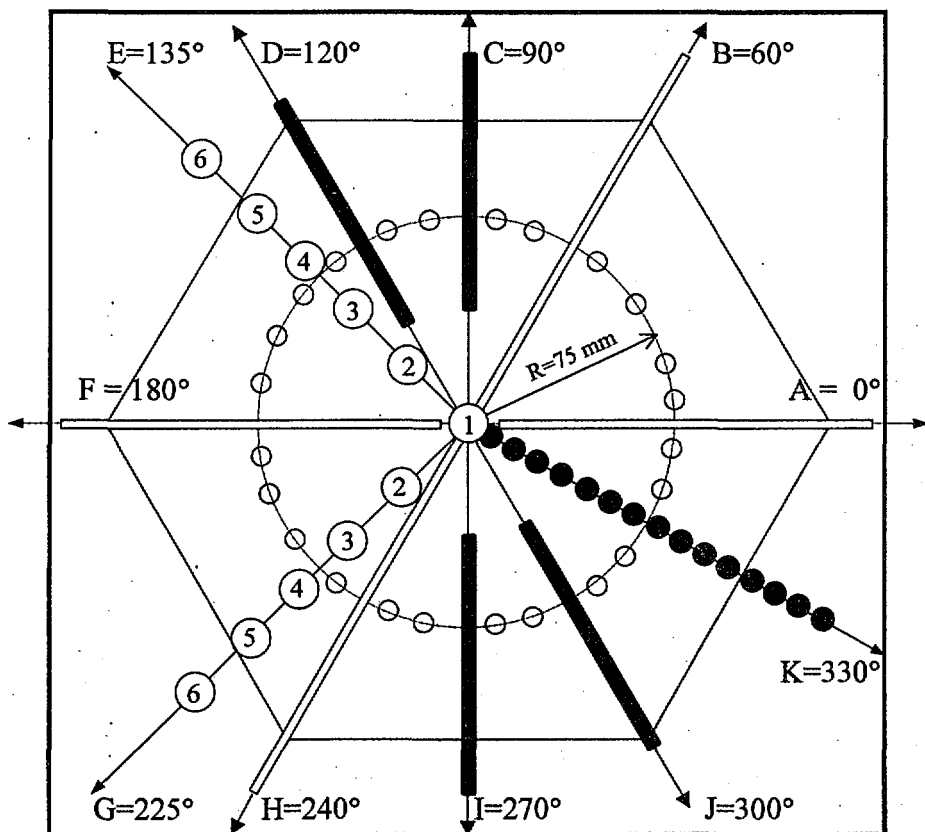


Рис. 6. Расположение активационных и трековых детекторов в центральной пластине с размерами  $30 \times 30 \times 0,3$  см (см. рис. 3 и комментарии в тексте). Эксперимент по облучению модели уран-свинцовой сборки на протонном пучке синхрофазотрона с энергией 1,5 ГэВ (установка «Энергия плюс 1 трансмутация», ноябрь 1999 г.)

помощью специальных винтовых устройств. Выбор стержней для термометрии, показанных на рис. 5 (эти стержни отмечены жирными точками), был осуществлен с учетом шестигранной упаковки стержней в каждой секции и обеспечивал измерения в четырех точках по радиусу ( $R = 63, 72, 96$  и  $108$  мм).

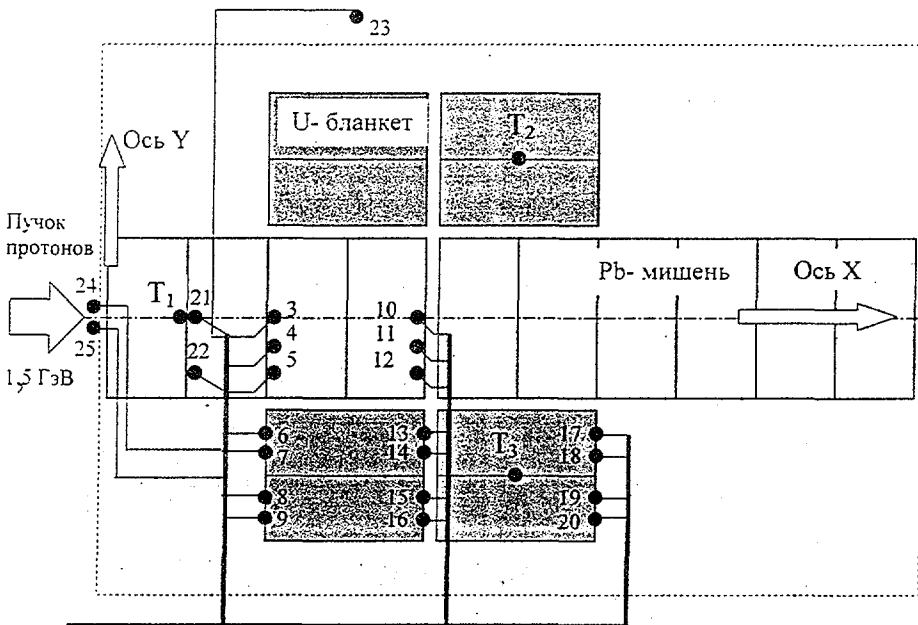
С учетом результатов нашей работы [10] предполагалось, что в сечении, где установлены термомпары с номерами (3÷5), интенсивность взаимодействия протонного пучка с ядрами свинца (а следовательно, и генерация вторичных нейтронов) будет максимальной.

Наличие интенсивных потоков протонов в мишени и потоков вторичных нейтронов в бланкете предъявляет дополнительные требования к достоверности измерений температуры с помощью микротермомпар. С целью проверки возможности искажений показаний микротермомпар за счет прямого воздействия протонов были установлены дополнительные термомпары с номерами 24 и 25 на пути протонного пучка перед мишенью (на расстоянии 4 мм от ее переднего торца); с их помощью контролировалось фоновое влияние прямого попадания протонов на спаи термомпар. Термомпара номер 23, размещенная вне сборки, позволяла контролировать температуру в экспериментальном зале в ходе облучения. Компенсационная коробочка с термосопротивлением (канал номер 1) устанавливалась на расстоянии 1,5 м ниже оси симметрии уран-свинцовой сборки.

Использованные в эксперименте малоинерционные микротермомпары, регистрационно-анализирующая аппаратура на основе мини-ЭВМ и специальной микроплаты позволяли контролировать изменения температуры в бланкете и мишени с точностью  $0,02-0,03$  °C (см. [10]).

4.2.2. В описываемом эксперименте проведено опробование высокочувствительных *полупроводниковых терморезисторов*, которые из-за резкой зависимости их температурно-резисторных характеристик [13] имеют более высокую точность измерения температуры. Эти терморезисторы показали высокую работоспособность в условиях нашего эксперимента (малая мощность пучка, резкое изменение атмосферной температуры). Для их калибровки использовался образцовый платиновый термометр сопротивления марки ПТ-100, который применялся в наших экспериментах на свинцовой мишени с размерами  $\varnothing 9,6 \times 50$  см [9].

В ходе этого эксперимента было выполнено два облучения длительностью около 40 мин каждое. Второе облучение проводилось, когда из мишени был удален первый (по ходу протонного пучка) свинцовый диск, имеющий толщину 5 см. Это изменение позволило сместить зону интенсивной генерации нейтронов относительно положения уранового бланкета, а также получить дополнительные точки измерения температур в свинцовой мишени вдоль оси Z (см. п. 7.6).



№ Датчика	Координата, мм		№ Датчика	Координата, мм	
	X	Y		X	Y
1, 2	Эталон		14	210	72
3	104	0	15	210	96
4	104	15	16	210	108
5	104	30	17	326	63
6	106	63	18	326	72
7	106	72	19	326	96
8	106	96	20	326	108
9	106	108	21	50	0
10	212	0	22	50	30
11	212	15	23	Вне сборки	
12	212	30	24	-50	0
13	210	63	25	-50	0

Рис. 7. Схема термометрирования модели уран-свинцовой сборки (подробности, относящиеся к использованию микротермопар, см. текст).  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  – полупроводниковые терморезисторы со следующими координатами:  $T_1(50,0)$ ,  $T_2(274,+850)$  и  $T_3(274,-850)$ .

## 5. Калориметрия уранового бланкета и его модели

Главной энергетической характеристикой подкритического бланкета является усиление мощности:

$$G = \frac{P_{therm}}{P_{beam}} = \frac{E_{fission}}{E_{beam}} \cdot \frac{v_s}{v_f} \cdot \frac{k}{1-k}$$

Эта величина представляет собой отношение мощности тепловыделения в бланкете за счет деления урана  $P_{therm}$  к мощности, вносимой в мишень протонным пучком  $P_{beam} = I \cdot E_p$ ;  $v_s$  и  $v_f$  - множественности нейтронов, образующихся в мишени и бланкете соответственно в реакциях расщепления и деления ядер;  $(k < 1)$  - коэффициент размножения нейтронов.

Эксперименты на U/Pb-сборке и ее модели проводятся с целью прямого измерения мощности энерговыделения как по числу делений ядер урана естественного изотопного состава, так и по количеству тепла, выделяемого в объеме бланкета. Кроме того, измеряется скорость конверсии фертильного изотопа  $^{238}\text{U}$  в делящийся изотоп  $^{239}\text{Pu}$ . Это дает возможность определения равновесного состава фертильного и делящегося топлива, при котором коэффициент воспроизводства приближается к единице. В связи с этим исследование нейтронного спектра в объеме бланкета имеет исключительно важное значение.

Ниже перечислены экспериментальные методы решения этих задач.

### 5.1. Методики измерения мощности энерговыделения в бланкете:

- методики, аналогичные тем, которые применялись для калориметрии мишени и свинцового блока, т.е. основанные на термометрических измерениях с помощью микротермопар [10], высокочувствительных платиновых термометров сопротивления [9], а также полупроводниковых терморезисторов [13];

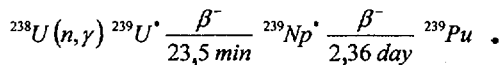
- методика определения абсолютного числа событий деления ядер урана с помощью твердотельных трековых детекторов осколков деления [9];

- методика определения абсолютного числа событий деления ядер урана и массового распределения осколков деления с помощью гамма-спектрометрии высокой эффективности и разрешения [9].

Детекторы осколков деления располагаются между секциями модели уранового бланкета, а термометрические датчики на боковой и торцевых поверхностях урановых стержней (см. рис.3 и п. 4.2). По результатам, полученным с помощью этих термодатчиков, активационных и трековых детекторов, восстанавливается пространственное распределение тепловыделения в U/Pb-сборке за счет деления ядер урана и определяется интеграл деления по всем диапазонам нейтронного спектра.

### 5.2. Методика измерения скорости радиационного поглощения нейтронов

основана на определении выхода реакции  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$  путем измерения выхода дочернего нуклида нептуния-239 с помощью гамма-спектрометрии. Для этого между секциями уранового бланкета располагаются активационные детекторы из урана естественного изотопного состава в виде таблеток (метод *in-vitro*), которые являются детекторами накопления плутония-239 (см. п. 4.1.2.). После захвата нейтрона ядром урана-238 происходит два  $\beta$ -распада, приводящих к образованию ядра Pu-239:



Методика измерений, комплекс гамма-спектрометрической аппаратуры и проце-



дура обработки спектров гамма-квантов описаны, например, в наших работах [7-10].

**5.3. Для определения парциальных интегралов деления** естественного урана быстрыми, резонансными и тепловыми нейтронами в объеме бланкета находится число осколков, вылетающих из урановых радиаторов с разным изотопным составом и регистрируемых твердотельными трековыми детекторами. Для наших экспериментов урановые слои на алюминиевой подложке были приготовлены в радиохимической лаборатории Физико-энергетического института (Обнинск). Два урановых слоя с разными концентрациями изотопа  $^{235}\text{U}$  (например,  $c_1 = 5\%$  и  $c_2 = 0,3\%$ ) в контакте с трековыми детекторами, закрыты кадмиевым экраном толщиной 1 мм. Еще два таких же слоя, но без кадмиевого экрана устанавливаются в положении, эквивалентном по нейтронному спектру с предыдущими детекторами. Этот комплект из четырех детекторов образует так называемый *интегратор деления урана*.

Нейтронный спектр в бланкете условно можно разделить на три области энергий: тепловых, резонансных и быстрых нейтронов. Границы между этими областями близки к краю резонансного поглощения кадмия ( $E_n = 0,6$  эВ) и порога деления  $^{238}\text{U}$  (0,8 МэВ), в окрестностях которых, как видно на рис.8, отношение  $\alpha = \sigma_f/\sigma_t$  близко к единице.

$\sigma$ , barn

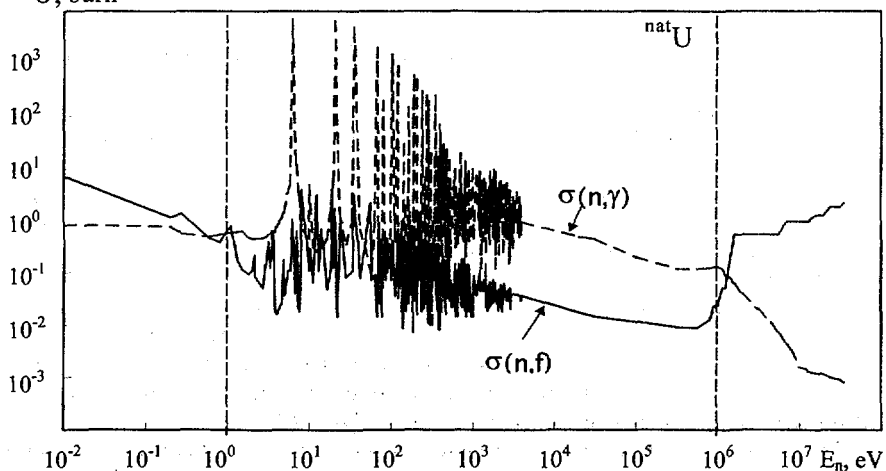


Рис. 8. Функции возбуждения (n, $\gamma$ )- и (n,f)-реакций для урана естественного изотопного состава

Скорости деления урана в этих трех областях нейтронного спектра определяются через показания четырехдетекторных измерителей числа событий деления, размещенных в различных точках бланкета. Зная пространственное распределение скоростей деления, в свою очередь, можно определить парциальные числа событий деления и следовательно энерговыделение по объему бланкета или его модели.

Область энергий резонансных нейтронов играет большую роль в калориметрии бланкета, так как спектр нейтронов деления урана с максимумом около 2 МэВ вследствие неупругого рассеяния «смягчается», трансформируясь в область промежуточных и резонансных энергий, поэтому сечения поглощения нейтронов могут быть значительно выше сечений деления.

## 6. Измерение спектра нейтронов в бланкете

В результате взаимодействия протонов с атомными ядрами свинцовой мишени генерируются быстрые нейтроны с широким спектром энергий, вплоть до 1000 МэВ. Эти нейтроны, в свою очередь, взаимодействуя с ядрами уранового бланкета, производят осколки деления, вторичные нейтроны и гамма-кванты. Как показывают расчеты, основная часть спектра нейтронов в средней по радиусу части уранового бланкета находится в интервале энергий от 0,1 до 50 МэВ.

Среди задач, решаемых в описываемом эксперименте, находятся следующие:

- *определение спектра быстрых нейтронов* в урановом бланкете;
- *измерение скоростей ядерных реакций* на изотопах ряда стабильных элементов, усредненных по спектру нейтронов в подкритической сборке.

**6.1. Для измерения спектра быстрых нейтронов в бланкете** будет применяться метод активации на пороговых детекторах (см. п. 4.1.3 и [14,15]). Для исследования нейтронного спектра с помощью активационных детекторов решается интегральное уравнение Фредгольма I рода:

$$\lambda_i = \int_0^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma_i(E) dE,$$

где  $\Phi(E)$  – энергетический спектр нейтронов,  $\sigma_i(E)$  – дифференциальное сечение  $i$ -й реакции, а  $\lambda_i$  – скорость  $i$ -й реакции.

**6.2. Методика измерения отношений средних сечений деления.** Отношения средних сечений деления дают информацию о спектральном составе потока нейтронов в экспериментальной установке, т.е. эти отношения используются в качестве спектральных индексов. Погрешность измерения спектральных индексов должна быть небольшой (2-10%). Сравнение результатов измерений и расчетов этих индексов позволяет выявить источник погрешностей при расчете характеристик ядерно-физических сборок.

В основе методики измерения отношений средних сечений деления нуклидов лежит соотношение между плотностью треков на поверхности твердотельного трекового детектора, который облучен в контакте с мишенью-радиатором, содержащей  $i$ -й делящийся нуклид и энергетической плотностью потока нейтронов  $\varphi(E)$  исследуемого поля нейтронов (см., например, работы [16, 17]).

Среднее сечение деления в  $k$ -й реакции на  $i$ -м нуклиде определяется следующим выражением:

$$\bar{\sigma}_k^i = \frac{\int_0^{\infty} \sigma_k^i(E) \varphi(E) dE}{\int_0^{\infty} \varphi(E) dE}.$$

Если провести предварительное облучение двух мишеней-радиаторов в контакте с твердотельным трековым детектором в стандартизованном поле нейтронов, то формула для определения отношения средних сечений делящихся нуклидов будет иметь вид

$$\frac{\bar{\sigma}_f^i}{\bar{\sigma}_f^{235U}} = \frac{N_m^i}{N_m^{235U}} \cdot \frac{N_{st}^{235U}}{N_{st}^i} \cdot \frac{(\bar{\sigma}_f^i)_{st}}{(\bar{\sigma}_f^{235U})_{st}},$$

где индексы  $m$  и  $st$  относятся к величинам исследуемого и стандартизованного полей нейтронов соответственно.

## 7. Предварительные результаты эксперимента

Ниже приведены предварительные данные обработки части результатов, полученных в ходе выполнения описываемого эксперимента.

7.1. С применением методики (см. п. 4.1.2) измерены спектры гамма-квантов нуклидов, образующихся в каждом из 16 активационных детекторов из урана естественного изотопного состава, размещение которых показано на рис.6 (направление  $K(330^\circ)$ ). Типичный спектр гамма-квантов исследуемых урановых детекторов после их экспонирования в составе уран-свинцовой сборки приведен для иллюстрации на рис. 9. Из обработки и анализа этих спектров определены радиальные зависимости выходов  $(n,f)$ -,  $(n,\gamma)$ - и  $(n,2n)$ -реакций на ядре урана-238; на рис.10 показаны примеры таких зависимостей. В свою очередь массовые распределения осколков деления и продуктов, образовавшихся в реакции радиационного захвата, позволяют получить сведения об энерговыделении в бланкете из урана естественного изотопного состава (см. п. 5.1).

Подробное описание методики и анализ данных по определению мощности энерговыделения в бланкете будут опубликованы отдельно.

7.2. Определение парциальных интегралов деления урана выполнено по результатам, полученным с помощью оригинальной методики – интегратора деления ядер урана (см. п. 4.1.1). Как указано в п.5.3 настоящей работы, использование комбинации радиаторов (обедненных и обогащенных по содержанию изотопа уран-235) и кадмиевых экранов позволяет провести раздельное определение числа делений нейтронами из различных энергетических областей спектра (тепловые, резонансные и быстрые нейтроны). На рис. 11 показаны результаты разделения этих вкладов в зависимости от расстояния от оси симметрии уран-свинцовой сборки в интервале 5-14 см. Здесь наблюдается тенденция роста вклада медленных нейтронов с увеличением радиуса. Этот вывод согласуется с результатом, полученным в работе [10], относительно выбора положений, оптимальных для размещения образцов при изучении сечений трансмутации радиоактивных отходов тепловыми и резонансными нейтронами. Для иллюстрации на рис. 12 показаны изображения двух участков трековых детекторов, которые размещались на центральной пластине по направлениям С, D, I и J (см. рис. 6).

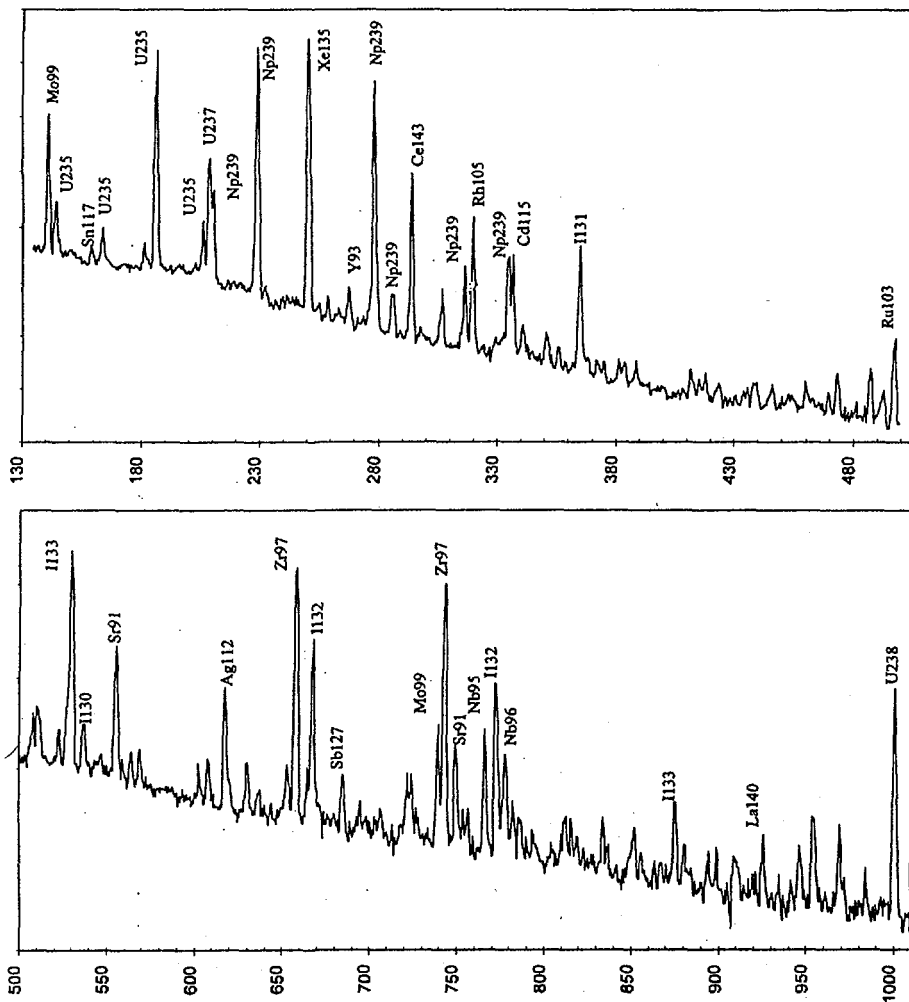
Анализ данных, представленных на рис. 11, указывает на основной вклад быстрых нейтронов в процесс деления ядер урана-238.

Подробное описание вышеназванной методики и анализ полученных с ее помощью результатов будут проведены в отдельной публикации.

7.3. В табл. 1 содержатся результаты об удельной активности части из 200 зарегистрированных радионуклидов с периодом полураспада более 4 часов, которые образовались в пороговых детекторах (см. п. 4.1.3 и рис. 3 и 6); кроме этого, приведены экспериментальные данные об удельной активности на один падающий протон и один грамм вещества активационного детектора.

Методика восстановления спектров быстрых нейтронов с энергией  $E_n > 20$  МэВ с помощью пороговых детекторов использовалась мало: причиной этого является отсутствие необходимых данных о сечениях пороговых реакций нейтронов с ядрами при энергиях из интервала от 20 до 1500 МэВ.

Рис. 9. Типичный спектр гамма-квантов облученных урановых таблеток (по оси абсцисс отложена – энергия гамма -квантов, кэВ, а по оси ординат – число отсчетов в логарифмическом масштабе, отн. ед.)



**Комментарии:**

- Линии 143.8, 163.4, 185.7, 205.4 и 1001.0 кэВ соответствуют гамма-квантам нуклидов от  $\alpha$ -распада изотопов урана ( $A=235$  и  $238$ ).
- Линии 209.7, 228.2, 277.6, 285.4, 315.9 и 334.3 кэВ - гамма-квантам от  $\beta$ -распада  $^{239}\text{Np}$ , как дочернего продукта распада ядер  $^{239}\text{U}$ , образованных в реакции  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ .
- Линия 208,0 кэВ соответствует распаду ядер  $^{237}\text{U}$ , образованных в реакции  $^{238}\text{U}(n,2n)$ .
- Остальные линии соответствуют фрагментам деления изотопов урана.

$N(^{237}\text{U}) \times R$  и  $N(^{97}\text{Zr}) \times R$

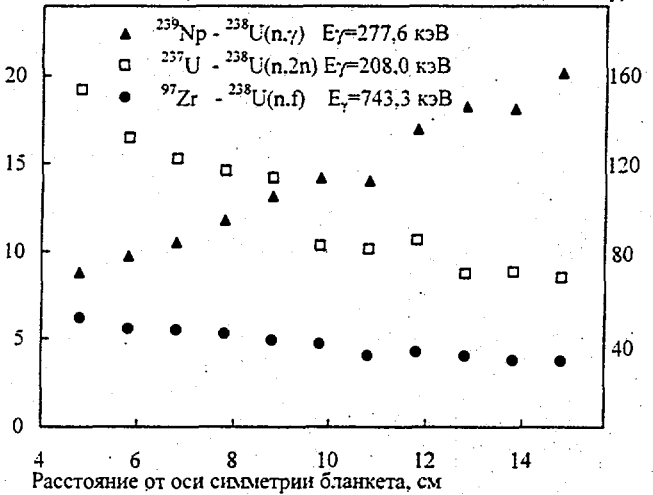


Рис. 10. Пространственное распределение относительных выходов (п. f)- (п.  $\gamma$ )-и (п. 2n) - реакций в активационных урановых таблетках, размещенных по радиусу на центральной пластине между секциями бланкета (см. рис. 3 и 6 и п. 4.1.2). Значения по оси ординат приведены в произвольных единицах.

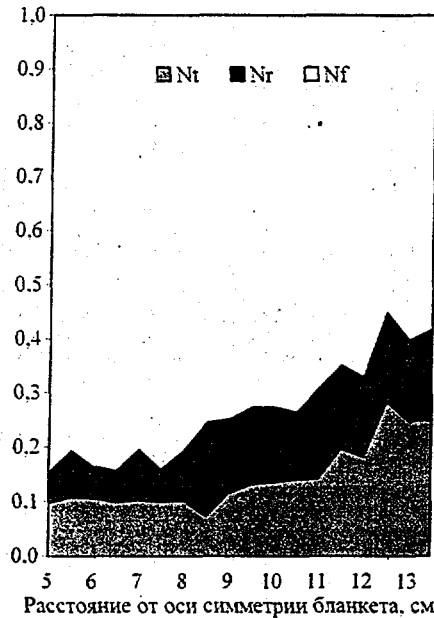


Рис. 11. Относительные вклады тепловых, резонансных и быстрых нейтронов в процесс деления естественного урана в объеме бланкета



Рис. 12. Типичное изображение треков, образованных осколками деления ядер урана с плотностью  $4,52 \cdot 10^6$  тр./см<sup>2</sup> (вверху) и  $0,5 \cdot 10^6$  тр./см<sup>2</sup> (внизу)

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов, образовавшихся в пороговых детекторах

№	El	Атомная масса	Ядро-прод.	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ , кэВ	$A_1$ , Bq	$A_2$ , Bq	$A_3$ , Bq	$A_1/p \cdot 10^{13}$	$A_2/p \cdot 10^{13}$	$A_3/p \cdot 10^{13}$
1	Al	27	Na-24	0,625	1369	817,5	1298	2201,3	346,4	550,0	932,8
2	Mg	25	Na-24	0,625	1369	1518	1403	4833,0	643,2	594,5	2047,9
3	Ti	46	Sc-44	0,1638	1157	24500	31670	1024,2	10381,4	13419,5	434,0
	Ti	46	Sc-44m	2,4417	271,2	13,8	17,4	61,6	5,8	7,4	26,1
	Ti	47	Sc-46	83,83	889,2	4,2	4,6	11,2	1,8	1,9	4,7
	Ti	48,49	Sc-47	3,35	159,4	107,9	147,6	506,2	45,7	62,5	214,5
4	Mn	55	Mn-52	5,6	935	1,1	8,4		0,5	3,6	0,0
	Mn	55	Mn-54	312,5	835	3,8	5,2		1,6	2,2	0,0
5	Fe	54	Mn-52	5,6	1432	6,8	7,4	29,4	2,9	3,1	12,4
	Fe	56	Mn-54	312,5	835	1,7	1,9	4,5	0,7	0,8	1,9
6	Co	59	Co-55	0,7308	931	7,7	4,2	180,8	3,3	1,8	76,6
	Co	59	Co-56	77,76	1238	0,5	1,2	3,5	0,2	0,5	1,5
	Co	59	Co-57	270,9	122	0,9	1	6,3	0,4	0,4	2,7
	Co	59	Co-58	70,8	811	14,5	17,3	67,4	6,1	7,3	28,6
	Co	59	Co-60	1924,6	1173	2,4	2,6	20,4	1,0	1,1	8,6
7	Ni	58	Co-56	78,76	846,8	2,7	4,3	5,6	1,1	1,8	2,4
	Ni	58,60-62,64	Ni-57	1,5033	1378	86	95,3	178,2	36,4	40,4	75,5
	Ni	60	Co-58	70,8	810,8	49,5	54,4	81,2	21,0	23,1	34,4
	Cu	63,65	Cu-64	0,5292	511	3302	2953	10945,5	1399,2	1251,3	4637,9
8	Zn	64,66-68	Zn-62	0,3858	596,6	63,4	90	170,3	26,9	38,1	72,2
	Zn	66	Cu-64	0,5292	511	1798	2114	1058,0	761,9	895,8	448,3
	Zn	64,66-68,70	Zn-65	243,9	1116	5,2	5	25,6	2,2	2,1	10,9
	Zn	68	Cu-67	2,5775	184,6	16,1	18,4	36,9	6,8	7,8	15,6
	Zn	68	Zn-69m	0,5733	438,6	61,5	62,1	50,6	26,1	26,3	21,4
9	Zr	90-92	Zr-86	0,6875	243	21,7	32,8	41,9	9,2	13,9	17,7
	Zr	90-92,94	Zr-88	83,4	392,9	2,6	3,6	25,0	1,1	1,5	10,8
	Zr	90	Y-88	106,64	1836	1,8	2		0,8	0,8	0,0
	Zr	90-92,94,96	Zr-89	3,2679	909,2	182,7	243,8	399,3	77,4	103,3	169,2
10	Zr	94	Sr-91	0,3958	1024	107,3	87,9	89,4	45,5	37,2	37,9
	Zr	94,96	Zr-95	63,98	756,7	2,4	1,9		1,0	0,8	0,0
	Zr	96	Zr-97	0,7042	743	53,7	42,4	77,7	22,8	18,0	32,9
11	Mo	92	Zr-89	3,2679	909,2	42,9	62,4	67,6	18,2	26,4	28,7
	Mo	92,94-98,100	Mo-93m	0,2854	1477	93,6	62,4	973,1	39,7	26,4	412,3
	Mo	96,97	Nb-95	35,15	765,8	2,7	4,5		1,1	1,9	0,0
	Mo	97,98	Nb-96	0,9729	778,2	95,1	103,9	238,4	40,3	44,0	101,0
12	Rh	103	Rh-100	20,8	540	385	360,7	43,1	163,1	152,8	18,3
	Rh	103	Rh-101m	4,34	307	105	114,8	63,8	44,5	48,6	27,1
13	Cd	108	Ag-106m	8,41	511,8	9,4			4,0	0,0	0,0
14	In	113	In-111	2,83	171	54,6	71,8	151,8	23,1	30,4	64,3
	In	113,115	Ag-111	7,45	245	2356	4376	8532,0	998,3	1854,2	3615,2
	In	113,115	In-114m	49,5	190	47	44,6	66,9	19,9	18,9	28,4
	In	115	In-115m	0,1867	336	16730	15230	31454,5	7089,0	6453,4	13328,2
15	Au	197	Au-194	1,6458	329	131,2	196,7	294,3	55,6	83,3	124,7
	Au	197	Ir-194	0,7979	328	1191	2157		504,7	914,0	0,0
	Au	197	Au-196	6,18	355	120,6	177,4	369,8	51,1	75,2	156,7
	Au	197	Au-198	2,7	412	4227	5569	26711,8	1791,1	2359,7	11318,6
16	Hg	196,198-200	Hg-193m	0,4625	281,7	25,8	39,5		10,9	16,7	0,0
	Hg	196	Au-194	1,6458	328,5	14,2	11,5		6,0	4,9	0,0
	Hg	196,198-202,204	Hg-197	2,6708	191,4	79,6	106,8		33,7	45,3	0,0
	Hg	199,2	Au-198	2,7	411,8	13,2	7,7		5,6	3,3	0,0
	Hg	200,201	Au-199	3,14	158,4	6,3	3,8		2,7	1,6	0,0
17	Pb	204,206,207	Pb-200	0,8958	147,6	10,1	10,6	48,0	4,3	4,5	20,3
	Pb	204,206-208	Pb-201	0,3917	331,2	157,7	168,2	127,6	66,8	71,3	54,1
	Pb	204	Tl-202	12,23	439,6	2,3	2,7	13,1	1,0	1,1	5,5
	Pb	204,206-208	Pb-203	2,1888	279	54	50	119,1	22,9	21,2	50,5
18	Bi	209	Bi-204	0,4833	899	174,1	220		73,8	93,2	0,0
	Bi	209	Bi-205	15,31	1764	11,1	13,6	10,8	4,7	5,8	4,6
	Bi	209	Bi-206	6,4	803,1	27,9	35	159,4	11,8	14,8	67,6
	Bi	209	Bi-207	13878	570	0,4	0,4	15,7	0,2	0,2	6,7

7.4. Среди ряда задач по созданию U/Pb-сборки, требующих компьютерного моделирования, важное место занимает спектр нейтронов. В различных частях сборки нейтронные спектры формируются в результате транспорта нейтронов, генерируемых в свинцовой мишени под действием пучка первичных протонов, и нейтронов, образующихся в процессе деления ядер урана в бланкете.

На рис. 13 представлен спектр нейтронов, рассчитанный по модели ДСМ-СЕМ [18] с учетом конкретных размеров и материалов сборки (см. рис. 3 и 6) при различных значениях расстояния  $l$  между торцом первой секции бланкета и торцом свинцовой мишени ( $l = 5, 10$  или  $15$  см), на который падает пучок протонов с энергией  $1,5$  ГэВ. Полученные нейтронные спектры нормировались на один первоначальный протон и один  $\text{см}^2$  поверхности. В этом расчете моделировались спектры нейтронов, пересекающих поверхность с радиусом  $R=7,5$  см в объеме секций уранового бланкета. Выбор указанного значения  $R$  для расчета обусловлен радиусом окружности, на которой размещено 23 пороговых активационных детектора, позволяющих на основании результатов измерений получить экспериментальный спектр нейтронов (подробности в п. 4.1.3 и 6.1 текста).

7.5. После завершения обработки экспериментальных результатов (см. п. 4.1.4), планируется получить следующие данные:

- распределения скоростей деления (расщепления)  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  и событий высокопорогового деления  $^{209}\text{Bi}$  и  $^{207}\text{Pb}$ , а также спектрального индекса  $\frac{\bar{\sigma}_f^{232\text{Th}}}{\bar{\sigma}_f^{235\text{U}}}$  по радиусу мишени и бланкета;
- отношения средних сечений деления  $\frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_f^{235\text{U}}}$  ( $i = ^{234}\text{U}, ^{236}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$ ) в бланкете (см. рис. 6, точка 3 на направлениях E и G).

Предварительные результаты по распределению плотностей деления ядер урана-235 по радиусу U/Pb-сборки показаны на рис. 14. Расчетно-экспериментальный анализ полученных результатов позволит усовершенствовать используемые расчетные методики и применяемые системы ядерных констант.

7.6. Результаты теплофизических измерений. На рис. 15 и 16 представлены результаты термометрических измерений, выполненных с использованием микротермопар [10] и полупроводниковых терморезисторов. В обоих случаях использовалась одинаковая регистрационно-анализирующая аппаратура (см. п. 4.2.1 и рис. 7).

7.6.1. Для иллюстрации на рис. 15 показана часть термограмм, которые были получены в ходе первого облучения, описанного в п. 4.2 настоящей работы, но в предварительном анализе использованы данные обоих облучений. Во время этих облучений наблюдалась устойчивая тенденция снижения температуры окружающей среды. Этот фактор был учтен при анализе и расчетах изменения температуры в уран-свинцовой сборке за счет ядерно-физических процессов, происходящих в мишени, которая облучается протонным пучком. Термограммы, приведенные на рис. 15, получены в результате пересчета первичных измерений с учетом влияния этого внешнего обстоятельства.

Качественно результаты измерений заключаются в следующем. В свинцовой мишени максимальный нагрев происходит на глубине примерно 5 см от входного торца свинцовой мишени и составляет около  $0,5$  °C за 40 мин облучения. С увеличением значения координаты  $Z$  нагрев мишени уменьшается и составляет около  $0,2$  °C при  $Z = 20$  см (см. рис. 7). Изменения температуры по радиусу мишени относительно небольшие: нагрев в бланкете составляет  $0,15-0,35$  °C, слабо изменяется

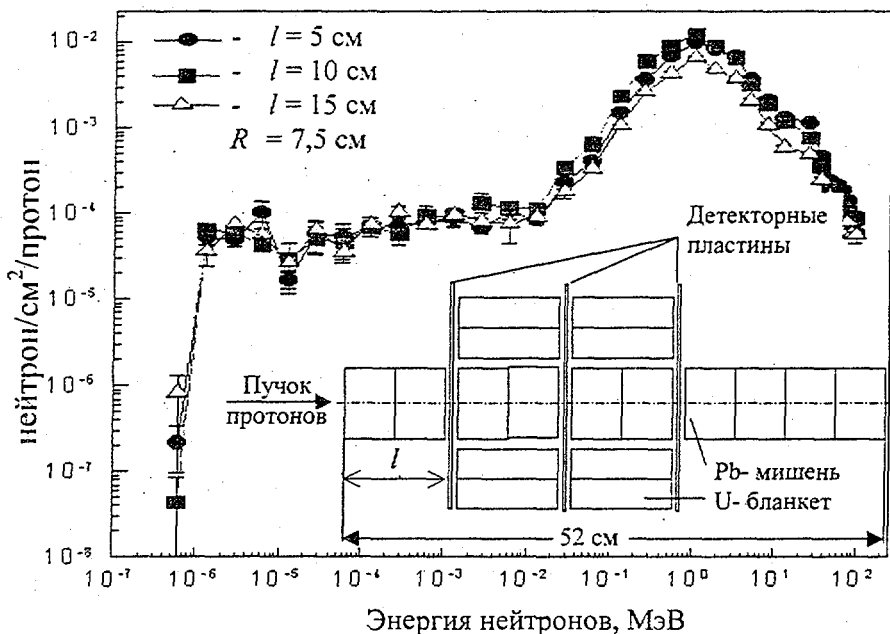


Рис. 13. Расчетный спектр нейтронов для модели U/Pb – сборки в плоскости центральной детекторной пластины. В нижней части рисунка показана схема размещения мишени, blankets и детекторных пластин (см. рис. 3 и 6)

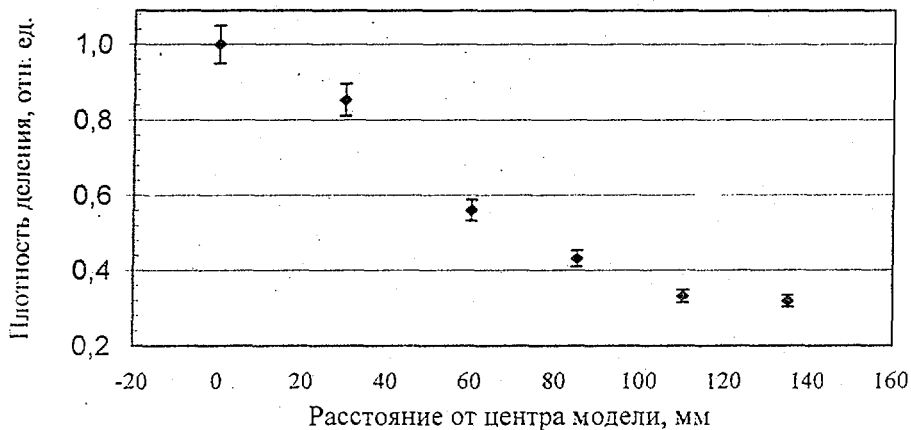


Рис. 14. Распределение плотностей деления ядер урана-235 по радиусу модели U/Pb-сборки электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» (синхрофазотрон ОИЯИ, ноябрь 1999 г.)



Температура, °С

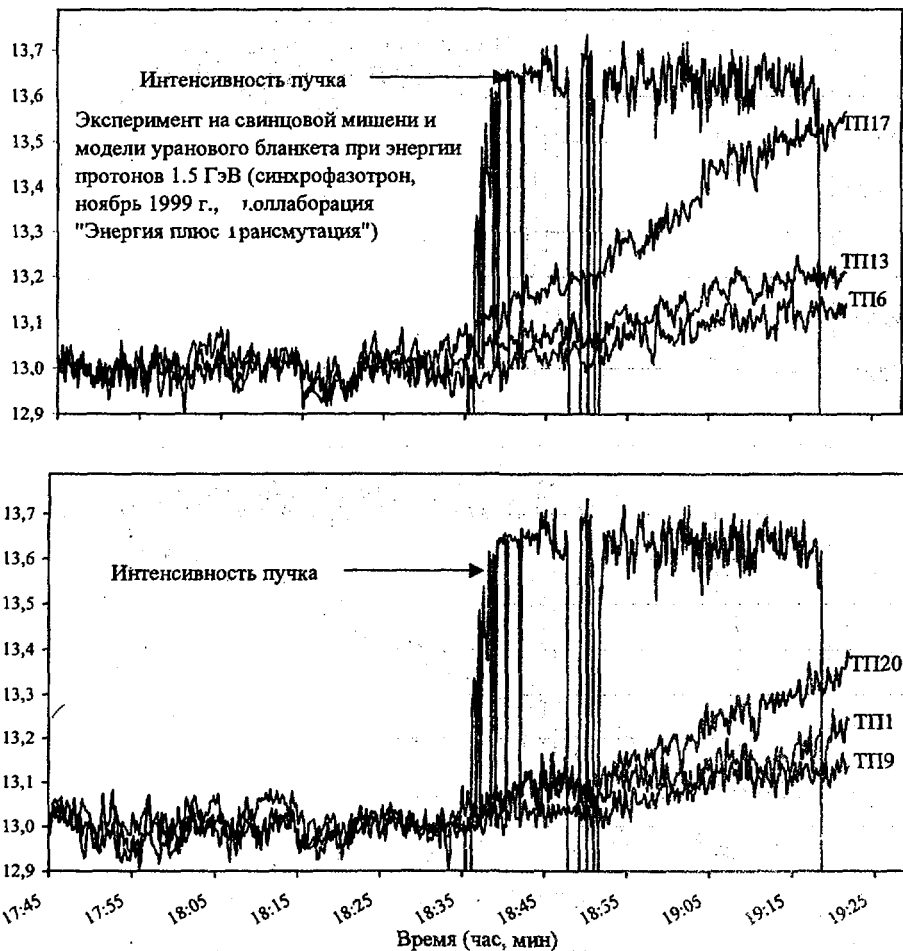


Рис. 15. Термограммы, иллюстрирующие временное развитие разогрева урановых стержней в двух сечениях модели blankets. По оси ординат показаны номера микротермопар (6, 13 и 17 - сверху и 9, 16 и 20 - внизу), положение которых с указанием координат приведено на рис. 7. Кроме этого, на данном рисунке показано изменение интенсивности протонного пучка в ходе облучения уран-свинцовой сборки (в относительных единицах)

Температура, °С

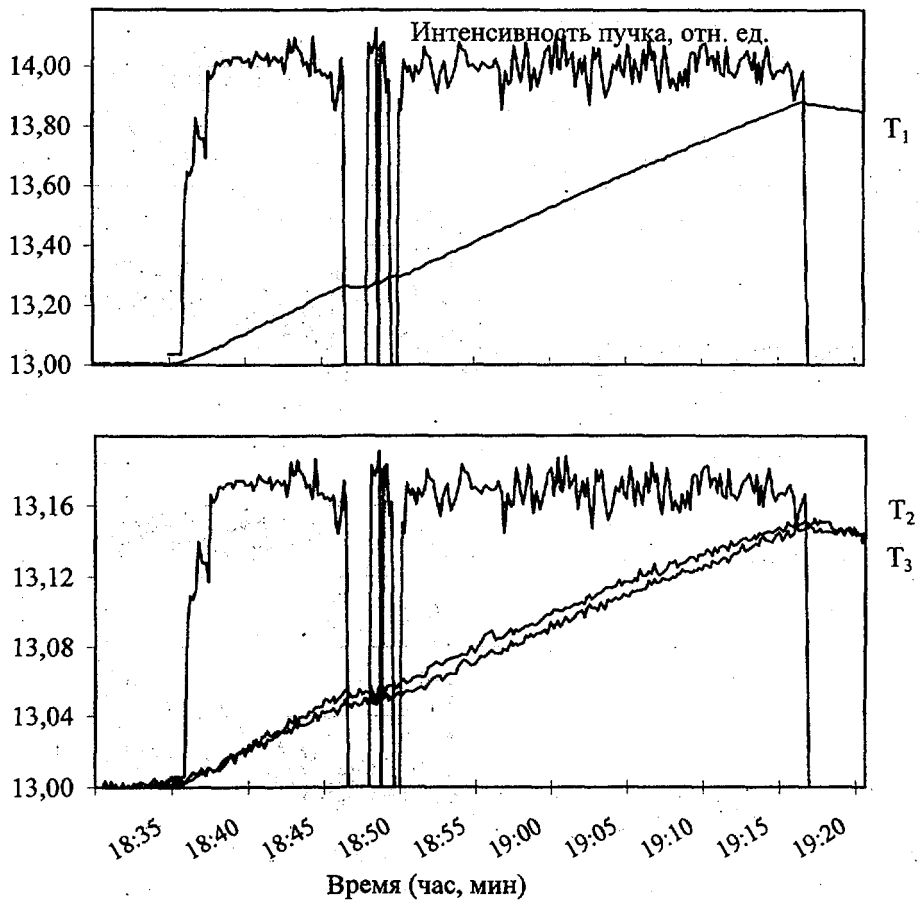


Рис. 16. Термограммы, полученные с помощью полупроводниковых терморезисторов.  $T_1$ - от датчика, расположенного в свинцовой мишени на расстоянии 50 мм от входного торца (по ходу пучка), а  $T_2$  и  $T_3$  - на середине боковой поверхности урановых стержней второй секции blankets, которые размещены симметрично относительно оси мишени (см. рис. 7)

по длине уранового стержня и уменьшается по мере удаления от оси симметрии бланкета.

Изменение температуры в точках 24 и 25 (см. п. 4.2.1 и рис. 7) во время облучения практически отсутствует. Таким образом, прямое воздействие протонов на термопары при интенсивности пучка до  $10^{10}$  протонов/с не приводит к искажениям их показаний (по крайней мере, в пределах точности измерений, которая составляет  $\pm 0,03$  °С).

Предварительные оценки по результатам экспериментов показали, что при тепловой мощности протонного пучка около 0,9 Вт тепловыделение в свинцовой мишени составило примерно 0,5 Вт, а тепловыделение в урановом бланкете – около 1 Вт. При этом можно предположить, что входной и, в меньшей степени, выходной участки мишени, не окруженные секциями уранового бланкета, теряют часть вторичных нейтронов «в атмосферу», т.е. эти нейтроны не попадают в урановые стержни бланкета и тем самым не производят деления ядер урана.

7.6.2. На рис. 16 для иллюстрации приведены термограммы, которые были получены *теплофизической методикой на основе полупроводниковых терморезисторов*. Термограмма  $T_1$  показывает удовлетворительное согласие с данными, полученными микротермопарой номер 23 (см. п. 7.6.1 и рис. 7), т.е. нагрев терморезистора  $T_1$  составил  $\sim 0,9$  °С, а термопара номер 23 дает нагрев около 1,0 °С. Термограммы  $T_2$  и  $T_3$  получены полупроводниковыми терморезисторами, которые установлены на середине боковой поверхности урановых стержней второй секции бланкета. Эти терморезисторы расположены симметрично относительно оси свинцовой мишени. Термограммы  $T_2$  и  $T_3$  показывают практически одинаковый нагрев - порядка  $\sim 0,15$  °С, что свидетельствует о симметричности поля электроядерных нейтронов в исследуемой модели U/P-сборки. Иначе говоря, этот результат демонстрирует надежность юстировки сборки относительно направления протонного пучка, падающего на торец свинцовой мишени (см. п. 2).

В настоящее время с использованием термограмм, полученных обеими методиками, проводится расчетно-теоретический анализ ядерно-физических и теплоэнергетических процессов в модели уран-свинцовой сборки, результаты которого в сопоставлении с экспериментальными данными позволят сделать окончательные выводы и заключения.

## 8. Заключение

Эксперимент на модели U/Pb-сборки, который выполнен в ноябре 1999 г., является важным этапом работ по созданию в Лаборатории высоких энергий полномасштабной установки для «Исследования физических аспектов электроядерного способа получения энергии и изучения трансмутации радиоактивных отходов на релятивистских пучках синхрофазотрона/нуклотрона ОИЯИ» - проект «Энергия плюс трансмутация».

В проведенном эксперименте на пучке протонов с энергией 1,5 ГэВ использован набор активационных, трековых и теплофизических методик для изучения различных характеристик и физических процессов в электроядерной гибридной системе, которая включает ускоритель, свинцовую мишень и бланкет из естественного урана. Результаты применения этих методик, образующих *многоканальный калориметр деления*

*урана*, показывают их высокую надежность, необходимую точность и эффективность измерений.

В настоящем эксперименте получены новые результаты, относящиеся прежде всего к калориметрии уранового бланкета, а также дополнительные данные, к ранее опубликованным в нашей работе [9], по калориметрии свинцовой мишени.

С помощью многопозиционных комплектов детекторов и датчиков была выполнена *активационная и трековая томография и теплофизическая калориметрия* уранового бланкета и мишени, результаты которых позволят:

- получить данные о коэффициенте усиления мощности пучка и размножении нейтронов;
- определить величины интегралов деления и радиационного поглощения в уране естественного изотопного состава;
- получить данные о спектре и балансе нейтронов в объеме мишени и бланкета с помощью модифицированных методик измерений.

Авторы выражают глубокую благодарность академикам РАН А.М.Балдину, В.И.Субботину и Г.А.Филиппову за интерес и поддержку исследований по электроядерной тематике, а также А.И.Малахову, В.Н.Пеневу, И.А.Шелаеву, Ю.С.Анисимову и П.И.Зарубину 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 эффективной работы синхрофазотрона при облучении модели уран-свинцовой сборки.

Авторы благодарят участников Объединенного научного семинара Лаборатории высоких энергий и Лаборатории физики частиц ОИЯИ (руководитель семинара В.А.Никитин) за конструктивное обсуждение результатов данного эксперимента.

Авторы благодарят Министерство по атомной энергии России за предоставление материала, из которого создан урановый бланкет – именно благодаря этому появилась возможность реализации программы электроядерных исследований на пучках синхрофазотрона/нуклотрона специалистами ОИЯИ и других стран.

Авторы благодарят коллективы Опытного-экспериментального производства и Административно-хозяйственного отдела (руководители Ю.И.Тятюшкин и В.Г.Макуненко) Лаборатории высоких энергий за изготовление оборудования, А.Ф.Елишева, И.И.Марьина и А.С.Нестеровича (АНТЦ «Сосны», Минск) за участие в монтаже прототипа установки «Энергия плюс трансмутация», а также Л.В.Корнюшину, С.М. Криволюстова и Е.М.Павлюк за техническую помощь в оформлении настоящей публикации.

Эксперименты по электроядерной технологии, которые описаны в данной работе, выполнены при поддержке целевых грантов, выделенных на исследования по этой тематике Российским фондом фундаментальных исследований (грант 00-02-16476), научными центрами Германии (FZJ, Юлих-Моелльн и Институт ядерной химии при Университете Филиппса, Марбург) и полномочными представителями Монголии, Чехии и Польши в ОИЯИ, а также гранта дирекции ОИЯИ на обеспечение эксплуатации ускорительных и реакторных установок Института.

## Литература

1. М.И.Кривопустов, Д.Чултэм. Об экспериментах по электроядерной технологии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на пучках синхрофазотрона. «Новости ОИЯИ», 1998, 3 (ноябрь), с.27-30, Дубна.
2. M.I.Krivopustov, D.Chultem, Ts.Tumendelger et al. Project «Energy + Transmutation»: Complex Investigation of Physical Aspects of Accelerator Driven Power Generation and Nuclear Radioactive Wastes Transmutation Using JINR (Dubna) Synchrophasotron/Nuclotron Beams. Abstracts for 3<sup>rd</sup> International Conference Accelerator Driven Transmutation Technologies and Application (Praha, Czech Republic, 7-11 June, 1999), p. 55.
3. M.I.Krivopustov, D.Chultem, Ts.Tumendelger et al. In «Research Program of the Laboratory of High Energies JINR». 99-266, Dubna, 1999, pp. 135-139.
4. 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.
5. а) В.А.Воронко, ..., К.Д.Толстов. Генерация нейтронов в протяженной 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. Сообщения 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.. Сообщения ОИЯИ 18-92-303, Дубна, 1992.
6. а) D.Chultem, C.Damdinsuren et al. Measurement of the neutron component in a shower generated in a Lead target by relativistic nuclear beam. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. 1996, A381, 488.  
б) Б.Тумэндэмбэрэл, Д.Чултэм. Проблемы зашлаковывания и отравления электроядерного реактора. Краткие сообщения ОИЯИ 1(75)-96, Дубна, 1996.
7. 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.
8. 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.
9. а) Ts.Tumendelger, M.I.Krivopustov, D.Chultem et al. Activation and Track Tomography and Calorimetry of Target for U/Pb-Assembly at Energy of Proton 1.5 GeV. Abstracts for 3<sup>rd</sup> Int. Conf. ADTTA-99, (Praha, June 1999), p. 130.  
б) Ц.Тумэндэлгэр, М.И.Кривопустов, Д.Чултэм и др. Калориметрия электроядерной мишени для уран-свинцовой сборки при энергии протонов 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-99-247, Дубна, 1999 (направлено в «Kerntechnik»).

- 10.а) Р.Брандт, ...,М.И.Кривопустов, Ц.Тумэндэлгэр, Д.Чултэм и др. Исследование температурного и нейтронного полей в свинцовой среде при взаимодействии релятивистских протонов. Препринт ОИЯИ Р1-99-117, Дубна, 1999 (направлено в «Kerntechnik»).
- 6) D.Chultem, M.I.Krivopustov, Ts.Tumendelger et al. Investigation of Temperature and Neutron Fields in Lead Medium During the Interaction with Relativistic Protons. Abstracts for 3<sup>rd</sup> Int. Conf. ADTTA-99, (Praha, June 1999), p. 129.
11. A.Kugler, V.Wagner, C.Filip, M.I.Krivopustov, Ts.Tumendelger, D.Chultem et al. Experimental study of neutron fields produced in proton reactions with heavy targets. Report UJF-EXP-99/1, Rez, Czech Republic, July 1999.
12. I.Adam, . . ., M.I.Krivopustov et al. Monitor Reactions in Al- foils for High Energy Proton Beams bombarding a thick Target. JINR Preprint E13-99-189, Dubna, 1999. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, 1999, B 155,110
13. Таблицы физических величин. Справочник. Под редакцией академика И.К.Кикоина. Москва. Атомиздат, 1976.
14. С.С.Ломакин, В.И.Петров, П.С.Самойлов. Радиометрия нейтронов активационным методом. Москва, Энергоатомиздат, 1975.
15. Е.А.Краммер-Агеев, В.С.Трошин, Е.Г.Тихонов. Активационные методы спектрометрии нейтронов. Москва, Атомиздат, 1976.
16. Ю.А.Казанский, Б.С.Магусевич. Экспериментальные методы физики реакторов. Москва, Энергоатомиздат, 1984.
17. И.В.Жук и др. Измерение отношений средних сечений... Вести Академии наук Белоруссии, Минск, 1987, с. 18.
18. A.Polanski, A.N.Sosnin, V.D.Toneev. JINR Preprint E2-91-562, Dubna, 1991.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 июля 2000 года.