

Определение энергетического спектра нейтронов в ядерной фотоэмульсии внутри уран-свинцовой сборки электроядерной установки

Д.Отгонсүрэн¹, Р.Тогоо¹, Б.Тумэндэмбэрэл²

¹Институт Физики и Технологии, Академия Наук Монголии

²Монгольский Государственный Университет Науки и Технологии

Measurements of the energy spectrum of neutrons in the volume of the uranium-lead assembly of the installation "Energy plus Transmutation" are carried out by means of registration of recoil protons in highly sensitive nuclear emulsions. There is a maximum in this spectrum at about (1.0 ± 0.1) MeV, its center of mass is located in the region of 5-7 MeV depending on the cut-off energies used.

I. ВВЕДЕНИЕ

I.1. ТРАДИЦИОННАЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Кратко остановимся на урановых и ториевых рудах - одними из важнейших ресурсов нашей планеты. Сегодня уже свыше 17% мирового производства электроэнергии приходится на атомные электростанции, использующие урановое горючее. В некоторых странах доля атомного электричества значительно больше. Например, Швеция производит на атомных станциях половину всей своей электроэнергии, Франция более трёх четвертей. В Китае недавно принята программа увеличения в 5-6 раз вклада атомных электростанций (АЭС) [1]. Атомная энергетика развивается в Индии, где её долгосрочные перспективы связываются с торием, которым очень богата эта страна. Заметную, хотя пока и не определяющую роль, атомные электростанции играют в США и в нашей стране.

Как и любое крупное производство, АЭС приносят в нашу жизнь новые специфические угрозы и имеют противников, настаивающих на замене их иными, более привычными нам источниками энергии. Особенно привлекательными выглядят возобновляемые источники - гидро и геотермические станции, энергия солнца и ветра, использование биомассы в качестве топлива. Сегодня суммарный вклад таких источников энергии составляет около 20%.

Несмотря на перспективные усовершенствования в этой области, трудно рассчитывать, что их удельный вес увеличится настолько, что сможет удовлетворить наши быстро возрастающие энергетические потребности, которые по данным Мирового энергетического союза в ближайшие 10 лет возрастут не менее, чем на 50-75%.

Оценки показывают, что в ближайшие 20-30 лет львиную долю энергии по-прежнему будет давать углеводородное топливо, благодаря чему уже к началу следующего десятилетия содержание CO_2 в земной атмосфере возрастёт по сравнению с 1990 г. на 50-60% и, если не принять ограничивающих мер, далее будет возрастать с наименьшим темпом, что грозит глобальными экологическими катаклизмами.

Всё это убеждает в том, что несмотря на имеющиеся в обществе опасения, атомная энергетика также будет развиваться быстрыми темпами, особенно, если принять во внимание, что киловатт "атомной электроэнергии" стоит значительно дешевле "углеводородной".

Энергия в реакторах АЭС выделяется в реакциях деления, что сопровождается рождением большого числа нейтронов, часть которых вызывает последующее деление урановых ядер, а остальные поглощаются ядрами урана, превращая их в ядра плутония - легко делящуюся "ядерную взрывчатку". Поэтому

- ❖ легко делится лишь один из изотопов, который в добываемом из руд уране составляет всего лишь 0,7%. Остальная

часть урана идёт в отвал. Её можно утилизировать только в так называемых быстрых реакторах, использующих высокоэнергетическую часть спектра деления. Однако в этом случае нельзя обойтись без значительной примеси дефицитного легкоделящегося уранового изотопа или плутония.

- ❖ в реакторе должен соблюдаться очень строгий баланс рождающихся и поглощённых нейтронов. Это характеризуется “коэффициентом мультипликации нейтронов”, равным отношению чисел нейтронов в 2-х последовательных генерациях:

$$K_{eff} = N_{n-1} / N_n$$

Если $K_{eff} < 1$ - реакция затухает, $K_{eff} > 1$ - реализуется взрывной режим разгонки реактора. Любая АЭС связана с потенциальной опасностью перехода через “красную черту” в область $K_{eff} > 1$. Наконец, в результате поглощения нескольких нейтронов образуются тяжёлые трансурановые ядра, радиоактивность которых сохраняется в течение сотен тысяч и даже миллионов лет.

1.2. ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫЙ МЕТОД

Известно, что идею электроядерных устройств полвека назад первыми предложили Лоуренс в США и академик Семёнов в России. Само слово “реактор” заменялось кодовым термином “кристаллизатор”, а нейтроны назывались метеоритами или нулевыми точками. Не удивительно, что некоторые важные открытия и идеи независимо повторялись в различных местах. Идея объединить две основные “атомные машины” – ускоритель частиц и урановый реактор родилась в небольшом посёлке Обнинск под Малоярославцем, где располагался скрытый лесным массивом от посторонних глаз секретный объект- Физико-энергетический институт. В секретных бумагах он именовался Лабораторией В МВД СССР, а во всех других случаях – как почтовый ящик 276. Сегодня мало кто знает, что этот широко известный ныне реакторный центр начинался с разработки

ускорителей и Д.И.Блохинцев, ставший впоследствии его директором и одним из строителей первой атомной электростанции, принимал в этом активное участие. Поэтому идея “электрояда” – размножения в урановом блоке лавины нейтронов, родившихся вследствие дробления ядер урана пучком разогнанных ускорителем частиц, была вполне закономерной.

Из таблицы 1, где показано, сколько нейтронов и заряженных частиц рождает при столкновении с ядром урана протон с энергией E , видно, что в области $E \cong 1$ их число, в основном нейтронов, составляет несколько десятков.

Таблица 1. Число частиц, рождающихся в столкновении $P + {}^{238}U$ при энергии E . N_n - нейтроны, N_{tot} - суммарное число нейтральных и заряженных частиц

| | | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| E , ГэВ | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| N_n | 12 | 16 | 19 | 21 | 24 | 27 |
| N_{tot} | 15 | 18 | 23 | 26 | 33 | 39 |

Оценки предсказывали, что каждый первичный протон с энергией 0.5-1 ГэВ должен рождать много десятков ядер плутония, нарабатывая оружейный материал. Вместе с тем просматривалось и более простое применение “электрояда”- для снижения коэффициента K_{eff} и повышения тем самым безопасности реактора, когда внешняя подсветка нейтронами позволяет работать ниже “красной черты”, а выключение тока ускорителя гарантирует быструю остановку реактора. Для этого можно было надеяться использовать ускорители с несколько меньшими токами.

Переезд Д.И.Блохинцева в Дубну, где работал 660-МэВ-ный протонный фазотрон и проектировалось строительство мощного импульсного реактора открывало замечательные возможности для изучения электроядерной технологии. Здесь на пучке фазотрона группой В.И.Гольданского были выполнены эксперименты с огромным, 20-тонным блоком урана. Выход нейтронов составлял около 70 нейтронов на один

первичный протон, что было прекрасным подтверждением теоретических ожиданий.

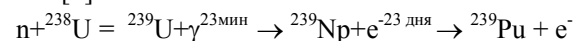
Поскольку дальнейшие эксперименты, включающие различные подкритические сборки с ураном, плутонием, различными типами теплоносителей и радиационной защиты были сложны и дороги, по инициативе Блохинцева в Дубне начались работы по созданию математической модели электроядерного реактора. Такая модель была создана в начале 60-х годов и продолжает совершенствоваться до настоящего времени. В США с небольшим запозданием аналогичная модель была создана в Окриджской национальной лаборатории. Обе модели давали весьма близкие результаты.

Существенный перелом в отношении к электроядерным системам связан с именем Карло Руббиа, предложившего схему “один ускоритель-один безопасный подкритический реактор”, потребляющий нарабатываемый им плутоний и трансмутирующий радиоактивные отходы, свои и, возможно, из реакторов других АЭС. Поскольку перед такими системами не стоит цель наработки излишнего плутония, то для функционирования таких систем вполне достаточно 10-15 мА тока ускорителя, что в пределах современных технических возможностей. По оценке К.Руббиа и его сотрудников производство электроэнергии электроядерной АЭС будет в 2-3 раза дешевле, чем на электростанциях с углеводородным топливом. Не исключено, что эти оценки несколько оптимистичны, однако пока это единственная возможность избавиться от долгоживущих радиоактивных отходов и это компенсировало даже некоторое увеличение стоимости электроэнергии.

В настоящее время в мире ещё нет ни одной работающей электроядерной установки, однако такие устройства с различным уровнем тепловой мощности проектируются и уже близки к началу строительства в нескольких лабораториях.

Один из основных путей направления-заставить атомный реактор работать в режиме, когда при каждом делении уранового ядра в среднем выделялось бы по крайней мере на один нейтрон больше, чем это требуется для

поддержания обычной цепной реакции деления. За счет этого дополнительного нейтрона возможно образование легко выделяющегося U^{239} [2].



Такой режим ядерных процессов (его называют бридингом) можно обеспечить в реакторах на быстрых нейтронах, а при некоторых специальных условиях (в так называемых тяжеловодных реакторах с примесью ${}^{233}\text{U}$) и в области тепловых нейтронов.

Высокоэнергетическая частица дробит встречающиеся ей на пути ядра, передавая свою энергию из них протонам, нейтронам, а при высоких энергиях и рождающимся мезонам. В свою очередь эти частицы расщепляют другие ядра, увеличивая число распространяющихся в мишени частиц и т.д. Например, при столкновении с ядром урана протона, обладающего энергией в 1 ГэВ, рождается 25-27 быстрых и медленных частиц, в том числе около 20 нейтронов. Это в среднем в отдельных же столкновениях может родиться 30,40 и более частиц. Множественность испускаемых частиц быстро растёт при увеличении энергии первичной частицы-снаряда. Если ее энергия порядка 10 ГэВ, то в ядерном столкновении могут родиться уже сотни вторичных частиц. В результате процесса многоступенчатого "размножения" в веществе мишени образуется мощный ливень протонов, нейтронов, мезонов и низкоэнергетических ядер-остатков.

При столкновении высокоэнергетической частицы с атомным ядром из него вылетает большое число протонов, нейтронов и пимезонов. Сильновозбужденное остаточное ядро переходит в свое основное состояние путем "испарения" нейтронов и испускания гамма-квантов или может разделиться, а возбужденные осколки опять-таки теряют энергию, “испаряя” нейтроны и испуская гамма-кванты. Вылетающие из ядер заряженные частицы, протоны и мезоны, взаимодействуют с электронными оболочками атомов, и, срывая с них электроны (ионизуя атомы), теряют значительную часть своей энергии. Поэтому они быстро замедляются.

Протоны останавливаются, а мезоны распадаются. Иначе ведут себя нейтроны. У них нет электрического заряда, и они свободно проходят сквозь электронные оболочки атомов. Их энергия целиком уходит на ядерные взаимодействия. Развиваясь, ливень частиц в мишени всё более обогащается нейтронами и постепенно превращается в интенсивный поток медленно диффундирующих нейтронов.

1.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На проекте "Энергия плюс трансмутация" ведутся исследования (новое название темы "Разработка и внедрение компактных электронных и ионных ускорителей для прикладных целей") по реализации программы "Исследование физических аспектов электроядерного способа производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики на релятивистских пучках синхрофазотрона/нуклотрона ОИЯИ" в городе Дубне. В качестве очередного этапа исследований на пучке нового сверхпроводящего ускорителя-нуклотрона выполнено облучение 4-х секционной модели гетерогенной подкритической U/Pb-сборки при энергии протонов 1.5 ГэВ [3-9]. Этот проект начался в 1998-1999 годах. В этот проект входит очень много методов по изучению ядерно-физических параметров и характеристик процессов в уран-свинцовой сборке. Среди задач по созданию электроядерной установки и исследованию процессов во входящей в её состав уран-свинцовой сборке, требующих экспериментального изучения и компьютерного моделирования, важное место занимают исследования спектров нейтронов. В различных частях сборки нейтронные спектры формируются в результате транспорта нейтронов, генерируемых в большой свинцовой мишени под действием пучка первичных релятивистских протонов, и нейтронов, образующихся в процессе деления ядер урана в бланкете. На рис.1 представлена программа этого эксперимента с указанием названий ядерно-физических процессов, происходящих в

U/Pb-сборке, а также типов методик, которые использованы для их изучения.



Рис.1. Программа эксперимента по облучению свинцовой мишени с четырёхсекционным урановым бланкетом на протонном пучке сверхпроводящего ускорителя-нуклотрона Лаборатории Высоких Энергий ОИЯИ при энергии 1.5 ГэВ.

Настоящая работа описывает эксперимент по облучению свинцовой мишени с четырёхсекционным урановым бланкетом U/Pb- сборки и результатам изучения спектров быстрых нейтронов эмульсионной методикой регистрации протонов отдачи. Одним из эффективных методов измерения спектров быстрых нейтронов во внутренней и поверхностной областях модели U/Pb-сборки является метод регистрации протонов отдачи в ядерной эмульсии. Впервые в экспериментах по электроядерной тематике применён этот метод для измерения спектра быстрых нейтронов, покидающих сборку из свинцовой мишени и уранового бланкета [10].

Спектр нейтронов в 4-х секционной уран-свинцовой сборке формируется в основном в результате их генерации в свинцовой мишени за счёт реакций глубокого расщепления и деления ядер свинца, делений

ядер уранового бланкета и других процессов, сопровождаемых вылетом нейтронов.

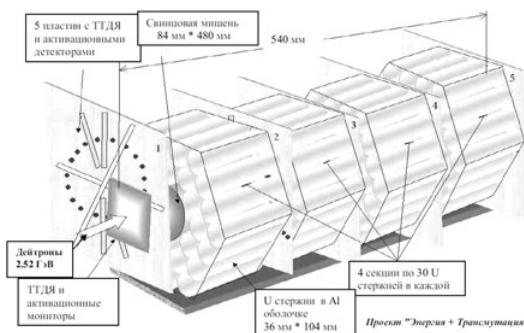


Рис.2. Схема эксперимента по облучению U/Pb-сборки с 4-х секционным урановым бланкетом на пучке сверхпроводящего ускорителя-нуклотрона Лаборатории Высоких Энергий ОИЯИ (Дубна) при энергии протонов 1.5 ГэВ (установка "Энергия плюс трансмутация [1]")

Краткое описание уранового бланкета. Урановый бланкет состоит из протяжённой свинцовой мишени и 4 секций, где находятся урановые стержни. В эксперименте были приняты следующие размеры свинцовой мишени: $d=8.4$ см; $L=52$ см; $m=43$ кг. В установку входит 4 секции бланкета, собранные из урановых стержней (уран естественного изотопного состава упакован в герметичные алюминиевые оболочки) со следующими размерами: $d=3.6$ см; $L=10.4$ см; масса одного стержня – 1720 г. В каждую секцию входит 30 урановых стержней, имеющих общую массу – 51.6 кг.

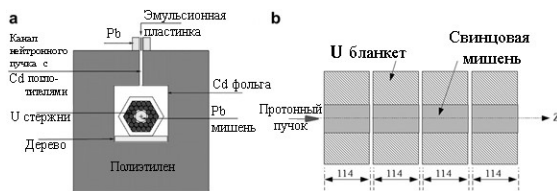


Рис.3. Технические детали U/Pb-сборки внутри массивной защиты: на левой стороне (а) дан разрез вдоль сборки на плоскости XY; на правой стороне (б) показаны YZ-сечение для 4 секций мишени-бланкета, центровка по оси Z.

Кратко опишу эмульсионный спектрометр нейтронов по регистрации протонов отдачи. Высококочувствительная толстослойная эмульсия G-5 БР (бесподложечная, релятивистская) экспонировалась в спектре нейтронов

расщепления и нейтронов деления ядер в урановом бланкете, которые вылетают в радиальном направлении от оси симметрии бланкета. На рис.1 приведена схема описываемого эксперимента с использованием эмульсионного спектрометра нейтронов по регистрации протонов отдачи. Размеры эмульсии: $100*25*1.2$ мм. Эмульсия помещалась на расстоянии 500 мм от оси симметрии уран-свинцовой сборки над зазором между 1, 2-ой и 3-ей секциями бланкета. В полиэтиленовом замедлителе сделан канал, поверхность которого выложена кадмием. Этот канал служит коллиматором нейтронов. Для защиты эмульсии во время облучения от γ -квантов использовался свинец (толщина 50 мм), а от тепловых нейтронов – гранулированный полиэтилен (толщина 260 мм) и листовая кадмий (толщина 2 мм).

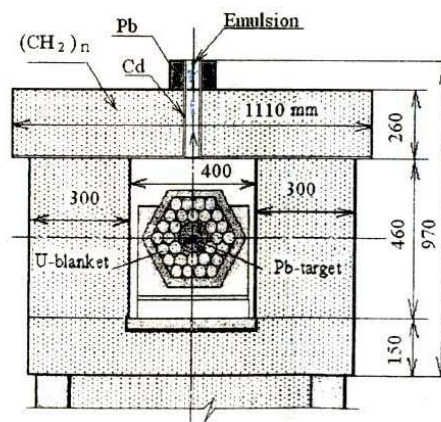


Рис.4. Эмульсионный спектрометр нейтронов по регистрации протонов отдачи.

Нейтроны, попадая в ядерную эмульсию, могут столкнуться с имеющимися в ней протонами, они взаимодействуют именно с ядрами водорода H, при этом они испытывают упругие рассеяния, отдавая часть или всю кинетическую энергию протону. Нейтроны регистрировались в спектре при пересечении площадки на внутренней поверхности замедлителя, равной по площади сечению канала коллиматора в этом эксперименте и расположенной над зазором между 1 и 2 секциями бланкета. Так как известны направление нейтронов, движущихся со стороны бланкета и направление протонов отдачи по измерениям с помощью микроскопа,

то могут быть определены углы рассеяния θ между направлениями нейтрона и протона. Энергия протона T_p определяется по измерениям длины трека в эмульсии, а энергия нейтрона вычисляется по формуле $T_n = T_p(\cos \theta_{np})^{-2}$. Эта формула выводится из законов сохранения энергии и импульса в пренебрежении разницей масс протона и нейтрона ($\sim 0.1\%$). Обработка треков для определения нейтронного спектра выполнялась с помощью специальной программы, созданной в Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ, а спектр нейтронов строится по программе ROOT.

1.4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наша главная задача заключается в устранении фона эксперимента для измеренных данных. В таблице 1 представляем фоновые данные. Это те данные, которые были измерены до начала эксперимента, когда пластинки были поставлены в урановый бланкет электроядерной установки на сутки. На пластинки попадали космические лучи, включая протоны. Были обработаны данные на пластинке L-3, где число измеренных событий было равно- 3542. Эти данные были измерены в Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ под руководством профессора Ю.А.Батусова. Нами же измерены 4614 событий по протонам отдачи для 2-х пластинок: 3-5 и 3-6.

Таблица 2. Даны фоновые данные в интервале энергий от 0-25 МэВ.

[ЭФФЕКТ – ФОН]: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОНА В ИНТЕРВАЛАХ ЭНЕРГИЙ.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.5+1 | 1+1.5 | 1.5+2 | 2+2.5 | 2.5+3 | 3+3.5 | 3.5+4 | 4+4.5 | 4.5+5 | 5+5.5 |
| 4 | 15.3 | 33 | 49.3 | 47.7 | 24.7 | 17 | 14.7 | 10.3 | 7.7 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 5.5+6 | 6+6.5 | 6.5+7 | 7+7.5 | 7.5+8 | 8+8.5 | 8.5+9 | 9+9.5 | 9.5+10 | 10+10.5 |
| 4 | 8 | 6.3 | 4.3 | 6 | 4.7 | 5 | 2.3 | 4.7 | 3.7 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 2.5 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 10.5+11 | 11+11.5 | 11.5+12 | 12+12.5 | 12.5+13 | 13+13.5 | 13.5+14 | 14+14.5 | 14.5+15 | 15+15.5 |
| 4.7 | 2.7 | 1 | 4 | 1 | 4.3 | 1/3 | 2/3 | 3.3 | 1 |
| 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 15.5+16 | 16+16.5 | 16.5+17 | 17+17.5 | 17.5+18 | 18+18.5 | 18.5+19 | 19+19.5 | 19.5+20 | 20+20.5 |
| 1.3 | 2/3 | 1/3 | 2/3 | 1.3 | 1.3 | 2 | 1/3 | 2 | 1/3 |
| 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | |
| 20.5+21 | 21+21.5 | 21.5+22 | 22+22.5 | 22.5+23 | 23+23.5 | 23.5+24 | 24+24.5 | 24.5+25 | |
| 2/3 | | 1/3 | 2.7 | | 1 | 1/3 | 2/3 | 1 | |

По этим событиям построены энергетические спектры нейтронов для

пластинки L-3 и по нашим данным (см.рис.5). Для пластинки L-3 –число квадратов равно 43, для пластинки 3-5 – 40 квадратов с 2300 событиями, а пластинки 3-6 –30, где число событий-2314. Отсюда, на единицу площади число протонов для пластинки L-3-82.4; для пластинки 3-5–57.7; пластинки 3-6–77.1; Суммарное число всех фоновых данных- 312.1. Фон эмульсии составляет 1.4%.

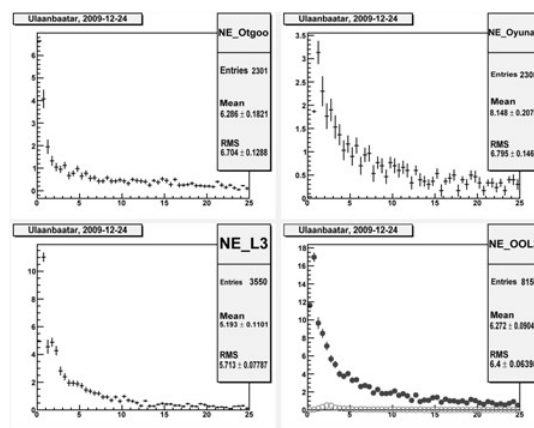


Рис.5. Здесь даны спектры энергии нейтронов для 3 данных: для пластинки с данными 3-5, 3-6 и L-3, и с вместе взятыми (самая последняя гистограмма).

На рис.5 самой последней гистограммы дан фон эксперимента, где в интервале 5 МэВ энергии зафиксированы фоновые данные с максимальной энергией около 2.5 МэВ.

Чистый спектр энергии нейтронов по протонам отдачи получился в результате вычитания фона данных, которые даны в таблице 1. На рис.6 даны данные на пластинках 3-5, 3-6 и L-3 для 8106 событий. Обработаны данные и на пластинках L-1, L-2 и пластинке D-2, измеренные в Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ, но так как для единичного квадрата число протонов L-1- 6.4 ; для L-2- 5.2; и для D-2- 17.2 то они исключались из нашего рассмотрения, т.к. их величины очень малы.

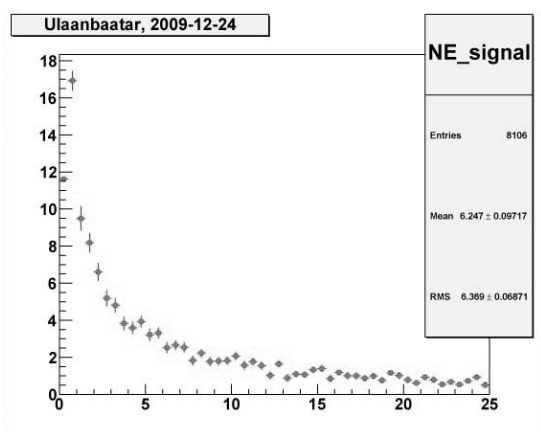


Рис.6. Чистый спектр энергии нейтронов для данных на пластинках 3-5, 3-6 и L-3.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ.

- Дана оценка энергетического спектра нейтронов без фона в экспериментальных условиях, которые рождаются в урановом бланкете электроядерной установки “Энергия +Трансмутация” на протонном пучке с энергией 1.5 ГэВ.
- Обнаруженный фоновый эффект требует физического обсуждения.
- Полученные результаты с помощью эмульсионной методики подтверждают возможность её применения для исследования энергетических спектров нейтронов в различных местах объёма уранового бланкета электроядерной установки.

Литература:

- [1]. В.С.Барашенков. “Электрояд”- истоки и будущее. (Ресурсы атомной энергетики) P2-2003-144.
- [2]. В.С.Барашенков. Проблемы электроядерной технологии. P2-94-56.
- [3]. М.И.Кривопустов, Д.Чүлтэм, И.Адам и др. 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. Припринт ОИЯИ P1-2000-168, Дубна, 2000; «Kerntechnik», 2003, 68, p.p. 48-56.

- [4]. Д.Чүлтэм, Ц.Түмэндэлгэр, М.И.Кривопустов, Ш.Гэрбиш, Б.Түмэндэмбэрэл, А.В.Павлюк, О.С.Заверюха. Исследование спектров масс осколков деление и выходов (n , γ)- и (n , $2n$,-)реакций в подкритическом урановом бланкете электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2002-16, Дубна, апрель 2002.
- [5]. Б.А.Марцынкевич, А.М.Хильманович, С.В.Корнеев, И.Л.Рахно, С.Е.Чигринов, М.И.Кривопустов, А.В.Павлюк. Восстановление спектров быстрых нейтронов в широком диапазоне энергий (вплоть до 200 МэВ) в подкритической уран-свинцовой сборке электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация». Сообщения ОИЯИ P1-2002-65, Дубна, июнь 2002.
- [6]. И.В.Жук, М.К.Киевец, М.И.Кривопустов, А.Н.Соснин, Д.Чүлтэм, В.Вестмайер, Ц.Түмэндэлгэр, О.С.Заверюха, А.В.Павлюк. Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в свинцовой мишени и урановом бланкете электроядерной установки «Энергия плюс трансмутация» при бомбардировке протонами с энергией 1.5 ГэВ. Препринт ОИЯИ P1-2002-184, Дубна, сентябрь 2002.
- [7]. Д.Чүлтэм, Ц.Түмэндэлгэр, М.И.Кривопустов. Трековый интегратор деления урана для исследования энерговыделения в подкритическом урановом бланкете электроядерной установки. Сообщения ОИЯИ P1-2001-128, Дубна, 2001.
- [8]. Л.А.Гончарова, К.А.Котельников, С.П.Кузнецов, Н.Г.Полухина,

- Н.И.Старков, П.И.Зарубин,
О.С.Заверюха, М.И.Кривопустов,
В.П.Перельгин, Ц.Түмэндэлгэр,
Д.Чүлтэм. *Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом blankets электроядерной системы*. Препринт 25 Физического Института им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, 2001.
- [9]. Н.Н.Агапов, А.Д.Коваленко,
А.И.Малахов. *Нуклотрон: основные результаты и планы развития*. Атомная энергия, 2002, 93, стр. 479-485.
- [10]. Д.Чултэм, М.И.Кривопустов,
Ю.А.Батусов, А.Н.Соснин, И.Адам,
О.С.Заверюха, А.В.Павлюк: *Исследование спектров быстрых нейтронов в урановом blankets установки "ЭНЕРГИЯ ПЛЮС ТРАНСМУТАЦИЯ" на протонном пучке нуклотрона ОИЯИ при энергии 1.5 ГэВ*. Препринт ОИЯИ Дубна, 20