

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Д1-2003-3

На правах рукописи  
УДК 539.172.12

**ХЕЛЛА ХАЛЕД МОХАМЕД МАГДИ ЕЛ-ВАФАЕЙ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТРАНСМУТАЦИИ НЕКОТОРЫХ РАДИОАКТИВНЫХ  
ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЧКОВ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Дубна 2003

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий имени В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований (Дубна).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук профессор	Брандт Рейнхард
доктор физико-математических наук профессор	Словински Бронислав
кандидат физико-математических наук	Кривопустов Михаил Иванович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук Титаренко Юрий Ефимович

Доктор физико-математических наук Ужинский Владимир Витальевич

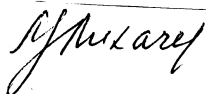
Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения (Москва, Россия)

Защита состоится « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2003г. в \_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) по адресу: 141980, г.Дубна, Лаборатория высоких энергий, ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2003г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор

 Лихачев М.Ф.

## Общая характеристика работы

Начиная с конца 1945 года в странах, которые приступили к развитию ядерных технологий, были накоплены значительные количества ядерных отходов. Высокорадиоактивное отработанное топливо с ядерных электростанций постоянно выгружается из энергетических реакторов; обычно это составляет порядка 25-30 тонн/год из каждого водо-водяного ядерного реактора мощностью 1000 МВт-э (эти реакторы составляют основную часть реакторного парка). В настоящее время в мире в рабочем режиме находятся 400 промышленных ядерных электростанций, включающих примерно 120 ГВт электрической мощности, вырабатываемых в Западной Европе, и 45 ГВт электрической мощности, вырабатываемых в странах бывшего СССР и Восточной Европы. Несмотря на то, что ядерные программы постепенно сворачиваются по всему миру, отработанное топливо продолжает постоянно накапливаться, в основном оно хранится во временных хранилищах в ожидании последующей переработки или окончательного подземного захоронения. В соответствии с данными OECD/NEA, полученным в 1992 году, к концу прошлого века ожидалось накопление порядка 150000 тонн отработанного топлива, выгруженного из промышленных реакторов, включая все страны в системе OECD/NEA.

Топливо, загружаемое в обычные водо-водяные реакторы, содержит свежий уран, обогащенный примерно до 3.5% по  $^{235}\text{U}$ . Отработанное топливо содержит в себе практически всю радиоактивность, накопленную в реакторе за счет реакций деления ядер, захвата нейтронов и каналов радиоактивного распада. Эта радиоактивность характеризуется наличием долгоживущих, высокоактивных, радиотоксичных нуклидов. Характеристики наиболее важных продуктов деления, делящихся изотопов и долгоживущих актинидов приводятся в работе<sup>1</sup>.

Такое количество радиоактивных отходов составляют очень серьезную проблему, как с экономической, так и с экологической точки зрения. Так как топливные элементы содержат очень долгоживущие изотопы, они должны храниться, по крайней мере, в течение  $10^5$  лет в условиях физической изоляции от биосферы с использованием надежной защиты на достаточной глубине в земле, прежде чем они распадутся до безопасного уровня радиоактивности, соответствующего рудам природного урана. Имеются два параллельных пути уменьшения этих количеств радиоактивных отходов. Первый способ заключается в трансмутации (или трансформации) долгоживущих продуктов деления, таких как  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$  and  $^{135}\text{Cs}$  посредством поглощения нейтронов и последующего  $\beta$ -распада в стабильные или

---

<sup>1</sup> J.P. Schapira, NIM A280 (1989) 568-582

короткоживущие ядра. Второй метод заключается в выжигании (или инсинерации) трансурановых нуклидов посредством ядерного деления, происходящего в ядерных реакторах и приводящего к выделению дополнительной энергии и вторичных нейтронов. В настоящее время в качестве общепринятой можно рассматривать идею комплексного решения следующих взаимосвязанных проблем: экологически безопасного и коммерчески конкурентоспособного производства энергии и одновременной трансмутации (или инсинерации) накапливаемых радиоактивных отходов с использованием подкритических реакторов, приводимых в действие ускорителями. Сейчас можно считать, что наилучшим способом трансмутации таких опасных нуклидов в стабильные или короткоживущие нуклиды является использование высокоинтенсивных потоков нейтронов ( $\sim 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>с), с применением для их генерации пучка высокоэнергетических частиц, взаимодействующих с массивными мишенями из тяжелых металлов, таких как Pb, U, Bi или их композиции [НЗ]. За последние 10 лет во многих лабораториях были предприняты интенсивные исследования трансмутации радиоактивных отходов (RWT) и были получены первые надежные оценки характеристик некоторых конкретных процессов для основных долгоживущих нуклидов: <sup>129</sup>I, <sup>237</sup>Np and <sup>239</sup>Pu. Например, эксперименты, проведенные в ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) с использованием пучков синхрофазотрона/нуклотрона на установке Гамма-2 для изучения процессов трансмутации отдельных долгоживущих радиоактивных отходов.

Целью настоящей диссертации является дальнейшее продолжение экспериментальных исследований, и представленная работа содержит результаты, полученные на установке Гамма-2 по трансмутации некоторых долгоживущих радиоактивных отходов (<sup>129</sup>I, <sup>237</sup>Np и <sup>239</sup>Pu) с использованием нейтронов, генерируемых в массивных мишенях в реакциях расщепления ядер как результат взаимодействия между ядрами мишени и релятивистского протонного пучка при различной энергии.

Экспериментальное значение скорости накопления продуктов реакции (В-величина) определяется как полное число ядер, сформированных за время облучения одного грамма образца с нормировкой на одну первичную частицу пучка. Эта величина используется в настоящей работе (также как и в работе <sup>2</sup>) для оценки распределения нейтронного потока в объеме мишени и замедлителя.

$$V(^A X) = \frac{\text{число рожденных атомов } ^A X}{(1 \text{ г образца}) * (\text{один налетающий ион})} \quad (1)$$

Величина В представляет собой чисто эмпирический параметр, применимый только для заданной конфигурации установки, мишени, типа

---

<sup>2</sup> J.-S. Wan et al., Kerntechnik Vol. 63(1998) 167-177

налетающей частицы, ее энергии и точного положения исследуемого образца в установке.

### Основные результаты, полученные в настоящей работе

- 1-В данной работе использовалась экспериментальная установка Гамма-2 с системой мониторингования пучка и набором детекторов из  $^{139}\text{La}$  и урана в эксперименте, проведенном в ноябре 1999 г., системой мониторингования пучка и набором детекторов из  $^{139}\text{La}$ , размещенных на различной глубине в эксперименте 2001 г., с набором образцов для изучения трансмутации, размещенных на поверхности установки в обоих облучениях (ноябрь 1999 г. и ноябрь 2001 г.).
- 2-В обоих облучениях проведено экспериментальное определение положения пучка относительно мишени и размеров пучка.
- 3-Проведено определение флюенса протонов с использованием активационной методики ( $^{27}\text{Al}$ ).
- 4-Получено экспериментальное значение скорости накопления нуклидов для различных детекторов и трансмутационных образцов.
- 5-Скорость трансмутации некоторых долгоживущих радиотоксичных отходов ( $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ).

### Научная новизна

В рамках настоящей диссертационной работы впервые проведено исследование:

- 1)-Трансмутации делящегося изотопа  $^{239}\text{Pu}$  с использованием нейтронов, генерируемых в свинцовой мишени пучками протонов с энергией 0.53 ГэВ и 1.0 ГэВ.
- 2)- Трансмутации  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$  в установке с различными мишенями (Pb или U/Pb), облучаемыми пучками протонов со значениями энергии, не изученными в ранее проведенных экспериментах:
  - а-на свинцовой мишени, облучаемой протонами с энергией 1.0 ГэВ.
  - б-на уран-свинцовой мишени, облучаемой протонами с энергией 0.53 и 1.0 ГэВ.
- 3)- Влияния толщины парафинового замедлителя на экспериментальную величину скорости накопления нуклидов с использованием детекторов из  $^{139}\text{La}$ , облучаемых нейтронами, генерируемыми в свинцовой мишени протонным пучком с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ.
- 4)- Экспериментальных значений скорости реакции образования  $^{140}\text{La}$  B( $^{140}\text{La}$ ), в детекторах из  $^{139}\text{La}$ , облучаемых нейтронами, которые генерируются в свинцовой и уран-свинцовой мишенях протонным пучком с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ, включая:
  - а- радиальное и азимутальное распределения экспериментальных значений B-величин.

- б- распределение экспериментальных значений  $B$ -величин на поверхности парафинового замедлителя.
- 5)- Экспериментальных значений скорости накопления осколков деления при облучении нейтронами, генерируемыми в свинцовой или уран-свинцовой мишенях, которые облучаются пучками протонов с энергией 0.53 или 1.0 ГэВ.

## Цель исследований

Целью исследований, предпринятых в рамках настоящей работы, является:

- 1)-Исследование экспериментальных значений скорости накопления  $^{140}\text{La}$   $B(^{140}\text{La})$  в лантановых детекторах при облучении нейтронами, генерируемыми при бомбардировке свинцовой и уран-свинцовой мишеней пучками протонов с энергией 0.53 или 1.0 ГэВ.
- I-Распределение  $B(^{140}\text{La})$  для лантановых детекторов, размещаемых в различных положениях на поверхности парафинового замедлителя.
- II-Азимутальное распределение экспериментальных значений скоростей накопления нуклидов ( $B$ -величин) в детекторах на поверхности парафинового замедлителя на расстоянии 15 см от переднего торца парафинового замедлителя.
- III-Радиальное распределение величин  $B$  по глубине парафинового замедлителя (на расстоянии 4.5, 6.5, 8.5 и 9.7 см от оси симметрии мишени).
- 2)-Исследование влияния толщины замедлителя на величину экспериментальных значений скорости накопления  $^{140}\text{La}$   $B(^{140}\text{La})$  в лантановых детекторах при облучении нейтронами, генерируемыми при облучении свинцовой мишени пучками протонов с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ.
- 3)-Моделирование с использованием метода Монте-Карло влияния толщины замедлителя на величину экспериментальных значений скорости накопления  $^{140}\text{La}$   $B(^{140}\text{La})$  в лантановых детекторах при облучении нейтронами, генерируемыми при бомбардировке свинцовой мишени пучками протонов с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ.
- 4)-Моделирование методом Монте-Карло с использованием программы DCM-SEM спектров нейтронов, генерируемых в мишенях протонными пучками с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ на различной глубине парафинового замедлителя.
- 5)-Исследование трансмутации некоторых долгоживущих радиоактивных образцов с использованием нейтронов, генерируемых в массивных мишенях протонными пучками различной энергии.
- I-Трансмутация  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$  при облучении уран-свинцовой мишени протонами с энергией 0.5 или 1.0 ГэВ и при облучении свинцовой мишени протонами с энергией 1.0 ГэВ.

II-Трансмутация  $^{239}\text{Pu}$  с использованием нейтронов, генерируемых в свинцовой мишени релятивистскими протонами с энергией 0.53 и 1.0 ГэВ.

б)-Экспериментальное определение значений  $B$ -величин в пересчете на единицу энергии налетающего протона для каждого образца

$$R = \frac{B - \text{величина}}{E_p (\text{энергия протонов})} \quad (2)$$

### Публикации

Результаты, используемые в данной диссертационной работе, опубликованы в 6 печатных работах.

### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях и семинарах:

- 1). 5<sup>th</sup> Conference for Young Scientist and Specialists (4-10 Feb., 2001, Dubna, Russia).
- 2). XVI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems (10-15 June, 2002, Dubna, Russia).
- 3). VII International School-Seminar for Heavy Ion Physics (May 27-June 1, 2002, Dubna, Russia).
- 4). 3<sup>rd</sup> Conference on Nuclear and Particle Physics (20-24 Oct., 2001, Cairo, Egypt)

**Практическая ценность работы** определяется тем, что ее результаты могут быть использованы:

- при формировании библиотек ядерно-физических данных, необходимых для создания прототипов электроядерных установок и трансмутаторов радиоактивных отходов;
- для проверки и усовершенствования компьютерных программ, используемых для расчетов электроядерных процессов и параметров экспериментальных установок;
- при планировании новых экспериментов по трансмутационной тематике на пучках ускорителей высоких энергий.

### Содержание диссертации

Глава 1 содержит введение в проблематику, имеющую отношение к исследуемой теме, и обзор результатов исследований, предпринятых ранее, а также цели и задачи экспериментальных исследований в рамках настоящей диссертационной работы. В этой главе обсуждаются основные эксперименты по исследованию трансмутации радиоактивных отходов, проведенные в различных научных центрах. Показано место, которое занимают исследования проблемы трансмутации радиоактивных отходов, выполняемые в ОИЯИ.

Перечислены основные результаты, которые предполагается получить в рамках данной диссертационной работы.

**Глава 2.** В этой главе обсуждается компоновка экспериментальной установки Гамма-2. Эта установка состоит из массивной свинцовой или уран-свинцовой мишени, окруженной слоем парафинового замедлителя ( $\text{CH}_2$ ) толщиной 6 см [Н1].

**I-Свинцовая мишень.** Установка включает мишень, состоящую из 20 свинцовых дисков, каждый из которых имеет диаметр 8 см и толщину 1 см.

**II-Уран-свинцовая мишень:** Экспериментальная установка, включающая уран-свинцовую мишень, состоит из двух урановых стержней в алюминиевой оболочке, имеющей наружный диаметр 3.6 см и длину 10.4 см; урановые стержни помещены внутрь 21 кольца из свинца, имеющих толщину 1 см, внутренний диаметр 3.6 см и наружный диаметр 8 см. Для определения интегрального флюенса протонов использовалась активационная методика; поляроидные пленки использовались для определения положения и размеров пучка протонов. Эти параметры имеют важное значение при определении экспериментальных скоростей процессов и реакций (В-величин).

Глава 2 состоит из двух разделов. В разделе А обсуждаются результаты экспериментов, проведенных в ноябре 1999 года. В этих облучениях использовались два набора мониторов для измерения флюенса протонов. Каждый набор мониторов состоит из тонкой фольги, изготовленной из чистого алюминия, которая помещена между слоями, образованными двумя другими алюминиевыми фольгами такого же диаметра. Первая группа мониторов (монитор 1) располагается в плотном контакте с мишенью, а вторая группа (монитор 2) установлена перед мишенью на расстоянии 35 см [Н1].

В разделе В обсуждаются эксперименты, проведенные в ноябре 2001г. В этих облучениях использовалась только одна группа мониторов из  $^{27}\text{Al}$  диаметром 20 см, которая была размещена на расстоянии 85см [Н2]. Монитор из  $^{27}\text{Al}$  фольги был впоследствии разрезан на несколько колец, затем проводилось измерение активности изотопа  $^{24}\text{Na}$  в этих кольцах.

Для исследования распределения нейтронов в объеме замедлителя (это распределение приблизительно пропорционально экспериментальному распределению значений скоростей реакций в используемых детекторах), для различных мишеней и при различной энергии протонов использовались активационные детекторы ( $^{139}\text{La}$  и/или естественный уран).

В экспериментах, проведенных в ноябре 1999 года, детекторы из  $^{139}\text{La}$  и  $^{\text{nat}}\text{U}$  использовались для исследования поверхностного, радиального и азимутального распределений потока вторичных нейтронов [Н1].

**I-Детекторы из естественного урана:** Пять детекторов из природного урана располагались в один ряд вдоль образующей на поверхности парафинового замедлителя под углом  $20^\circ$  к вертикальной плоскости.



## II-Детекторы из $^{139}\text{La}$ :

- А- Пять детекторов из  $^{139}\text{La}$  под номерами 1, 2, 3, 4 и 5 располагались на поверхности парафинового замедлителя под углом  $90^\circ$  к горизонтальной плоскости.
- В- Четыре детектора из  $^{139}\text{La}$  под номерами 16, 17, 18 и 3 располагались внутри парафинового замедлителя на различном удалении от оси симметрии мишени (значения радиуса 4.5, 6.5, 8.5 и 9.7 см) на расстоянии 15 см от переднего торца парафинового замедлителя.
- С- Шесть детекторов из  $^{139}\text{La}$  под номерами 3, 6, 7, 8, 9 и 10 устанавливались вокруг парафина на расстоянии 15 см от переднего торца замедлителя под углом  $60^\circ$  друг от друга. Вертикальное сечение установки показано на рис.1 с указанием расположения детекторов.

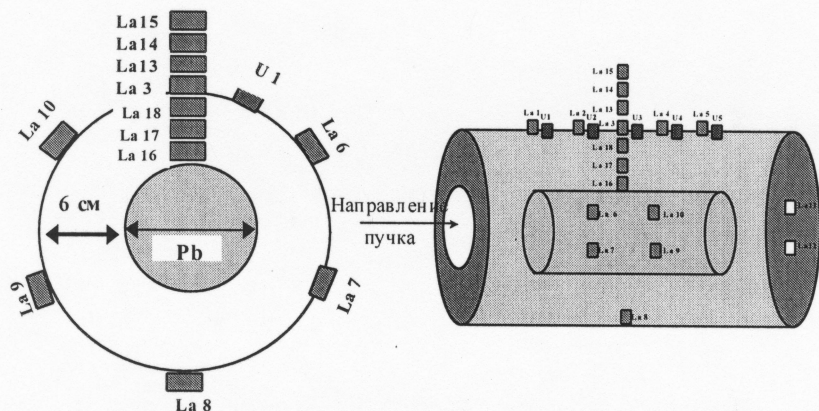


Рис. 1 Вертикальное сечение (фронтальный и боковой вид) экспериментальной установки Гамма-2 с указанием расположения U и La детекторов в экспериментах, проведенных в ноябре 1999 года

Во время экспериментов 2001 года были применены новые компоновки детекторов из  $^{139}\text{La}$  для исследования влияния толщины замедлителя на формирование потоков нейтронов в свинцовой мишени, облучаемой протонами различной энергией, и в замедлителе [H2, H3].

I- Десять детекторов из  $^{139}\text{La}$  устанавливались на поверхности замедлителя:

- А- Пять детекторов из  $^{139}\text{La}$  под номерами 1, 2, 3, 4 и 5 располагались на глубине 0 мм, то есть на поверхности парафина.

**В-** Пять детекторов из  $^{139}\text{La}$  под номерами 6, 7, 8, 9 и 10 были разделены на две группы: первая группа состояла из трех детекторов под номерами 6, 8 и 10 и размещалась на глубине 10 мм. Вторая группа состояла из двух образцов под номерами 7 и 9 и размещалась на глубине 20 мм.

Один из  $^{139}\text{La}$  детекторов номер 11 был упакован в пластмассовый контейнер с внутренним диаметром 21 мм. Экспериментальная установка Гамма-2 применялась для исследования трансмутации образцов радиоактивных отходов  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и делящегося изотопа  $^{239}\text{Pu}$ . Каждый образец был упакован в алюминиевый контейнер и размещен вместе с La образцом под номером 11 на поверхности парафинового замедлителя на расстоянии 12 см от переднего торца замедлителя, как это показано на рис.2 [Н1].

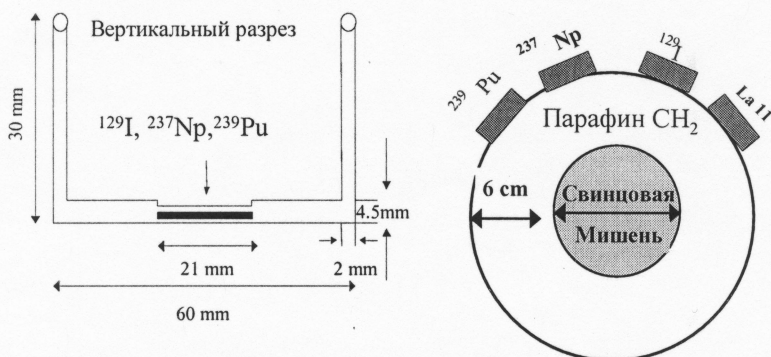


Рис. 2. Конструкция алюминиевого контейнера, используемого для упаковки образцов  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{129}\text{I}$  и схема размещения трансмутационных образцов

**В главе 3** обсуждаются следующие вопросы:

**1-Экспериментальное определение интегрального флюенса протонов с помощью активационных фольг.**

Активация фольг ( $^{27}\text{Al}$ ) является хорошо известным методом, используемым для определения флюенса высокоэнергетического протонного пучка. Релятивистские протоны взаимодействуют с  $^{27}\text{Al}$  фольгами посредством следующих реакций<sup>3</sup>:  $^{27}\text{Al}(n,3pn)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p,X)^{22}\text{Na}$  и  $^{27}\text{Al}(p,X)^7\text{Be}$ . Эти три реакции имеют большое значение сечения

<sup>3</sup> J.S.Wan et al., NIM, B155 (1999), p.110 and JINR-Preprint E13-99-189, Dubna (1999)

взаимодействия с протонами, продукты этих реакций -  $^{24}\text{Na}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$  характеризуются приемлемыми периодами полураспада и гамма линиями с высокой интенсивностью на распад. Алюминиевые фольги устанавливаются перед мишенью. После окончания облучения активационной фольги проводится измерение ее гамма-активности с помощью HPGe детектора. Гамма кванты, испускаемые  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и  $^7\text{Be}$  измеряются с использованием детектирующей системы на основе германиевых детекторов высокой чистоты в течение длительного времени для получения гамма спектров с достаточной статистической точностью. Затем определяется интегральный флюенс протонов с помощью хорошо известного выражения.

## **2-Взаимодействие нейтронов с $^{139}\text{La}$ , природным ураном, $^{129}\text{I}$ , $^{238}\text{Np}$ и $^{239}\text{Pu}$ .**

В данной работе используются два типа активационных детекторов (естественный уран и лантан) для измерения пространственного распределения нейтронов на поверхности парафинового замедлителя. Нейтроны взаимодействуют со стабильными ядрами  $^{139}\text{La}$  посредством радиационного захвата, в то время как нейтроны взаимодействуют с ядрами естественного урана посредством реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, 2n)$  и  $(n, f)$  в зависимости от энергии налетающего нейтрона.

В диссертационной работе исследуется трансмутация следующих трех радиоактивных отходов:  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$ .

I- Нейтроны взаимодействуют с ядрами  $^{129}\text{I}$  посредством радиационного захвата, при этом образуются ядра короткоживущего изотопа  $^{130}\text{I}$ .

II- Вторым образцом исследуемых радиоактивных отходов является  $^{237}\text{Np}$ , превращающийся в  $^{238}\text{Np}$  в результате радиационного захвата нейтрона.

III- Наиболее приемлемым способом трансмутировать ядра  $^{239}\text{Pu}$  является процесс деления.

**3. Определение экспериментальных значений скорости трансмутации (накопления).** После завершения облучения (в течение периода примерно от одной недели до десяти дней) активность каждого образца измерялась несколько раз. Затем определялись экспериментальные значения скорости трансмутации (накопления) исследуемого нуклида.

**В Главе 4** приводятся результаты экспериментов, проведенных в ноябре 1999г. и ноябре 2001 г.

**1-Измерения гамма спектров:** Для измерения гамма спектров облученных образцов были использованы несколько полупроводниковых детекторов. Каждый образец измеряется несколько раз в течении 10 дней. Исследование трансмутации долгоживущих радиоактивных изотопов, включающих  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$  выполнялось следующим образом: образцы облучались совместно на поверхности замедлителя, затем активность каждого образца измерялась с использованием трех HPGe детекторов с разными фильтрами.

**2-Эффективность регистрации:** Кривая эффективности измерялась для каждого детектора с помощью источника  $^{152}\text{Eu}$  в условиях, при которых были проведены измерения гамма активности образцов и детекторов.

**3-Определение положения и размера пучка.** Для экспериментального определения относительного положения протонного пучка и первичной мишени применялись поляроидные пленки, которые облучаются несколькими импульсами этого пучка.

**4- Определение интегрального флюенса протонов с использованием активационных фольг.**

Интегральные флюенсы протонов вычисляются с использованием реакции  $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$ .

**5-Определение экспериментальных значений скорости накопления  $^{140}\text{La}$ , продуктов деления и  $^{239}\text{Np}$  (В-величин).**

Для того, чтобы изучить пространственное распределение нейтронов в различных местах экспериментальной установки Гамма-2 для различных мишеней и при различных значениях энергии протонов, в работе определялись экспериментальные значения скоростей ядерных реакций (В-величины), протекающих в активационных детекторах из  $^{139}\text{La}$  и природного урана.

**I-** Распределение соответствующих В-величин на поверхности парафинового замедлителя с использованием La детекторов показано на рис.3.

**II-** Распределение нейтронов на поверхности парафинового замедлителя с использованием детекторов из природного урана. Детекторы из урана измерялись не менее трех раз в течение одной недели. После этого производилось определение периода полураспада каждого фрагмента. Экспериментальные значения образования продуктов деления  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{133}\text{I}$  и  $^{239}\text{Np}$  измерялись на расстоянии 5, 10, 15, 20 и 25 см от переднего торца парафинового замедлителя. Результаты приводятся в таблице 1а, b, c, d [H4, H6] (значения В-величин в нижеприведенных таблицах и на рисунках даются в атомах/г/протон).

**Таблица 1а.** Скорость образования  $^{239}\text{Np}$  в различных положениях детекторов на поверхности парафинового замедлителя

Положение детектора Z(см)	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$
5	6.15±0.72	3.42±0.39	10.70±1.40	4.57±0.61
10	7.58±1.02	4.69±0.53	13.40±1.76	6.43±0.85
15	6.31±0.86	4.22±0.55	11.50±1.28	6.59±0.87
20	4.65±0.63	3.16±0.51	8.66±1.12	5.00±0.68
25	2.36±0.32	1.72±0.20	4.57±0.59	3.05±0.42

**Таблица 1b** Скорость образования  $^{133}\text{I}$  в различных положениях детектора на поверхности парафинового замедлителя

Положение детектора Z(см)	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$
5	2.31±0.19	1.31±0.10	3.64±0.3	1.62±0.14
10	2.39±0.22	1.66±0.12	4.36±0.37	2.21±0.19
15	2.16±0.20	1.39±0.12	3.90±0.27	2.21±0.19
20	1.75±0.16	1.37±0.15	2.94±0.24	1.65±0.15
25	1.01±0.10	0.90±0.10	1.85±0.15	1.11±0.10

**Таблица 1c** Скорость образования  $^{91}\text{Sr}$  в различных положениях детектора на поверхности парафинового замедлителя

Положение детектора Z(см)	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$
5	2.00±0.29	0.94±0.12	2.76±0.37	1.34±0.19
10	2.29±0.32	1.49±0.19	3.46±0.49	1.61±0.21
15	1.96±0.28	-----	2.89±0.35	1.97±0.25
20	1.44±0.20	-----	2.12±0.26	1.36±0.22
25	0.87±0.13	1.21±0.16	1.29±0.16	0.91±0.15

**Таблица 1d** Скорость образования  $^{97}\text{Zr}$  в различных положениях детектора на поверхности парафинового замедлителя

Положение Детектора Z(см)	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-6}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (Pb)* $10^{-6}$
5	1.98±0.15	0.93±0.06	2.93±0.22	1.23±0.10
10	2.58±0.22	1.34±0.09	3.34±0.26	1.75±0.14
15	2.01±0.17	1.18±0.10	3.14±0.20	1.90±0.15
20	1.61±0.14	0.85±0.09	2.12±0.16	1.39±0.12
25	0.93±0.08	0.74±0.06	1.42±0.11	0.98±0.08

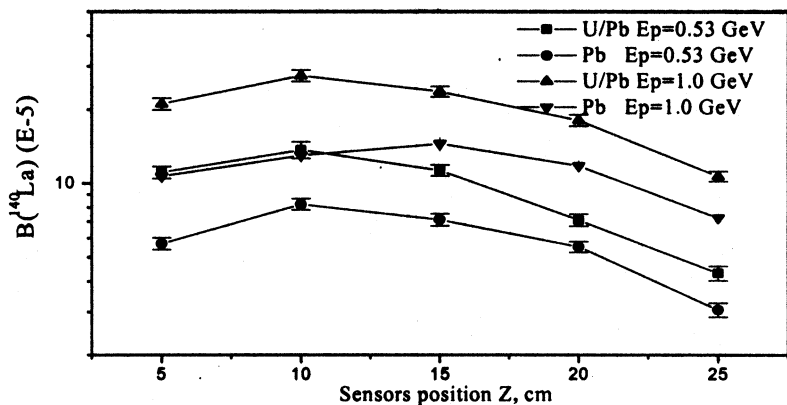


Рис.3. Экспериментальное значение скорости накопления  $^{140}\text{La}$  в La детекторах для различных энергий протонов и различных мишеней

III-Результаты измерений радиального распределения B-величин в парафиновом замедлителе показаны на рис.4 [Н1].

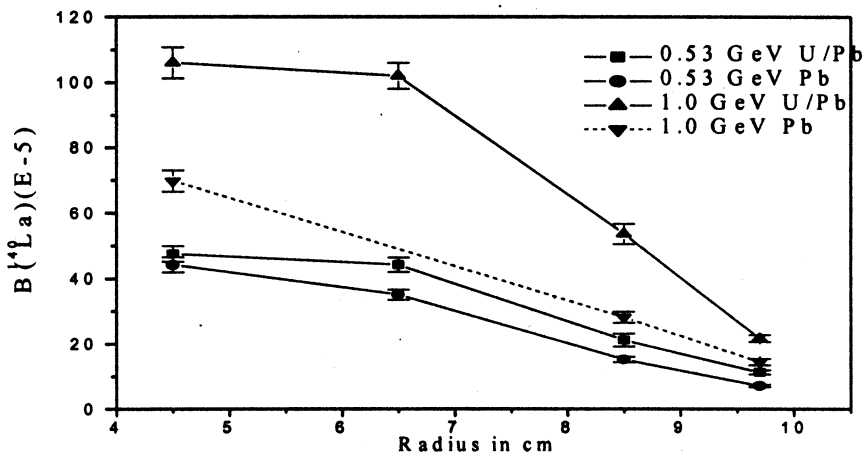


Рис.4. Экспериментальное значение скорости накопления  $^{140}\text{La}$  в La детекторах как функция радиуса при энергии протонов 0.53 и 1.0 ГэВ в Pb и U/Pb мишенях

IV- Азимутальное распределение нейтронов на поверхности парафинового замедлителя исследовалось с помощью шести La детекторов под номерами 3, 6, 7, 8, 9 и 10. Экспериментальные результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2** Азимутальное распределение экспериментальных значений скорости накопления В(<sup>140</sup>La) на поверхности парафинового замедлителя при различных энергиях протонов и различных материалах мишени [H1]

Положение детектора	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (U/Pb)* $10^{-5}$	$E_p=0.53 \text{ GeV}$ (Pb) * $10^{-5}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (U/Pb) * $10^{-5}$	$E_p=1.0 \text{ GeV}$ (Pb) * $10^{-5}$
3 (0°)	11.3 ±0.60	7.11±0.40	21.7±1.06	14.4±0.98
6 (60°)	10.5±4.0	9.08±0.43	23.9±2.34	12.7±1.07
7 (120°)	13.7±0.60	7.20±0.39	21.5±1.03	17.0±1.08
8 (180°)	14.3 ±0.82	10.6±0.46	34.9±2.58	18.9±0.87
9 (240°)	10.9±0.57	8.61±0.53	29.5±1.50	10.6±0.44
10 (300°)	12.5±0.50	7.46±0.38	21.9±1.05	13.6±0.63

V-В этом разделе приводятся расчетные и экспериментальные результаты по определению влияния толщины замедлителя на характеристики потоков нейтронов из свинцовой мишени при различной энергии протонного пучка:

A-Экспериментальные исследования проводились с помощью <sup>139</sup>La детекторов, установленных на различной глубине внутри парафинового замедлителя [H2].

B- Моделирование ядерно – физических процессов проводилось с использованием программы LANET<sup>4</sup>.

**Таблица 3** Экспериментальные значения скорости накопления В(<sup>140</sup>La) в лантановых детекторах при энергии протонов 0.65 ГэВ по сравнению с расчетными значениями, полученными с помощью программы LANET [H2]

Положение детекторов (см)		Эксперимент (B±ΔB)* $10^{-5}$	Вычисления (B±ΔB)* $10^{-5}$
Глубина погружения	Положение (Z)		
0	5.2	2.12±0.13	3.17 ± 0.24
0	10.15	3.16±0.20	4.83 ± 0.34
0	15	3.13±0.19	4.42 ± 0.25
0	19.8	2.55±0.20	3.57 ± 0.25
0	24.75	1.37±0.20	2.23 ± 0.21

<sup>4</sup> R.E.Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LANET Code System", Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-89-3014 (Sept, 1989)

0.79	5.2	4.44±0.28	4.96 ± 0.31
1.0	10	-----	9.93±0.60
0.88	15	7.86±0.50	10.11 ± 0.42
1.0	20	-----	7.88±0.48
0.85	24.75	2.70±0.17	4.52 ± 0.32
2.0	5	-----	16.73±1.17
1.44	10.15	14.7±0.9	15.52 ± 0.59
2.0	15	-----	24.49±0.98
1.6	19.8	11.74±0.7	13.7 ± 0.56
2.0	25	-----	11.87±0.59

**6- Моделирование нейтронных спектров, генерируемых в свинцовой мишени с парафиновым замедлителем.** В диссертации моделирование производилось с помощью метода Монте-Карло и программы DCM-CEM<sup>5</sup> [Н5]. Обычно скорость, с которой можно трансмутировать радиоактивные отходы, весьма сильно зависит от спектра нейтронов. Трансмутацию осколков деления необходимо производить в интенсивных полях тепловых нейтронов, а некоторые изотопы (актиниды) могут быть эффективно трансмутированы быстрыми нейтронами. Очевидно, жесткость нейтронного спектра изменяется по мере удаления от оси симметрии мишени. В проведенных экспериментах исследовался поток тепловых нейтронов в пяти точках, значения координат которых указаны на стр.10.

Для того, чтобы проанализировать формирование нейтронного спектра внутри мишени и замедлителя, было проведено компьютерное моделирование ядерно-физических процессов. Нейтронные спектры, генерируемые в свинцовой мишени с парафиновым замедлителем, которая облучается протонами с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ, вычислялись в нескольких точках по глубине парафинового замедлителя 0, 1 и 2 см, которые соответствовали расположению детекторов, с помощью метода Монте-Карло и с использованием программы DCM-CEM. Результаты вычислений показаны на рис.5 [Н5].

Из рис.5 видно, что распределение нейтронного потока на поверхности замедлителя вдоль оси мишени имеет «плоский» максимум, расположенный в интервале 10 – 15 см от торца парафина. Максимальная величина нейтронного потока превышает значения на периферии замедлителя в 1.5 – 2.0 раза. Жесткость спектра практически не зависит от положения детектора на поверхности замедлителя при его смещении вдоль оси пучка.

<sup>5</sup> A.Polanski, A.N.Sosnin, V.D.Toneev. JINR Preprint E2-91-562, Dubna, 1991.



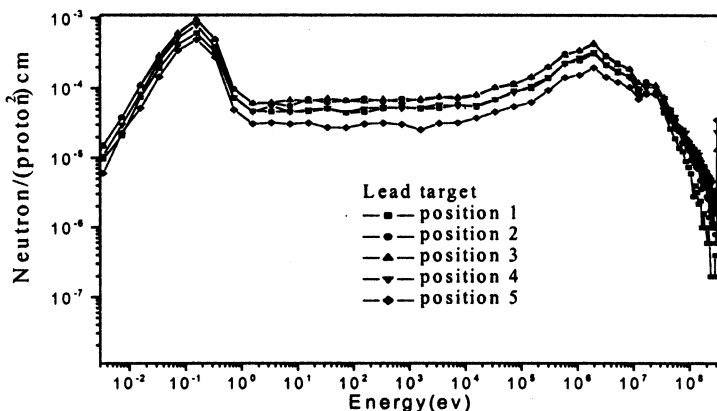


Рис.5. Расчетные спектры нейтронов в различных положениях на поверхности парафинового замедлителя при облучении протонами с энергией 1.5 ГэВ

### Трансмутация делящегося $^{239}\text{Pu}$ и радиоактивных отходов $^{129}\text{I}$ и $^{237}\text{Np}$ нейтронами

I- Исследование выжигания  $^{239}\text{Pu}$  проводилось на ускорительном комплексе синхрофазотрон-нуклотрон ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) с использованием протонных пучков с энергией 0.53 и 1.0 ГэВ, облучающих свинцовую мишень с парафиновым замедлителем. В данной работе изучались трансмутация  $^{239}\text{Pu}$  и сопутствующее образование осколков деления  $^{91}\text{Sr}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{105}\text{Ru}$ ,  $^{129}\text{Sb}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$  и  $^{143}\text{Ce}$ . Измерялся период полураспада для каждого из осколков деления и определялись экспериментальные значения скорости выжигания  $^{239}\text{Pu}$  и скорости накопления осколков деления  $^{239}\text{Pu}$ . Результаты экспериментов по определению скорости деления  $^{239}\text{Pu}$  по выходу осколков деления показаны на рис.6 и обобщены в табл.4 [Н1].

II- Трансмутация  $^{237}\text{Np}$  исследовалась посредством измерения выхода  $^{238}\text{Np}$  в реакции захвата нейтронов  $^{237}\text{Np}(n, \gamma) ^{238}\text{Np}$ . Эксперимент проводился с мишенями из U/Pb и Pb при разных энергиях пучка протонов. После облучения измерение спектров гамма-квантов проводилось несколько раз; затем определялись значение периода полураспада  $^{238}\text{Np}$  и величина  $B(^{238}\text{Np})$ . Результаты этих экспериментов приведены в табл. 4 [Н1].

III-Исследование трансмутации  $^{129}\text{I}$  производилось посредством измерения выхода  $^{130}\text{I}$  в реакции радиационного захвата нейтронов  $^{129}\text{I}(n, \gamma) ^{130}\text{I}$  с использованием установки с U/Pb и Pb мишенями, облучаемыми протонными пучками с разной энергией. Из экспериментальных данных были определены кривая распада и значение  $B(^{130}\text{I})$ . Эти результаты показаны в табл. 4 [Н1].

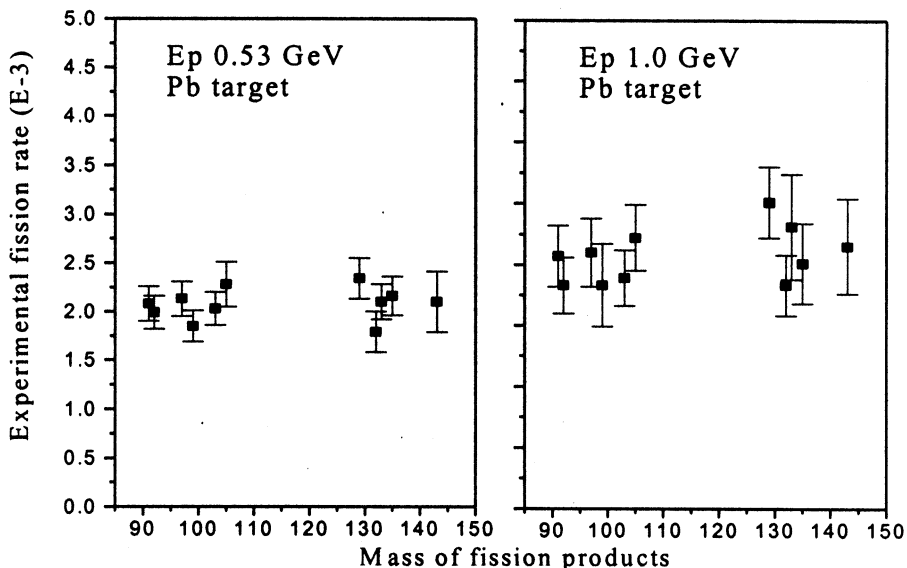


Рис.6. Скорости деления  $V(^{239}\text{Pu})$ , определенные для различных осколков деления в эксперименте по облучению свинцовой мишени при энергии протонного пучка 0.53 и 1.0 ГэВ

Таблица 4 Экспериментальные значения скорости накопления  $V(^{238}\text{Np})$ ,  $V(^{130}\text{I})$  и скорости деления  $V(^{239}\text{Pu})$  [H1] и их отношения к энергии налетающих протонов (R) (см. формулу (2))

Эксперимент p+ мишень	$V(^{238}\text{Np})$ $\cdot 10^{-4}$	$R(^{238}\text{Np})$ $\cdot 10^{-4}$	$V(^{130}\text{I})$ $\cdot 10^{-4}$	$R(^{130}\text{I})$ $\cdot 10^{-4}$	$V(^{239}\text{Pu})$ $\cdot 10^{-3}$	$R(^{239}\text{Pu})$ $\cdot 10^{-3}$
0.53 GeV U/Pb	3.1	6.2	1.30	2.60	----	----
0.53 GeV Pb	----	----	----	----	$2.08 \pm 0.20$	$3.9 \pm 0.4$
1.0 GeV U/Pb	4.8	4.8	2.61	2.61	----	----
1.0 GeV Pb	3.3	3.3	0.81	0.81	$3.07 \pm 0.31$	$3.1 \pm 0.4$

### Заключение

В диссертационной работе исследованы параметры экспериментальной установки «Гамма-2» с применением активационных детекторов ( $^{139}\text{La}$  и природный уран). Эти параметры включают влияние различных материалов мишени при различной энергии протонов. Экспериментальные значения скорости накопления  $^{140}\text{La}$  и осколков деления

урана ( $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{133}\text{I}$  и  $^{91}\text{Sr}$ ) и  $^{239}\text{Np}$  определены для различных мишеней, положений образцов на мишени и протонных энергий. При этом проводились исследования трансмутации  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$  с использованием мишеней из Pb и U/Pb, облучаемых протонами при различных энергиях. Получены следующие результаты:

I- Два материала мишеней исследовались при энергии протонов 0.53 и 1.0 ГэВ посредством определения экспериментальных значений скорости накопления  $\text{B}(^{140}\text{La})$  в образцах из  $^{139}\text{La}$  и  $\text{B}(^{97}\text{Zr})$ ,  $\text{B}(^{133}\text{I})$ ,  $\text{B}(^{91}\text{Sr})$  и  $\text{B}(^{239}\text{Np})$  в образцах из  $^{\text{nat}}\text{U}$ . Анализ полученных экспериментальных данных показывает следующее:

а) Для детекторов, размещенных на поверхности замедлителя (пять детекторов из  $^{139}\text{La}$  и пять детекторов из урана; см. рис.1), полученные экспериментальные значения скорости накопления (B-величины) имеют при данной энергии более высокое значение (примерно на 60 - 70%) в случае U/Pb мишени по сравнению с Pb мишенью.

б) При данных энергии протонов и материале мишени максимальная скорость накопления наблюдается в интервале между 10 и 15 см от передней плоскости парафинового замедлителя.

с) Для данной мишени экспериментальная скорость накопления  $\text{B}(^{140}\text{La})$  возрастает с ростом энергии протонов. Для обеих мишеней из U/Pb и Pb экспериментальные значения скорости накопления имеют на  $(100\pm 10)\%$  большую величину для энергии протонов 1.0 ГэВ по сравнению с 0.53 ГэВ.

II- Детекторы из La использовались для исследования зависимости нейтронного потока от глубины в парафиновом замедлителе при различной энергии протонов в U/Pb и Pb мишенях. Были использованы две конфигурации размещения детекторов:

1) Детекторы из  $^{139}\text{La}$  устанавливались в положениях с различными значениями радиуса (4.5, 6.5, 8.5 и 9.7 см) внутри парафина на расстоянии 15 см от переднего торца замедлителя для U/Pb и Pb мишеней при энергии протонов 0.53 и 1.0 ГэВ.

2) Десять лантановых детекторов устанавливались на расстоянии 0, 10 и 20 мм (см табл.3.) внутри парафинового замедлителя. Нейтроны, генерируемые в Pb мишени протонными пучками с энергией 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ, активируют лантановые детекторы. Значения  $\text{B}(^{140}\text{La})$  в данном пространственном положении резко возрастают по мере увеличения глубины, на которой размещены лантановые детекторы. Этот результат показывает, что соответствующий поток низкоэнергетических нейтронов, который вызывает накопление  $^{140}\text{La}$ , сильно возрастает по мере погружения в парафин:

а- При всех энергиях протонов величины  $\text{B}(^{140}\text{La})$  имеют в 4-6 раз большие значения на глубине 45 мм по сравнению со значениями на поверхности парафинового замедлителя.

б- При всех энергиях протонов величины  $\text{B}(^{140}\text{La})$  имеют в 3-3.6 раза большие значения на глубине 20 мм по сравнению со значениями на поверхности парафинового замедлителя.

с- При всех энергиях протонов величины  $B(^{140}\text{La})$  имеют в 2-3 раза большие значения на глубине 10 мм по сравнению со значениями на поверхности парафинового замедлителя.

III-Моделирование методом Монте-Карло с использованием программы LANET (см. ссылку на стр. 13) было проведено для тех же значений глубины погружения детекторов в парафин и при фиксированной энергии протонного пучка, падающего на свинцовую мишень. Результаты этих исследований показали вполне удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными значениями  $B(^{140}\text{La})$ . Следует отметить, что при всех энергиях протонов расчетные значения оказываются немного больше по сравнению с экспериментальными значениями.

IV-Трансмутация долгоживущих радиоактивных отходов  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$  и делящегося изотопа  $^{239}\text{Pu}$ .

1-Образцы  $^{129}\text{I}$  и  $^{237}\text{Np}$  трансмутировались с использованием вторичных нейтронов, генерируемых во взаимодействиях протонных пучков при энергии 0.53, 1.0 GeV с мишенью из U/Pb и 1.ГэВ с мишенью из Pb:

а- Из облучений  $^{129}\text{I}$  вычисленные значения  $B(^{130}\text{I})$  оказались равными  $1.30 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон) и  $2.61 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон) при энергии протонов 0.5 и 1.0 ГэВ с использованием мишени из U/Pb и  $0.81 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон) при энергии протонов 1.0 ГэВ с мишенью из Pb.

б- Из облучений  $^{237}\text{Np}$  вычисленные значения  $B(^{238}\text{Np})$  оказались равными  $3.1 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон),  $4.8 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон) при энергии протонов 0.5 и 1.0 ГэВ с использованием мишени из U/Pb и  $3.3 \cdot 10^{-4}$  (ат./г/протон) при энергии протонов 1.0 ГэВ с мишенью из Pb.

2-Трансмутация  $^{239}\text{Pu}$  производилась нейтронами, генерируемыми в Pb мишени при взаимодействии с протонными пучками при энергии 0.53 и 1.0 ГэВ. Экспериментальные значения скорости выгорания  $^{239}\text{Pu}$  измерялись по выходам нескольких осколков деления, затем вычислялась полная скорость выгорания  $B(^{239}\text{Pu})$  с помощью известных значений выходов реакции деления. Скорость деления оказалась равной  $2.08 \cdot 10^{-3}$  (ат./г/протон) и  $3.07 \cdot 10^{-3}$  (ат./г/протон) при энергии протонов 0.53 и 1.0 GeV соответственно.

Из табл. 4 можно вычислить значения скорости трансмутации образцов долгоживущих радиоактивных нуклидов массой 1г с использованием свинцовой мишени, облучаемой протонным пучком с энергией 1 ГэВ и током пучка 10 мА. В предположении, что условия облучения остаются неизменными и подобными условиям нашего эксперимента, скорости трансмутации исследуемых нуклидов будут иметь следующие значения:

6.7 мг  $^{239}\text{Pu}$  трансмутируются за одни сутки (0.7%),

21 мг  $^{237}\text{Np}$  трансмутируются за один месяц (2.1%),

3 мг  $^{129}\text{I}$  трансмутируются за один месяц (0.3%).

Любая практическая трансмутационная установка, использующая протонный пучок с энергией 1 ГэВ и током 10мА, должна иметь значительно

более сложную конструкцию для эффективного использования 10 МА протонного пучка.

V- Нейтронные спектры на глубине парафинового замедлителя 0, 10 и 20 см были вычислены с использованием метода Монте-Карло и программы DCM-SEM (см. ссылку на стр. 14) для свинцовой мишени при энергии протонов 0.65, 1.0 и 1.5 ГэВ соответственно:

1- Плотность потока нейтронов возрастает с ростом глубины погружения в 1.5 раза при изменении энергии от 0.65 до 1.0 ГэВ и в 1.4 раза при изменении энергии с 1.0 до 1.5 ГэВ, что подтверждается экспериментальными значениями величины В.

2- При данной энергии и глубине погружения плотность потока нейтронов имеет «плоский» максимум в интервале 10 - 15 см от переднего торца парафинового замедлителя.

## Результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- H1) J.Adam, J.C. Adloff, A. Balabekyan, V.P. Bamblevski, M. Yu. Barabanov, R. Brandt, V. Bradnova, P. Chaloun, M. Debeauvais, K.K. Dwivedi, S.-L. Guo, S.R. Hashemi-Nezhad, Kh.M. Hella, V.G. Kalinnikov, M.K. Kievets, M.I. Krivopustov, B.A. Kulakov, E.-J. Langrock, Li Li, E.M. Lomonosova, G. Modolo, R. Odoj, V.P. Perelygin, V.S. Pronskikh, A.A. Solnyshkin, A.N. Sosnin, V.I. Stegailov, V.M. Tsoupko-Sitnikov, P. Vater, J.-S. Wan, W. Westmeier, M. Zamani-Valasiadou, I.V. Zhuk. "Transmutation of  $^{239}\text{Pu}$  and other Nuclides using Spallation Neutrons Produced by Relativistic Protons Reacting with Massive U- and Pb-Target", Radiochemica Acta, 90 (2002) 431-442 and JINR-Preprint E1-2001-136, Dubna, 2001.
- H2) J.Adam, M.Yu.Barabanov, V.Bradnova, R.Brandt, P. Chaloun, Kh.M.Hella, S.R.Hashemi-Nazhad, V.G.Kalinnikov, V.A.Krasnov, M.I.Krivopustov, B.A.Kulakov, V.S.Pronskikh, H. Robotham, A.A. Solnyshkin, A.N.Sosnin, V.I.Stegailov, M.Tsoupko-Sitnikov and W.Westmeier, "Spatial Distribution of Neutrons in Paraffin Moderators Surrounding a Lead Target Irradiated with Protons at Intermediate Energies", submitted to Kerntechnik and JINR-Preprint E1-2002-233, Dubna, 2002.
- H3) B.Slowinski, A.I.Malakhov, Kh.M.Hella, M.N.Comsan, "Transmutation of Radioactive Nuclides: Basic Concepts and Results", Proc. of 3rd Conference on Nuclear and Particle Physics (20-24 Oct., 2001, Cairo, Egypt), pp. 40-46 and Annual report for institute of atomic energy- Otwock-Swierk-Poland (2001), pp.117-120
- H4) Kh.M.Hella, B.A.Kulakov and M. Yu Barabanov, Analysis of Neutron Yield in Transmutation Experiments with Different Proton Energies and Targets using Natural Uranium and  $^{139}\text{La}$  Sensors, Proc. of 5<sup>th</sup> conference for Young Scientist and Specialists, (4-10 Feb., 2001, Dubna, Russia ), pp.170-172.

- H5) J.Adam, M.Yu.Barabanov, V.Bradnova, R.Brandt, Kh.M.Hella, S.R. Hashemi-Nezhad, V.G.Kalinnikov, V.A.Krasnov, M.I.Krivopustov, B.A.Kulakov V.S.Pronskih, H.Robotham, A.A.Solnyshkin, A.N.Sosnin, V.I.Stegailov, V.M.Tsoupko-Sitnikov and W.Westmeier, "Investigation of the Effects of Moderator Thickness on the Transmutation Rate in the JINR GAMMA-2 Set-up with Lead target at Different Proton Energies". Submitted to Proc. XVI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, (10-15 June, 2002, Dubna, Russia), (in print).
- H6) J.Adam, M.Yu.Barabanov, V.Bradnova, R.Brandt, Kh.M.Hella, V.G.Kalinnikov, V.A.Krasnov, M.I.Krivopustov, B.A.Kulakov, V.S.Pronskih, V.M.Tsoupko-Sitnikov, A.A.Solnyshkin, A.N.Sosnin, V.I.Stegailov and W.Westmeier, "Determination of the Experimental production rate of  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{133}\text{I}$  and  $^{91}\text{Sr}$  from the fission of  $^{235}\text{U}$  using relativistic proton beam with different energies and targets". Submitted to Proc. VII International School-Seminar for Heavy Ion Physics, (May 27-June 1, 2002, Dubna, Russia) (in print)

---

Получено 9 января 2003 г.

*Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 13.01.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,55. Тираж 100 экз. Заказ № 53705.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)