

Г-804

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМ. И.М. ФРАНКА

На правах рукописи



Гремячкин Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ И ВЕРИФИКАЦИИ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2022

Работа выполнена в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского».

Научный руководитель – Пиксайкин Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории ядерно-физических исследований департамента экспериментальной ядерной физики Отделения прикладной физики, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского».

Официальные оппоненты – Пятков Юрий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор Отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ Институт ядерной физики и технологий Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
Фурман Вальтер Ильич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://www.jinr.ru/disser/>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолно-Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Т.И. Иванкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Запаздывающие нейтроны (ЗН) играют важную роль в управлении ядерными реакторами. Механизм их испускания позволяет создавать системы управления, поддерживающие нейтронный баланс на уровне, необходимом для устойчивого протекания цепной реакции деления, являющейся основным источником энергии, нагревающей теплоноситель, который в последствии приводит в движение турбину, генерирующую электрический ток.

В настоящее время существует множество работ, направленных на изучение характеристик ЗН при делении тяжелых ядер нейтронами в области энергий от тепловых значений до нескольких МэВ. Набор исследуемых нуклидов и энергетический диапазон (диапазон энергий нейтронов, вызывающих деление) определяются потребностями ядерной энергетики и прикладными аспектами использования свойств ЗН.

По мере эксплуатации ядерных энергетических установок происходит неминуемое накопление долгоживущих ядер минорных актинидов, образующихся в результате реакций захвата нейтронов ядрами топливных элементов с последующими их ядерными превращениями. Образующиеся ядра минорных актинидов являются долгоживущими и обладают высокой радиотоксичностью. Поэтому задача утилизации ядер минорных актинидов является одной из ключевых в замыкании ядерного топливного цикла. К тому же сечение деления некоторых из них имеет пороговый характер, что ограничивает возможность их утилизации путем добавления в топливо реакторов на тепловых нейтронах.

Одним из подходов к обращению с минорными актинидами является добавление их в состав ядерного топлива быстрых реакторов с целью их трансмутации. Другим способом утилизации может быть их использование в гибридных реакторах, состоящих из энергогенерирующей части (активной зоны реактора) и термоядерной нейтрон-генерирующей части, а также в системах, управляемых ускорителем (ADS системы). Спектр нейтронов в гибридных реакторах и ADS системах отличается от спектров нейтронов реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. Кроме того, характеристики ЗН, испускаемых в результате деления различных ядер, могут отличаться в несколько раз, поэтому при использовании реакторного топлива с добавлением ядер минорных актинидов необходимо корректировать константы по ЗН с учетом количества и морфологии добавленных нуклидов. Для этого при проектировании и расчете ядерных реакторов нового поколения необходимы высокоточные и детальные данные по реакциям взаимодействия нейтронов с ядрами, включая данные, связанные с временным поведением подобных систем, например, микроскопические и макроскопические характеристики ЗН, а именно относительные выходы ЗН и периоды полураспада их ядер-предшественников. Кроме того, необходимы групповые спектры ЗН.

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Обзор существующих данных по ЗН показал, что в области энергий первичных нейтронов от 5 до 20 МэВ данные временных характеристик ЗН (относительных выходов ЗН и периодов полураспада их ядер-предшественников) при делении ядер ^{236}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами с энергиями 14 МэВ отсутствуют, хотя их знание важно с точки зрения использования ядер данных элементов в гибридных реакторных системах и системах, управляемых ускорителем, а также для развития методов неразрушающего контроля делящихся веществ в закрытых контейнерах.

Следует отметить, что существующие в диапазоне от 4 до 22 МэВ данные относительных выходов ЗН и периодов полураспада их ядер-предшественников значительно расходятся для основных делящихся ядер (^{235}U , ^{238}U). Различие в значениях среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН, полученных разными авторами, значительно превышает указанные авторами неопределенности данных и достигает 100% и более, указывая тем самым на систематические ошибки, допущенные при проведении соответствующих измерений.

Важным аспектом развития представлений о процессе деления является наличие надежных теоретических моделей поведения ядерно-физических характеристик в зависимости от энергии первичных нейтронов. Одну из наиболее сложных задач ядерной физики представляет экспериментальное исследование реакций деления под действием нейтронов, сопровождающихся множественным испусканием нейтронов. Данная задача не может быть решена без теоретического анализа экспериментальных данных. На практике не существует экспериментальных методов, которые могли бы подтвердить наши знания о шансовой структуре сечений деления.

Отсутствует единый критерий выбора наиболее надежных данных характеристик ЗН: микроскопических данных выходов продуктов деления, данных временных параметров ЗН среди существующих наборов, представленных в библиотеках оцененных ядерных данных, а также данных вероятностей испускания ЗН и периодов полураспада ядер-предшественников, представленных в опубликованных работах, для использования в расчетных моделях, описывающих поведение делящихся систем.

Описанное выше обуславливает актуальность темы диссертации и ее теоретическую и практическую значимость.

Цель работы заключается в разработке комплексного метода измерений энергетической зависимости временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении ядер актинидов быстрыми нейтронами с учетом эффектов, искажающих результаты, и создании методов верификации оцененных ядерно-физических данных с использованием полученных результатов и рекомендованных данных.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработать метод измерения временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{235}U в двухкомпонентном спектре первичных нейтронов, генерируемых в реакции $\text{D}(d,n)/\text{D}(d,pn)$.
2. Провести измерение эффективности 4л-детектора нейтронов.
3. Провести измерения временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении ^{235}U нейтронами в диапазоне энергий от 0,42 до 8 МэВ.
4. Провести оценку параметров запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{235}U в двухкомпонентном спектре первичных нейтронов, генерируемых в реакции $\text{D}(d,n)$ на твердой мишени.
5. Провести измерение временной зависимости спада интенсивности запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами в диапазоне энергий от 14 до 18 МэВ.
6. Разработать метод учета эффекта дополнительного источника и эффекта блокировки детектора при измерении относительных выходов ЗН и периодов полураспада их ядер-предшественников, образующихся при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами в диапазоне энергий от 14 до 18 МэВ.
7. Провести оценку параметров запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами в диапазоне энергий от 14 до 18 МэВ.
8. Исследовать шансовую структуру сечений эмиссионного деления ^{238}U нейтронами в диапазоне энергий от 14 до 18 МэВ с использованием измеренных экспериментально данных по запаздывающим нейтронам.
9. Разработать метод верификации библиотек оцененных ядерных данных, содержащих выходы продуктов деления, на основе экспериментально измеренных значений среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.

Все задачи были решены автором в составе группы при определяющем личном участии.

Научная новизна. В настоящей работе впервые:

1. Разработан и применен метод измерения временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{235}U в двухкомпонентном спектре первичных нейтронов в реакции $\text{D}(d,n)$.
2. Получены новые данные энергетической зависимости относительных выходов запаздывающих нейтронов и периодов полураспада их ядер-предшественников при делении ядер ^{235}U нейтронами с энергией от 0,42 до 8 МэВ с учетом спектральных характеристик источника нейтронов на основе реакции $\text{D}(d,n)$ на твердой подложке.
3. Измерена эффективность нового 4л-детектора нейтронов.
4. Получены значения временных параметров ядер-предшественников ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами с энергиями от 14 до 18 МэВ.
5. Проведена независимая оценка сечений эмиссионного деления ядер ^{238}U нейтронами с использованием экспериментально измеренных данных энергетической зависимости временных параметров запаздывающих нейтронов.

6. Величина среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН использована в задаче верификации библиотек оцененных ядерных данных.

Личный вклад

Автор принимал непосредственное участие в получении основных результатов диссертационной работы. С 2014 по 2020 годы выступал с докладами на международных и российских конференциях. Личное участие автора в получении изложенных в диссертации результатов подтверждено соавторами.

Положения и результаты, выносимые на защиту

- 1) Усовершенствованная методика проведения эксперимента по измерению характеристик запаздывающих нейтронов, испускаемых при делении тяжелых ядер немонотонными нейтронами.
- 2) Метод измерения и обработки экспериментальных данных временных характеристик запаздывающих нейтронов с учетом спектральных характеристик источника первичных нейтронов.
- 3) Подход к измерению временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении тяжелых ядер нейтронами, генерируемыми в реакции $T(d,n)$ на твердой тритиевой мишени.
- 4) Метод исследования энергетической зависимости сечений эмиссионного деления ^{238}U с использованием экспериментально измеренной энергетической зависимости среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.
- 5) Подход к верификации библиотек оцененных ядерных данных с использованием величины среднего периода полураспада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов.
- 6) Экспериментальные результаты энергетической зависимости временных параметров запаздывающих нейтронов при делении ядер ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am .

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается их воспроизводимостью при одинаковых параметрах эксперимента; публикацией основных результатов работы в рецензируемых журналах, относящихся к списку ВАК.

Апробация работы

Полученные результаты и основные положения диссертационной работы были представлены на научных семинарах ГИЦ РФ-ФЭИ и докладывались на международных конференциях ISINN-22, Нейтроника-2014, ISINN-24, ND-2016, ISINN-25, ISINN-27.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 6 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, тезисы 4 докладов на научных конференциях.

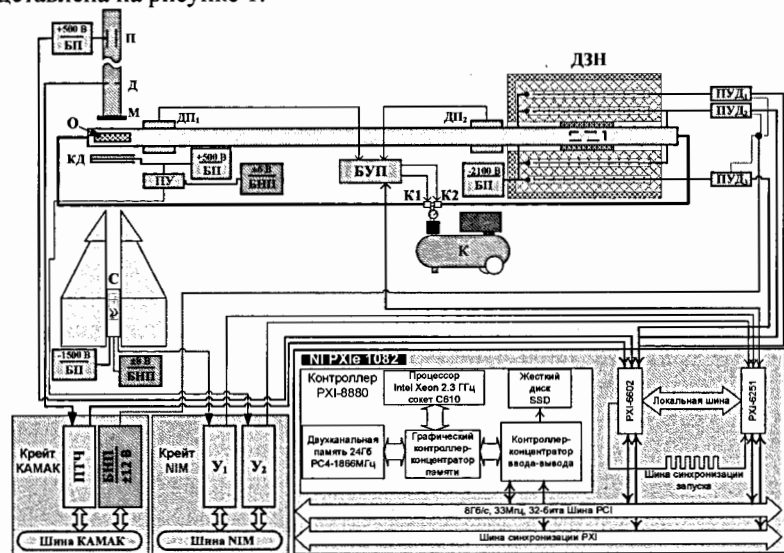
Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемых источников из 85 наименований. Содержание работы изложено на 110 страницах, включая 50 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность, цель работы, новизна решаемых задач, теоретическое и практическое значение данной работы, положения, которые выносятся на защиту, а также приводится обзор экспериментальных работ, посвященных измерению относительных выходов и периодов полураспада ядер-предшественников ЗН.

В первой главе приводится описание эксперимента, поставленного с целью измерения энергетической зависимости временных характеристик ЗН при делении ядер ^{235}U в условиях облучения исследуемых образцов в двухкомпонентном спектре первичных нейтронов при использовании реакции $\text{D}(d,n)$ на твердой дейтериевой мишени. Представлена схема экспериментальной установки, собранной для проведения измерений временных характеристик ЗН. Описан подход к исследованию временных характеристик ЗН в условиях облучения исследуемых образцов моноэнергетическими нейтронами генерируемыми в реакциях $\text{Li}(p,n)$ и $\text{D}(d,n)$, а также в случае, когда спектр немонотонноэнергетический. Схема установки представлена на рисунке 1.



БП – блок питания; БНП – блок низковольтного питания; ПТЧ – преобразователь ток-частота; П – устройство прерывания пучка заряженных частиц; Д – диафрагма; М – нейтрон генерирующая мишень; О – капсула содержащая исследуемый образец; ДП₁, ДП₂ – датчики положения исследуемого образца; КД – камера деления; ПУ – предусилитель; С – сцинтилляционный спектрометр на основе кристалла стильбена; У₁, У₂ – усилители; К – воздушный компрессор; К1, К2 – электромагнитные клапаны подачи сжатого воздуха; БУП – блок управления пневматической системой транспортировки образцов; ДЗН – 4π-детектор ЗН; ПУД₁, ПУД₂, ПУД₃ – предусилитель, усилитель и дискриминатор.

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования характеристик ЗН

Собранная в мишенном зале ускорителя Тандем-3М установка позволяла управлять устройством прерывания пучка заряженных частиц, клапанами подачи сжатого воздуха в направляющую трубку пневматической системы транспортировки исследуемых образцов, записывать временные и амплитудные распределения импульсов, генерируемых детекторами в результате взаимодействия с нейтронами, фиксировать положение образца.

В целях измерения временных характеристик ЗН были проведены измерения временной зависимости интенсивности ЗН после экспозиции исследуемого образца в потоке первичных нейтронов в течение фиксированного интервала времени (180 с). Вследствие небольшого выхода ЗН, для получения статистически значимой кривой спада интенсивности ЗН, измерения проводились в циклическом режиме. В качестве монитора нейтронного потока использовалась камера деления с рабочим слоем из ^{239}Pu с известным числом ядер. Камера устанавливалась в непосредственной близости к исследуемому образцу под углом 0° по отношению к направлению пучка ионов.

Для обеспечения лучших фоновых условий регистрации ЗН после окончания сеанса облучения пучок заряженных частиц ускорителя прерывался и исследуемый образец посредством подачи сжатого воздуха в направляющую трубку пневматической системы транспортировки перемещался на позицию измерения (в 4π-детектор нейтронов). Время перемещения образца составляло от 0,18 до 0,2 с в зависимости от давления сжатого воздуха на выходе из баллона накопителя.

В процессе исследования энергетической зависимости характеристик ЗН важную роль играет энергия первичных нейтронов. В целях точной привязки получаемых значений характеристик ЗН к значениям энергии первичных нейтронов во время фазы облучения с использованием сцинтилляционного спектрометра с кристаллом стильбена размером 40x40 мм проводилось измерение спектра первичных нейтронов, генерируемых в твердой дейтериевой мишени под действием ускоренных дейтронов. Для уменьшения фона нейтронов и γ -лучей, рассеянных оборудованием и стенами экспериментального зала, детектор помещался в подвижный коллиматор, изготовленный из смеси гидрида лития с парафином минимальной толщиной 30 см. Между детектором и мишенью была установлена свинцовая защита толщиной 10 см.

Регистрация ЗН осуществлялась с помощью 4π-детектора нейтронов, разработанного и изготовленного для работы в условиях сравнительно небольших потоков нейтронов. Детектор представлял собой сборку из 21 ^3He -счетчика, распределенных в полиэтиленовом замедлителе в виде двух концентрических окружностей с радиусами 105 и 149 мм. Внутренняя окружность содержит 7 ^3He -счетчиков, внешняя окружность – 14 счетчиков. Внешний диаметр замедлителя равен 510 мм, длина – 630 мм. Блок замедлителя окружен защитой из карбида бора, листов кадмия и борированного полиэтилена для защиты детектора от тепловых нейтронов,

рассеянных в экспериментальном помещении. Схематическое изображение детектора, а также схема подключения и питания счетчиков представлены на рисунке 2.

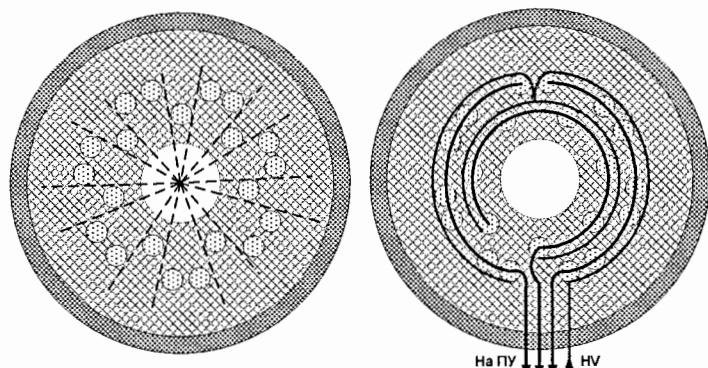


Рисунок 2 – Расположение наполненных ^3He счетчиков в 4π -детекторе. Слева – поперечное сечение детектора, справа – схема подключения счетчиков и подачи высокого напряжения питания (HV).

Счетчики, наполненные ^3He , работали в пропорциональном режиме при напряжении питания -2100 В . В центре детектора предусмотрено отверстие диаметром 120 мм , предназначенное для установки исследуемого образца. В отверстии расположен свинцовый фильтр толщиной 30 мм , предназначенный для подавления гамма-квантов, испускаемых облученным образцом и контейнером.

Электронные каналы регистрации для внутреннего и внешнего рядов счетчиков состояли из предусилителей, усилителей и дискриминаторов. Импульсы с последних поступали в систему накопления данных.

Характеристики детектора нейтронов (мертвое время регистрации нейтронов, эффективность регистрации нейтронов, влияние воздействия первичного потока нейтронов на счетную характеристику детектора) исследовались в отдельных экспериментах.

Мертвое время при максимально возможной величине тока заряженных частиц на мишени составило $6,85 \cdot 10^{-7}\text{ с}$. Проведенное исследование функции блокировки показало незначительное отклонение скорости счета детектора после прерывания пучка при экспозиции внутри детектора изотопного источника нейтронов. Величина эффективности 4π -детектора по спектру ЗН составила $41,56\%$.

Транспортировка образца с позиции облучения в детектор нейтронов осуществлялась с помощью пневматической системы, пневмопровод которой представляет собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали с внешним диаметром 14 и толщиной стенки 1 мм . Положение образца фиксировалось с помощью втулки со специальным устройством гашения силы удара движущегося образца.

Образец, используемый в эксперименте, представлял собой капсулу из дюралюминия диаметром $8,5\text{ мм}$, высотой 24 мм , наполненную закисью-окисью урана ^{235}U , упакованную в транспортный контейнер с наружным диаметром $11,5\text{ мм}$.

Управление экспериментом, сбор и обработка экспериментальных данных осуществлялись с использованием системы, основанной на модулях National Instruments [1]. В настоящей работе использовался крейт NI PXIe 1082 с контроллером PXI-8880. Сигналы со счетчиков поступали на предусилители, усилители, дискриминаторы и формирователи, в результате чего на выходе последнего формировались TTL сигналы высокого уровня с частотой, соответствующей скорости счета данного измерительного канала 4π -детектора. TTL сигналы с измерительных каналов детектора подавались на таймер-счетчик PXI-6602, который использовался для регистрации временной зависимости интенсивности ЗН (с шагом 10 мкс), временной зависимости тока заряженных частиц на мишени, а также генерации сигналов для управления системой отклонения пучка и генерации тактового импульса системы.

Сигналы от сцинтилляционного детектора и камеры деления записывались с использованием многофункционального модуля PXI-6251. Многофункциональный модуль также использовался для генерации сигналов управления клапанами подачи сжатого воздуха из компрессора в направляющую пневматической системы транспортировки.

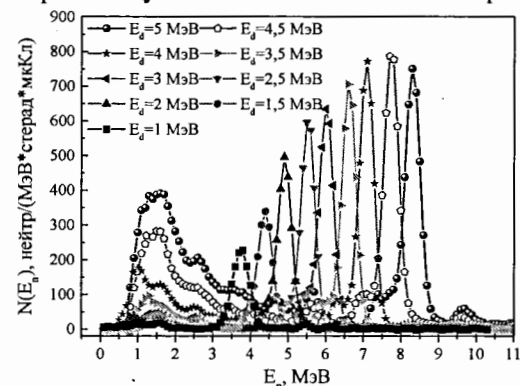


Рисунок 3 – Спектры первичных нейтронов, испускаемые твердой TiD мишенью в результате бомбардировки ускоренными дейтронами, измеренные с использованием сцинтилляционного детектора с кристаллом стиблена, обработанные с учетом эффективности детектора, а также функции пропускания нейтронов через свинцовую защиту (10 см)

С целью оценки временных параметров ЗН, проводилась обработка измеренных временных зависимостей спада интенсивности ЗН с использованием итерационного метода наименьших квадратов [2]. Для получения спектров первичных нейтронов, измеренные амплитудные распределения импульсов сцинтилляционного спектрометра с кристаллом стиблена были обработаны с использованием подхода, описанного в работе [3]. Рассматривая полученные в результате обработки спектры первичных нейтронов (см. рис. 3) можно сделать вывод, что с увеличением энергии налетающих дейтронов возрастает доля нейтронов с энергиями ниже основной группы, что вносит неопределенность в величину энергии первичных нейтронов, вызывающих деление, знание точного

значения которой важно в исследованиях энергетической зависимости характеристик ЗН.

Для учета вклада низкоэнергетической компоненты спектра первичных нейтронов при измерении временных характеристик ЗН при делении ^{235}U нейтронами в диапазоне энергий первичных нейтронов от 4 до 8 МэВ, с использованием измеренных спектров первичных нейтронов, с помощью выражений (1) и (2) рассчитывались средние энергии $\bar{E}_{n,dn}$, $\bar{E}_{n,dpn}$ и значения плотности потока нейтронов $\varphi_{\bar{E}_{n,dn}}$, $\varphi_{\bar{E}_{n,dpn}}$, соответственно, основной компоненты спектра первичных нейтронов из реакции $\text{D}(d,n)$ и низкоэнергетической компоненты, источником нейтронов которой является реакция развала дейтрона $\text{D}(d,pn)$ (см. рисунок 4).

$$\bar{E}_{n,dpn} = \frac{\int_{E_n} E_{n,dpn} \cdot N_{dpn}(E_n) dE_n}{\int_{E_n} N_{dpn}(E_n) dE_n}, \quad \bar{E}_{n,dn} = \frac{\int_{E_n} E_{n,dn} \cdot N_{dn}(E_n) dE_n}{\int_{E_n} N_{dn}(E_n) dE_n}, \quad (1)$$

$$\varphi_{\bar{E}_{n,dpn}} = \int_{E_n} N_{dpn}(E_n) dE_n, \quad \varphi_{\bar{E}_{n,dn}} = \int_{E_n} N_{dn}(E_n) dE_n \quad (2)$$

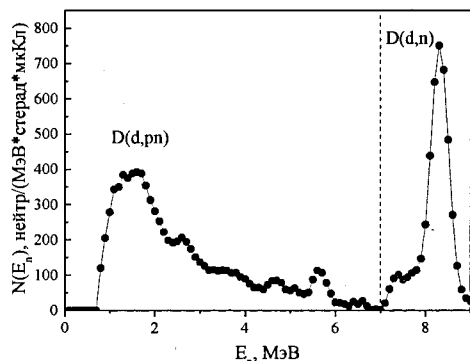


Рисунок 4 – Спектр первичных нейтронов из реакции $\text{D}(d,n)$, энергия дейтронов составляла 5 МэВ

измеренных спектров.

Кривая спада интенсивности ЗН, измеренная в эксперименте, представляет собой суперпозицию кривых, полученных при делении нейтронами, имеющими распределение, представленное на рис. 4. Число отсчетов N в канале t_k , зарегистрированных при измерении временной зависимости интенсивности ЗН исследуемого образца с использованием в качестве источника нейтронов реакции $\text{D}(d,n)$, можно представить в виде суммы чисел отсчетов детектора, соответствующих компоненте первичного нейтронного потока, обусловленного нейтронами из реакции $\text{D}(d,n) - N_{dn}(t_k)$ и чисел отсчетов детектора, связанных с компонентой нейтронного потока из реакции $\text{D}(d,pn) - N_{dpn}(t_k)$. Задача по определению «чистого» эффекта $N_{dn}(t_k)$

Активности насыщения ЗН, соответствующие основной и низкоэнергетической компоненте первичных нейтронов, вычислялись с использованием выражений, представляющих произведения чисел ядер исследуемого образца, значений полного выхода ЗН, соответствующих рассчитанной на основании измеренных спектров средней энергии нейтронов каждой компоненты спектра, эффективности регистрации нейтронов, сечения реакции деления ядер исследуемого образца и плотности потока нейтронов, определенной с использованием

заключается в предварительном определении эффекта $N_{d,pn}(t_k)$ с последующим вычитанием последнего из суммарного эффекта $N(t_k)$.

Моделирование кривой спада для низкоэнергетической группы нейтронов $N_{d,pn}(t_k)$ проводилось с использованием выражения (3) с параметрами, аналогичными использованным в эксперименте: время облучения, время измерения интенсивности ЗН, число циклов измерения:

$$N_{d,pn}(t_k) = A \cdot \sum_{i=1}^n \left(T_i \cdot \frac{a_i}{\lambda_i} \cdot \exp[-\lambda_i \cdot t_k] \cdot (1 - \exp(-\lambda_i \cdot \Delta t_k)) \right) + B \cdot \Delta t_k, \quad (3)$$

где

$$T_i = (1 - \exp[-\lambda_i \cdot t_{irr}]) \cdot \left(\frac{n}{1 - \exp[-\lambda_i \cdot T]} - \exp[-\lambda_i \cdot T] \cdot \frac{1 - \exp[-n \cdot \lambda_i \cdot T_n]}{(1 - \exp[-\lambda_i \cdot T])^2} \right)$$

представляет выражение, описывающее историю облучения, включающее в себя такие параметры, как: число циклов n , период одного цикла измерений T и время облучения t_{irr} .

$$A = \varepsilon_n \cdot \sigma_f \cdot \varphi \cdot N_f \cdot v_d,$$

где $N_{d,pn}(t_k)$ – число отсчетов (нейтронов реакции (d,pn)), зарегистрированных детектором во временном канале t_k длительностью Δt_k , A – активность насыщения (наведенная активность) ядер-предшественников ЗН, v_d – полный выход ЗН на деление; B – интенсивность нейтронного фона, λ_i и a_i – постоянная распада и относительный выход i -й группы ядер-предшественников ЗН; n – число циклов; m – число групп ядер-предшественников ЗН, T – продолжительность одного цикла, включающая облучение и измерение; ε_n – эффективность детектора нейтронов; φ – поток нейтронов, σ_f – сечение деления, N_f – число ядер исследуемого делящегося нуклида.

Относительные выходы и периоды полураспада ядер-предшественников ЗН для средней энергии низкоэнергетической группы нейтронов, полученной с помощью выражения (3), были получены в отдельном эксперименте при использовании реакции $\text{Li}(p,n)$ в качестве источника нейтронов [2].

Оценка относительных выходов ЗН (a_i) и периодов полураспада их ядер-предшественников (T_i) проводилась с использованием метода наименьших квадратов на основании выражения (3). Результаты измерения временных параметров ЗН при делении ядер ^{235}U нейтронами представлены на рис. 5 в терминах энергетической зависимости среднего периода полураспада $\langle T \rangle$ ядер-предшественников ЗН

$$\langle T \rangle = \sum_i a_i \cdot T_i,$$

где a_i – относительный выход i -го предшественника ЗН или относительный выход i -й группы ЗН, а T_i – период полураспада i -го предшественника ЗН или i -й группы ЗН.

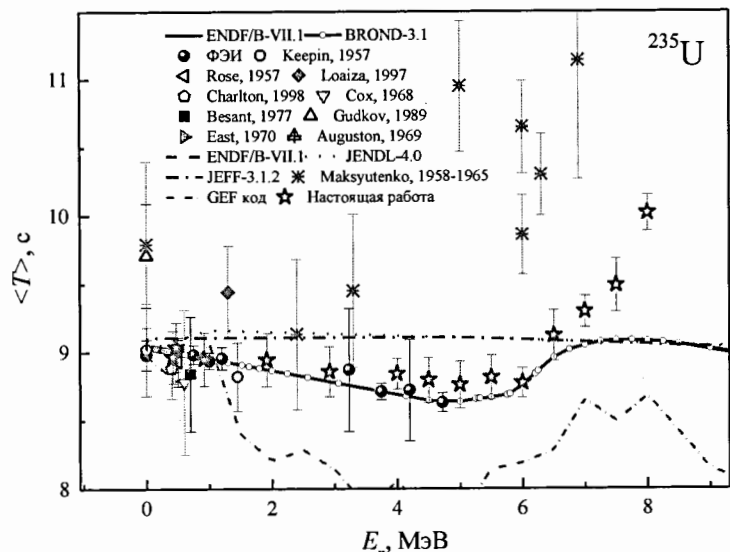
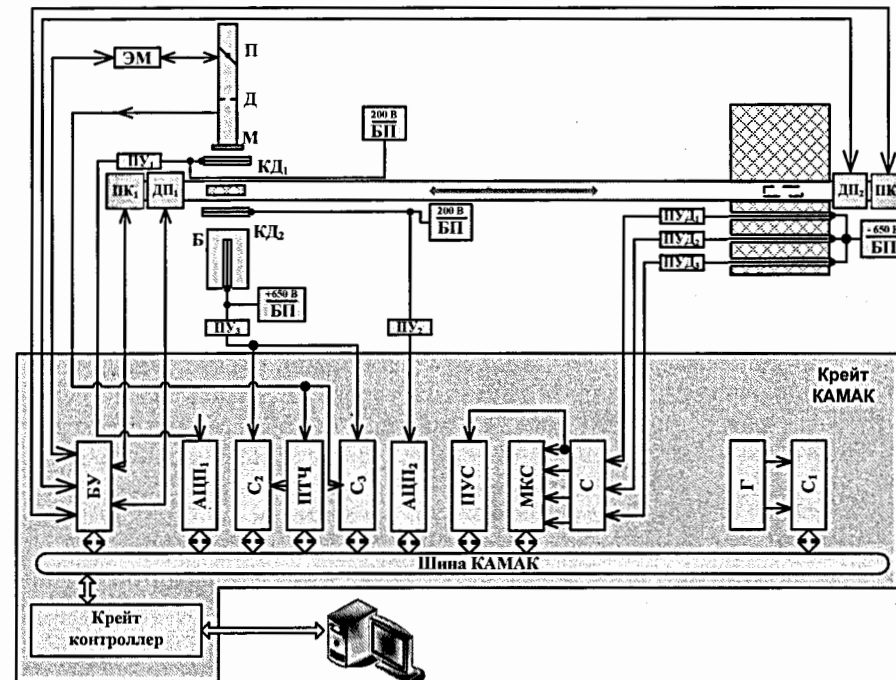


Рисунок 5 – Энергетическая зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ядер ^{235}U нейтронами

Видно, что значения среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН, полученные другими авторами [2, 4, 5, 6, 7], а также данные, полученные в результате расчета с использованием сечений эмиссионного деления из библиотек ENDF/B-VII.1 и BROND-3.1, при делении ядер ^{235}U нейтронами в пределах неопределенностей согласуются с полученными в настоящей работе значениями. Энергетическая зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН, рассчитанная с использованием сечений эмиссионного деления, представленных в библиотеках оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1 и BROND-3.1, совпадает с точностью до значений энергий.

Данные работ Гудкова и Лоаизы [8, 9] в области энергий от 0 до 2,5 МэВ лежат выше полученных значений, данные Максютенко имеют значительную дисперсию значений в области энергий первичных нейтронов выше 4 МэВ; выше перечисленное может быть вызвано не достаточным учетом эффектов, возникающих в процессе измерений. Данные, полученные с использованием GEF кода, согласуются с экспериментальными данными в области до 1,5 МэВ, в остальной области энергий первичных нейтронов – лежат ниже значений, полученных экспериментально, что позволяет сделать вывод о качестве существующих моделей расчета выходов продуктов деления.

Во второй главе приводится описание эксперимента, посвященного измерению временных характеристик ЗН при делении ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами, генерируемыми в реакции $T(d,n)$. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.



ПУД – предусилитель, усилитель и дискриминатор, С – суммирующий модуль, ПУ – предусилитель и усилитель, ПК – электромагнитный клапан, ДП – датчик положения образца, БУ – блок управления, ПТЧ – преобразователь ток-частота, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПУС – программно-управляемый счетчик, МКС – многоканальный счетчик, Г – кварцевый генератор импульсов, БП – блок питания, П – прерыватель, ЭМ – электромагнитный привод прерывателя, Д – диафрагма ионопровода, М – мишень ускорителя, КД – камера деления, Б – детектор потока первичных нейтронов, изготовленный на базе счетчика с твердым борным радиатором, работающий в пропорциональном режиме, С1 – счетчик с предустановкой значения экспозиции, С2 – счетчик интегрального числа импульсов с преобразователя (ПТЧ) и детектора потока первичных нейтронов Б, С3 – счетчик числа импульсов с преобразователя ПТЧ и детектора потока первичных нейтронов Б в заданных интервалах времени

Рисунок 6 – Блок-схема экспериментальной установки

Процедура измерения временных зависимостей спада интенсивности ЗН была аналогична описанной в первой главе для деления урана-235 нейтронами. Отличия данного эксперимента заключались в использовании в качестве чувствительного элемента детектора нейтронов счетчиков с твердым борным радиатором в количестве 30 штук, распределенными в полиэтиленовом замедлителе и системы управления экспериментом на базе крейта КАМАК.

Для генерации нейтронов использовалась твердая тритиевая мишень, бомбардируемая ускоренными дейтронами.

В процессе проведения измерений временных характеристик ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами с энергиями от 14 до 18 МэВ, генерируемыми в твердой тритиевой мишени, было обнаружено, что скорость счета детектора с момента попадания облученного образца в детектор возрастает до определенного момента и лишь потом начинает спадать, что свидетельствовало о нарушении счетных характеристик детектора в момент окончания облучения.

Одной из возможных причин подобного расхождения может быть эффект блокировки детектора, помещенного в среду высокоэнергетических нейтронов.

Высоко энергетические нейтроны проникают через защиту детектора и создают наложенные импульсы в борных счетчиках. Всякий раз, когда превышает емкость предусилителей для обработки отдельного сигнала, происходит деградация скорости счета детектора нейтронов.

Восстановление нормальной скорости счета после выключения пучка занимает некоторое время и зависит от интенсивности и энергии пучка первичных нейтронов. Для учета влияния данного эффекта был поставлен дополнительный эксперимент, в котором временная зависимость скорости счета нейтронов Am-Li источника измерялась сразу после облучения детектора потоком нейтронов из реакции $T(d, n)^4\text{He}$ при различной величине тока ионов.

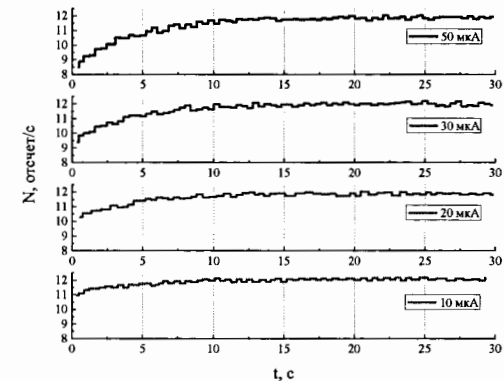


Рисунок 7 – Скорость счета нейтронов Am-Li источника зарегистрированная детектором нейтронов после его выдержки в потоке нейтронов различной интенсивности из реакции $T(d, n)^4\text{He}$. (Значения тока ионов были установлены на уровне 10, 20, 30 и 50 мкА)

Было выяснено, что зависимость скорости счета нейтронов в условиях предварительного облучения детектора в потоке нейтронов носит экспоненциальный характер и может быть описана аналитическим выражением (4) (см. рис. 7).

$$y = y_0 + A_1(1 - e^{-x/t_1}) + A_2(1 - e^{-x/t_2}), \quad (4)$$

Коэффициенты y_0 , A_1 , t_1 , A_2 , t_2 – определяются в процессе описания измеренных зависимостей скорости счета.

Полученное выражение позволяет поправить измеренные кривые спада интенсивности ЗН. В целях минимизации эффекта деградации скорости счета детектора нейтронов все измерения временных характеристик ЗН

проводились при минимальном (в данном эксперименте) токе дейтронов (10 мкА).

Также в процессе проведения измерений временных характеристик ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами с энергиями от 14 до 18 МэВ, генерируемыми в твердой тритиевой мишени был обнаружен рост числа нейтронов, генерируемых мишенью с течением времени.

Было сделано предположение об образовании дополнительного источника нейтронов в результате имплантации дейтронов в подложку мишени. Данный эффект был исследован в отдельном эксперименте, в котором вместо мишени использовался шаблон, изготовленный по той же технологии, но без добавления ядер дейтерия или трития; перед шаблоном устанавливался образец урана-238, который облучался в течение заданного времени, после чего проводилось измерение наведенной активности ядер-предшественников ЗН. Исследования показали, что значение активности растет до величины накопленного заряда ~ 27 Кл (см. рисунок 8), после чего выходит на насыщение.

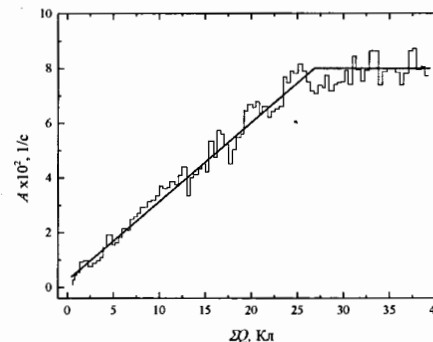


Рисунок 8 – Зависимость активности ядер-предшественников ЗН образца ^{238}U от накопленного на мишени ускорителя заряда дейтронов

Полученные данные о зависимости активности ядер-предшественников ЗН образца ^{238}U от накопленного на мишени ускорителя заряда дейтронов $A(\Sigma Q)$ при облучении образца в потоке нейтронов из реакции $D(d, n)^3\text{He}$ коррелируют с данными о заряде ионов, накапливаемом на мишени ускорителя, и позволяют учесть эффект от возникающего дополнительного источника нейтронов в измерениях относительных выходов ЗН и периодов полураспада их ядер-предшественников при делении

^{238}U нейтронами в интервале энергий от 14 до 18 МэВ.

После введения поправок, учитывающих описанные выше эффекты, экспериментально измеренные временные зависимости спада интенсивности ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами в диапазоне от 14,23 до 17,98 МэВ были обработаны с целью оценки временных параметров ЗН. Полученные наборы временных параметров ЗН представлены на рисунке 9 в терминах энергетической зависимости среднего периода полураспада $\langle T \rangle$ ядер-предшественников ЗН.

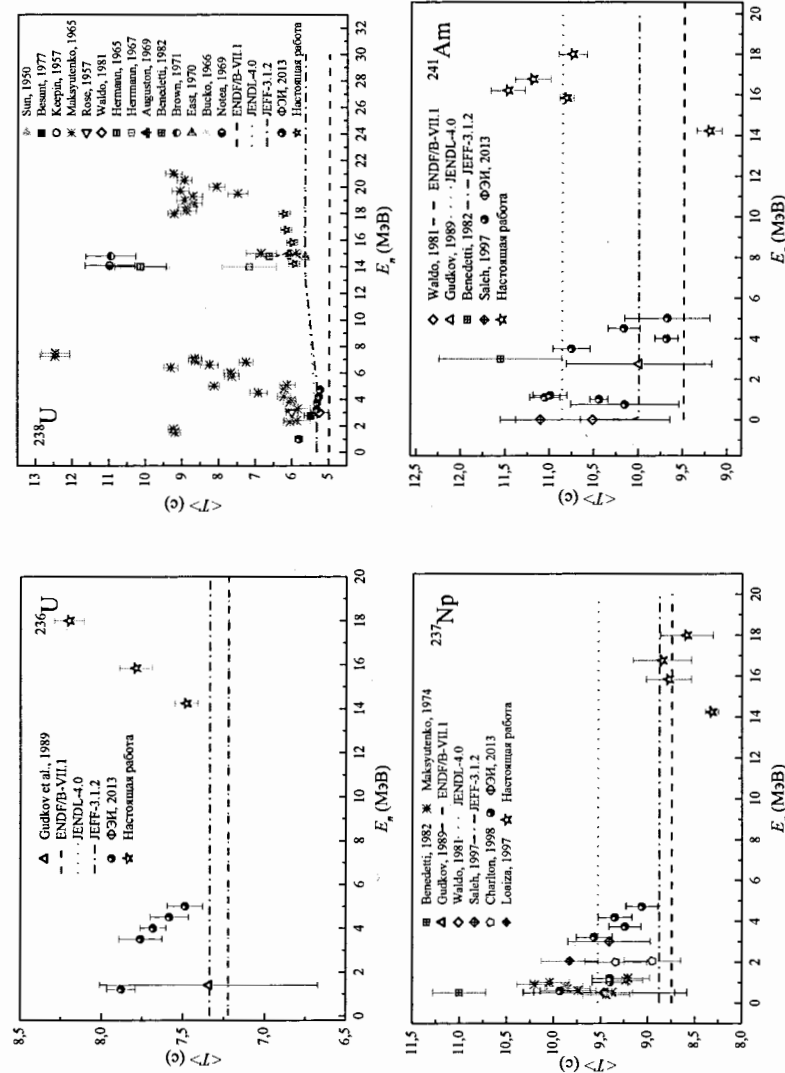


Рисунок 9 – Энергетическая зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am

В третьей главе приведено описание метода исследования энергетической зависимости сечений эмиссионного деления ядер ^{238}U нейтронами с использованием полученной экспериментально величины среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН.

Экспериментальное исследование нейтронных реакций, сопровождающихся множественным испусканием нейтронов, представляет собой одну из сложнейших задач ядерной физики, которая не может с достаточной степенью надежности быть решена без теоретического анализа экспериментальных данных. На практике не существует прямых экспериментальных методов, с помощью которых можно было бы проверить справедливость представлений о шансовой структуре сечения деления [10]. Существуют лишь данные по вкладу сечения первого шанса в сечения реакции $^{235}\text{U}(n,f)$, полученные с помощью данных по множественности нейтронов фотоделения ^{236}U [11], а также на основании зависимости полной энергии мгновенного гамма-излучения от среднего числа мгновенных нейтронов деления [12].

При энергии возбуждения (E^*), превышающей сумму энергии связи нейтрона в ядре B_n и высоты барьера деления E_f^{A-1} ядра $A-1$

$$E^* \geq E_f^{A-1} + B_n^A,$$

появляется вероятность протекания процесса эмиссионного деления, т.е. деления ядра с предварительным испусканием одного или нескольких нейтронов. При энергиях выше порога E^* наблюдаемые характеристики ЗН являются средними величинами по спектру нескольких делящихся ядер, для случая деления ^{238}U нейтронами – $^{239}\text{U}^*$, $^{238}\text{U}^*$ и $^{237}\text{U}^*$. Известно, что величина среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН однозначно связана с нуклонным составом делящегося компаунд-ядра и его энергией возбуждения [13]. В области эмиссионного деления средний период полураспада ядер-предшественников ЗН определяется суммой средних периодов полураспада ядер-предшественников ЗН, образующихся в результате деления каждого из компаунд-ядер с весом, пропорциональным соответствующему парциальному сечению деления.

Поэтому сравнение интегральных значений $\langle T \rangle$, полученных в прямом опыте, с соответствующими значениями, вычисленными с использованием выражения (5) на основании предполагаемой шансовой структуры сечения деления и средних периодов $\langle T(A, E_n) \rangle$, $\langle T(A-1, E_n) \rangle$, $\langle T(A-2, E_n) \rangle$, соответствующих делящимся компаунд-ядрам $^{239}\text{U}^*$, $^{238}\text{U}^*$ и $^{237}\text{U}^*$, позволяет судить о поведении парциальных сечений деления в зависимости от энергии первичных нейтронов E_n :

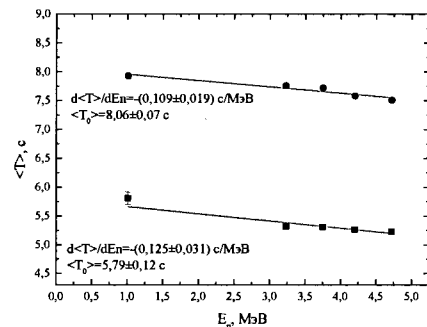
$$\langle T(A, E_n) \rangle = \frac{\sigma_{n,f1} \cdot \langle T(A, E_n) \rangle + \sigma_{n,n'f} \cdot \langle T(A-1, E_n) \rangle + \sigma_{n,2n'f} \cdot \langle T(A-2, E_n) \rangle}{\sigma_f(E_n)}, \quad (5)$$

где $\sigma_f(E_n) = \sigma_{n,f1} + \sigma_{n,n'f} + \sigma_{n,2n'f}$, $\sigma_{n,f1}$, $\sigma_{n,n'f}$, $\sigma_{n,2n'f}$ – соответственно сечения парциальных реакций $(n, f1)$, $(n, n'f)$, $(n, 2n'f)$; E_{n1} , E_{n2} – энергия первичных нейтронов в парциальных реакциях $(n, n'f)$ и $(n, 2n'f)$, соответствующая энергии возбуждения компаунд-ядер $^{238}\text{U}^*$ и $^{237}\text{U}^*$ при эмиссионном делении ядра A нейтронами с энергией E_n .

Для всех изученных нуклидов величина $\langle T \rangle$ в первом приближении линейно уменьшается с увеличением энергии первичных нейтронов (см., например, [2]). Поэтому информация об энергетической зависимости среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН $\langle T(A, E_n) \rangle$ для делящихся ядер-мишеней ^{238}U , ^{237}U , ^{236}U была получена путем описания измеренных ранее экспериментальных данных линейной зависимостью $\langle T_i(A-i, E_{ni}) \rangle = c_i + d_i \cdot E_{ni}$, где индекс $i = 0, 1, 2$ относится соответственно к реакциям $(n, f1)$, $(n, n'f)$, $(n, 2n'f)$.

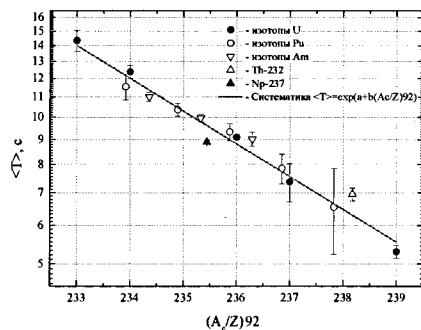
Экспериментально измеренные значения среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ядер ^{238}U и ^{236}U [2, 14] и аппроксимационные прямые представлены на рисунке 10.

Значения $\langle T \rangle$ для ^{237}U , соответствующие энергии быстрых нейтронов (~ 1 МэВ), получены с помощью систематики среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН $\langle T \rangle = \exp(a + b \cdot (A_c/Z) \cdot 92)$, где A_c и Z – массовое число и заряд компаунд-ядра (см. рис. 11) [15, 16]. Значение наклона d_i для энергетической зависимости $\langle T(^{237}\text{U}) \rangle$ принято равным 0,125 с/МэВ.



Сплошная линия – линейная аппроксимация экспериментальных значений

Рисунок 10 – Энергетические зависимости среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ^{238}U (квадраты) и ^{236}U (кружки) быстрыми нейтронами



Сплошная линия – аппроксимация систематической зависимостью $\langle T \rangle = \exp(a + b \cdot (A_c/Z) \cdot 92)$

Рисунок 11 – Систематическая зависимость среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ядер Th, U, Np, Pu, Am быстрыми нейтронами от параметра $(A_c/Z) \cdot 92$ делящегося ядра [15, 16]

Значения E_{n1} и E_{n2} были оценены на основе энергетического баланса реакций, связывающего энергии возбуждения исходного E_A^* и остаточного ядра E_{A-1}^* в процессе испускания предравновесных нейтронов

$$E_A^* = E_{n1} + B_{n,A} \text{ и } E_{A-1}^* = E_A^* - E_n - B_{n,A},$$

с энергиями связи нейтронов B_n из работы [17] и значениями средних энергий предравновесных нейтронов из работы [18], оцененными для реакции $^{238}\text{U}(n, f)$.

Для вычисления среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ядер ^{238}U с помощью выражения (5) в настоящей работе были использованы энергетические зависимости сечений деления из библиотеки ENDF/B-VII.1 [19], а также сечения из работ [18, 20].

Результаты расчетов представлены на рисунке 12 (звезды, ромбы, треугольники, кружки с отливом) вместе со значениями, измеренными экспериментально (квадраты).

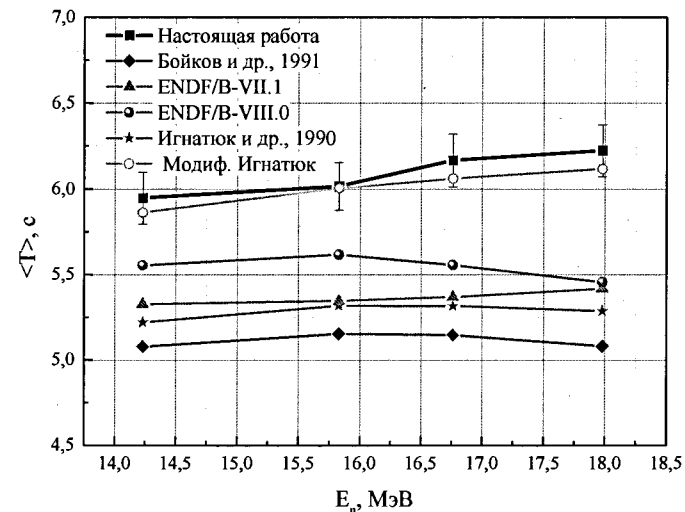


Рисунок 12 – Сравнение энергетических зависимостей средних периодов полураспада ядер-предшественников ЗН при делении ^{238}U , измеренных экспериментально, а также рассчитанных в настоящей работе

Видно, что рассчитанные на основании данных библиотек и работ [18, 20] значения среднего периода полураспада лежат ниже полученных экспериментально. Причиной расхождения могут являться заниженные значения сечений реакции $(n, 2n'f)$ в перечисленных выше работах. Для согласования экспериментальных и вычисленных значений $\langle T \rangle$ была выполнена вариация парциальных сечений $(n, f1)$ и $(n, n'f)$, а сечение $(n, 2n'f)$ было получено с помощью выражения $(n, f1) + (n, n'f) + (n, 2n'f) = (n, f)$. В результате было получено разложение полного сечения деления на парциальные составляющие (см. рис. 13), которое позволило привести в соответствие экспериментальные значения $\langle T \rangle$ с вычисленными. Значения $\langle T \rangle$, вычисленные с использованием модифицированного разложения

полного сечения деления на парциальные (представлены на рис. 12 открытыми кружками), совпадают с измеренными значениями среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН в пределах неопределенностей.

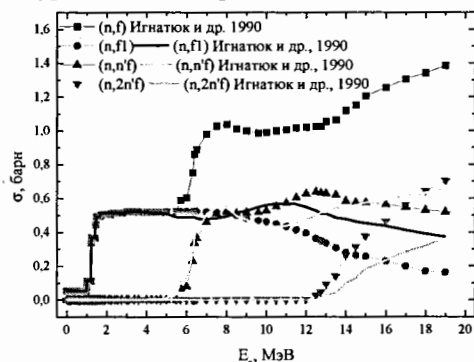


Рисунок 13 – Сравнение модифицированного разложения полного сечения деления на парциальные сечения реакций (n, f) , $(n, n'f)$, $(n, 2n'f)$ с соответствующими данными из работы [20]

предшественников ЗН, на основании данных микроскопических характеристик: вероятностей испускания ЗН (P_n) и периодов полураспада их ядер-предшественников ($T_{1/2}$) и кумулятивных выходов продуктов деления (CY). Полный выход ЗН (v_d) и средний период полураспада ядер-предшественников ЗН ($\langle T_{1/2} \rangle$) могут быть рассчитаны методом суммирования с использованием микроскопических характеристик (см. выражения (6))

$$v_d = \sum_i (CY_i \cdot P_{ni}), \quad \langle T_{1/2} \rangle = \frac{\sum_i (P_{ni} \cdot CY_i \cdot T_{1/2i})}{\sum_i (P_{ni} \cdot CY_i)}, \quad (6)$$

где CY_i – кумулятивный выход i -го ядра-предшественника ЗН, P_{ni} – вероятность испускания ЗН i -м ядром-предшественником, $T_{1/2i}$ – период полураспада i -го ядра-предшественника ЗН.

Возможные расхождения в результатах наиболее вероятно являются результатом неопределенностей баз данных кумулятивных выходов продуктов деления (CY_i) и наборов микроскопических данных ($P_n, T_{1/2}$). Поэтому очевидно, что в случае низкой чувствительности рассчитанных параметров ЗН к наборам данных ($P_n, T_{1/2}$) метод суммирования может быть использован для определения наиболее надежной базы данных выходов продуктов деления, которые представлены в библиотеках оцененных ядерных данных ENDF/B, JEFF, JENDL.

Суммирование проводилось по всем ядрам-предшественникам, представленным в конкретном наборе данных. Для расчетов в качестве вводных данных использовались кумулятивные выходы 368 ядер-предшественников ЗН, содержащиеся в библиотеках оцененных ядерных

В четвертой главе приведено описание метода верификации библиотек оцененных данных выходов продуктов деления с использованием измеренных экспериментально макроскопических данных по запаздывающим нейтронам для верификации библиотек оцененных данных выходов продуктов деления.

Метод заключается в вычислении макроскопических характеристик ЗН, таких как полный выход ЗН и средний период полураспада ядер-

данных JEFF-3.1.1, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 [21]. Также использовались четыре набора данных вероятностей испускания ЗН и периодов полураспада ядер-предшественников ЗН: набор данных, полученный с помощью систематики Кратца-Херрманна [22]; оцененные экспериментальные данные Рудстама [23]; оценка, выполненная на основании экспериментальных данных и систематики [24]; данные, полученные в секции ядерных данных МАГАТЭ на основании всех существующих экспериментальных данных к 2010 году [25].

Рассчитанные методом суммирования полные выходы ЗН и средние периоды полураспада ядер-предшественников ЗН сравнивались с соответствующими рекомендованными значениями [26, 27]. Степень согласия рассчитанных значений с рекомендованными позволила сделать вывод о качестве исследуемых наборов данных выходов продуктов деления и определить наилучший. Наиболее надежный набор данных ($P_n, T_{1/2}$) был выбран по результатам вычисления среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН, так как он может быть экспериментально измерен с большей точностью, чем полный выход ЗН.

Сравнительный анализ показал, что за исключением случая деления ^{239}Pu быстрыми нейтронами лучшим образом себя показывает набор выходов из библиотеки JEFF. Среди наборов микроскопических параметров ($P_n, T_{1/2}$) наиболее надежным является набор МАГАТЭ.

С учетом полученных знаний о наилучших наборах микроскопических параметров ЗН для определения наиболее надежных наборов данных временных параметров ЗН (a_i, T_i) среди представленных в библиотеках ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0, JEFF-3.3, методом суммирования были рассчитаны значения среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН на основании микроскопических параметров (квадраты), данных временных параметров ЗН, представленных в библиотеках ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0, JEFF-3.3 (открытые треугольники, ромбы и пятиугольники, соответственно), также на рисунке кружками представлены рекомендованные значения [28].

По степени различия значений (гистограмма), полученных методом суммирования с использованием микроскопических данных с данными, рассчитанными методом суммирования на основании наборов временных

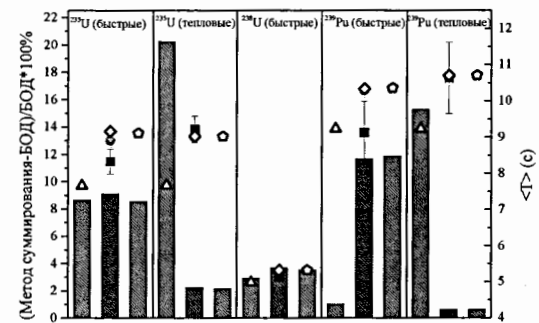


Рисунок 14 – Результаты расчета среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН с использованием метода суммирования на основании последнего, рекомендованного МАГАТЭ, набора ($P_n, T_{1/2}$), а также выходов продуктов деления из библиотек оцененных данных ENDF/B-VIII.0, JENDL-4.0, JEFF-3.3

параметров ЗН, для каждой из рассмотренных делящихся систем определены лучшие наборы временных параметров ЗН. При делении ядер ^{235}U тепловыми и быстрыми нейтронами наилучшим является набор временных параметров ЗН, представленный в библиотеке JEFF-3.3, при делении ядер ^{238}U и ^{239}Pu быстрыми нейтронами наилучшим является набор временных параметров ЗН, представленный в библиотеке ENDF/B-VIII.0, при делении ^{239}Pu тепловыми нейтронами наилучшими являются наборы временных параметров ЗН, представленные в библиотеке JEFF-3.3 и JENDL-4.0 (см. рис. 14).

В заключении кратко изложены основные результаты и выводы выполненной работы:

1. Усовершенствована методика измерения временных характеристик запаздывающих нейтронов для деления ядер ^{235}U немоноэнергетическими нейтронами. Существующая установка была дополнена спектрометром потока первичных нейтронов для оценки характеристик энергетического распределения. Проведение измерений спектров первичных нейтронов из реакции $\text{D}(d,n)$ на твердой мишени позволило обнаружить компоненту спектра, обладающую более низкой энергией, начиная с энергии ускоренных дейтронов 3,5 МэВ.

2. Разработан и применен метод обработки экспериментальных данных с учетом спектральных характеристик источника первичных нейтронов. Использование данного метода позволило провести измерения временных характеристик запаздывающих нейтронов в малоизученном диапазоне энергий первичных нейтронов от 4 до 8 МэВ, генерируемых в реакции $\text{D}(d,n)$ на твердой мишени, и избежать систематических ошибок, допущенных в ранее опубликованных работах. Описанный метод позволяет полностью использовать доступный на ускорителе Тандем-3М диапазон энергий ускоренных дейтронов.

3. Полученные данные временных характеристик запаздывающих нейтронов показывают, в отличие от ранее опубликованных данных, отсутствие разброса значений и демонстрируют рост величины среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН на 12% в области от 5 до 7 МэВ, что связано с ростом вклада реакции эмиссионного деления $^{235}\text{U}(n,n'f)$.

4. Предложен новый подход к измерению временных характеристик запаздывающих нейтронов при делении тяжелых ядер нейтронами, генерируемыми в реакции $\text{T}(d,n)$ на твердой мишени.

5. Экспериментально измерена зависимость падения скорости счета детектора нейтронов от тока дейтронов, бомбардирующих нейтрон-генерирующую мишень. Экспериментально измерена временная зависимость накопления дейтронов в мишени на твердой подложке.

6. В результате проведения экспериментальных исследований с использованием разработанного подхода получены данные временных параметров ЗН при делении ядер ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{241}Am нейтронами с энергиями от 14 до 18 МэВ. Данные для ^{236}U , ^{237}Np , ^{241}Am в данном диапазоне энергий первичных нейтронов получены впервые.

7. Разработаны подходы к верификации оцененных ядерных данных с использованием экспериментальных и рекомендованных макроскопических данных по запаздывающим нейтронам. Впервые для этого использована величина среднего периода полураспада ядер-предшественников ЗН.

8. В терминах среднего периода полураспада ЗН обнаружено, что существующие оценки энергетической зависимости парциальных сечений эмиссионного деления дают заниженные значения относительно экспериментальных данных. На основании экспериментальных данных выдвинута гипотеза о возможном поведении энергетической зависимости сечений $(n, f1)$, $(n, n'f)$ и $(n, 2n'f)$.

9. Предложен подход к верификации библиотек оцененных данных выходов продуктов деления, основанный на использовании метода суммирования и рекомендованных данных макроскопических характеристик запаздывающих нейтронов. Результаты показали, что наилучшие данные выходов продуктов для использования в расчетах при делении ядер ^{235}U тепловыми и быстрыми нейтронами содержатся в библиотеке JEFF-3.3, при делении ядер ^{238}U и ^{239}Pu быстрыми нейтронами – в библиотеке ENDF/B-VIII.0, при делении ядер ^{239}Pu тепловыми нейтронами – в библиотеках JENDL-4.0 и JEFF-3.3.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Gremyachkin, D.E.** Verification of the evaluated fission product yields data from the neutron induced fission of ^{235}U , ^{238}U and ^{239}Pu based on the delayed neutron characteristics / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, K.V. Mitrofanov, A.S. Egorov // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 83. – P. 13-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.02.016>
2. **Gremyachkin, D.E.** Measurement of the temporal characteristics of delayed neutrons from neutron induced fission of ^{237}Np in the energy range from 14.2 to 18 MeV / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, A.S. Egorov, K.V. Mitrofanov // European Physical Journal Web of Conferences. – 2017. – Vol. 146. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714604059>
3. **Гремячкин, Д.Е.** Запаздывающие нейтроны как инструмент для изучения шансовой структуры сечения реакции деления ядра ^{238}U под действием нейтронов с энергией 14–18 МэВ / Д.Е. Гремячкин, В.М. Пиксайкин, А.С. Егоров, В.Ф. Митрофанов, Б.Ф. Самылин, К.В. Митрофанов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 3. – С. 5-16.
4. **Gremyachkin, D.E.** Investigation of the chance structure of the fission cross section of ^{238}U by neutrons in energy range from 14 to 18 MeV using the delayed neutrons / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, A.S. Egorov, V.F. Mitrofanov, K.V.

Mitrofanov // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 118 – 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103068>

5. Piksaikin V.M. Generation of correlation and covariance matrices for the recommended temporal DN parameters in 6- and 8-group models / Piksaikin V.M., Egorov A.S., Gremyachkin D.E., Mitrofanov K.V., Mitrofanov V.F. // European Physical Journal Nuclear Sci. Technol. 6, 54 (2020) DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2020013>

6. Dimitriou, P. Development of a Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission / Dimitriou P., Dillmann I., Singh B., Piksaikin V., Rykaczewski K.P., Tain J.L., Algora A., Banerjee K., Borzov I.N., Cano-Ott D., Chiba S., Fallot M., Foligno D., Grzywacz R., Huang X., Marketin T., Minato F., Mukherjee G., Rasco B.C., Sonzogni A., Verpilli M., Egorov A., Estienne M., Giot L., Gremyachkin D., Madurga M., McCutchan E.A., E. Mendoza, K.V. Mitrofanov, M. Narbonne, P. Romojaró, A. Sanchez-Caballero, N.D. Scielzo // Nuclear Data Sheets. – 2021. – Vol. 173. – P. 144–238 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2021.04.006>

Тезисы докладов:

7. Gremyachkin, D.E. The Total Number of Delayed Neutrons and Average Half-Life of Their Precursors in the Neutron Induced Fission of U-235, U-238, Pu-239 (Summation Method) / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, V.Yu. Poryvaev, K.V. Mitrofanov // Proc. of XXII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (27-30 May 2014, Dubna). – 2014. – P. 60-69

8. Gremyachkin, D.E. Measurements of temporal characteristics of delayed neutrons from neutron induced fission of the Np-237 in energy range from 14.2 to 18 MeV / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, K.V. Mitrofanov, A.S. Egorov // Proc. of XXIV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (25-29 May 2016, Dubna). – 2016. – P. 380-386

9. Gremyachkin, D.E. Measurements of the Temporal Characteristics of Delayed Neutrons from Neutron Induced Fission of ^{241}Am in the Energy Range from 14.2 to 18 MeV / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, A.S. Egorov, K.V. Mitrofanov // Proc. XXV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (22-26 May 2017, Dubna). – 2018 – P. 363-369.

10. Gremyachkin, D.E. Measuring Method of the Delayed Neutron Time Parameters for U-236 Fission by Neutrons with Energies from 14 to 18 MeV / D.E. Gremyachkin, V.M. Piksaikin, A.S. Egorov, V.F. Mitrofanov, K.V. Mitrofanov // Proc. XXVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (10-14 June 2019, Dubna). – 2020. – P. 221-226.

Список литературы

1. National Instruments: <https://www.ni.com/> (дата обращения 11.12.2020)
2. Piksaikin, V.M. Energy Dependence of Relative Abundances and Periods of Delayed Neutrons from Neutron Induced Fission of U-235, U-238, Pu-239 in 6- and 8-group Model Representation / V.M. Piksaikin, L.E. Kazakov, S.G. Isaev, M.Z. Tarasko, V.A. Roshchenko, G.D. Spriggs, J.M. Campbell // Progress in Nuclear Energy. – 2002. – Vol. 41. – No.1-4. – P.203-222.
3. Кухтевич, В.И. Однокристалльный сцинтилляционный спектрометр (с органическим фосфором) / В.И. Кухтевич, Л.А. Трыков, О.А. Трыков // – М., – 1971. 136 с.
4. Rose, H. "Delayed Neutron Investigations with the ZEPHYR Fast Reactor, Part II—The Delayed Neutrons Arising from Fast Fission in ^{235}U , ^{233}U , ^{238}U , ^{239}Pu , and ^{232}Th / H. Rose, R.D. Smith J. // Nucl. Energy. – 1957. – Vol. 4. – P. 133.
5. Besant, C.B. Absolute Yields and Group Constants of Delayed Neutrons in Fast Fission of ^{235}U , ^{238}U , and ^{239}Pu / C.B. Besant, P.J. Challen, M.H. McTaggart, P. Tavoularidis, J.G. Williams // Nucl. Energy Soc. – 1977. Vol. 16. P. 161.
6. Keepin, G.R. Delayed Neutrons from Fissionable Isotopes of Uranium, Plutonium, and Thorium / G.R. Keepin, T.F. Wimett, R.K. Zeigler // Physical Review. – 1957. – Vol. 107. – No. 4. – P. 1044.
7. Cox, S.A. Energy Dependence of the Delayed Neutron Yield from Neutron Induced Fission of ^{232}Th , ^{235}U , and ^{238}U / S.A.Cox, E.E.D. Whiting // Reactor Physics Division Annual Report, ANL-7410. – 1968. 26 p.
8. Gudkov, A.N. Determining Delayed-Neutron Group Yields for Fast Neutron ^{235}U and ^{241}Am / A.N. Gudkov, S.V. Krivasheev, A.B. Koldobskii, E.Y. Bobkov, Y.F. Koleganov, A.V. Zvonarev, V.B. Pavlovich // Sov. Atomic Energy. – 1989. – Vol. 67. – No. 3. – P. 702.
9. Loaiza, D. Measurement of Delayed-Neutron Parameters for ^{235}U / D. Loaiza, G. Brunson, R. Sanchez // Trans. Amer. Nucl. Soc. – 1997. – Vol. 76. – P. 361
10. Roshchenko, V.A. Relative yield of delayed neutrons and half-life of their precursor nuclei with fissioning of ^{239}Pu by 14.2-17.9 MeV neutrons / V.A. Roshchenko, V.M. Piksaikin, L.E. Kazakov, G.G. Korolev // Atomic Energy. – 2006. – Vol. 101. – No 6. – P. 897-900.
11. Caldwell, J.T. Experimental Determination of Photofission Neutron Multiplicities for ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , and ^{232}Th Using Monoenergetic Photons / J.T. Caldwell, E.J. Dowdy, R.A. Alvarez, B.L. Berman, P. Meyer // Nuclear Science and Engineering. – 1980. – Vol. 73, – No. 2, – P. 153-163.
12. Frehaut, J. Progress in transactinium isotope neutron data measurements / J. Frehaut // Proc. III Advisory Group Meeting on Transactinium Isotope Nuclear Data. Upsala, 1984. IAEA-TECDOC-336, – 1985. – P. 105-145.
13. Piksaikin, V.M. Characteristics of delayed neutrons: systematics and correlation properties / V.M. Piksaikin, S.G. Isaev, A.A. Goverdovski // Prog. Nucl. Energy. – 2002. – Vol. 41. – P. 361-384.

14. Piksaikin, V.M. The absolute total delayed neutron yields, relative abundances and half-lives of delayed neutron groups from neutron induced fission of ^{232}Th , ^{233}U , ^{236}U , ^{239}Pu and ^{241}Am / V.M. Piksaikin, A.S. Egorov, K.V. Mitrofanov // INDC(NDS)-0646, Vienna, Austria. – 2013. 38 p.
15. Egorov, A.S. Measurement of the delayed neutron characteristics in the interaction of relativistic protons with ^{238}U nuclei / A.S. Egorov, V.M. Piksaikin, A.A. Goverdovski, D.E. Gremyachkin, K.V. Mitrofanov, V.F. Mitrofanov, B.F. Samylin, L.A. Vaishnene, F.V. Moroz, A.S. Vorobyev, O.A. Shcherbakov // Progress in Nuclear Energy. – 2017. – Vol. 97. – P. 106-114.
16. Roshchenko, V.A. Temporary characteristics of delayed neutrons and partial cross sections of emissive fission in fission of ^{232}Th by neutrons in the energy range from 3.2-17.9 MeV / V.A. Roshchenko, V.M. Piksaikin, G.G. Korolev, A.S. Egorov // Nuclear Physics. – 2010. – Vol.73, – No.6. – P. 947-955.
17. Сви́рин, М.И. Особенности формы спектров, сопровождающих эмиссионное деление ^{238}U нейтронами / М.И. Сви́рин, Г.Н. Ловчикова, А.М. Труфанов // Ядерная физика. – 1997. – Т. 60. – No.5. – С. 812–832
18. Бойков, Г.С. Спектр нейтронов при делении ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U нейтронами с энергией 2,9 и 14,7 МэВ (ниже и выше порога эмиссионного деления) / Г.С. Бойков, В.Д. Дмитриев, Г.А. Кудяев, Ю.Б. Остапенко, М.И. Сви́рин, Г.Н. Смиринкин // Ядерная физика. – 1991. – Т. 53. – No.3. – С. 628-647.
19. Библиотека оцененных данных ENDF/B-VII.1: <https://t2.lanl.gov/nis/data/endl/> (дата обращения 28.08.19)
20. Игнатюк, А.В. Описание сечений деления трансурановых ядер быстрыми нейтронами / А.В. Игнатюк, В.М. Маслов // Ядерная Физика. – 1990. – Т. 51. – No.5. – С. 1227–1237.
21. JANIS Database. Режим доступа: <http://www.oecd-neo.org/janis/>. (дата обращения 28.08.17)
22. Pfeiffer, B. Status of delayed neutron precursor data: half-lives and neutron emission probabilities / B. Pfeiffer, K.-L. Kratz, P. Moller // Prog. Nucl. Energy. – 2002. – Vol. 41. – P. 39-69.
23. Rudstam, G. Delayed-neutron branching ratios of precursors in the fission product region / G. Rudstam, K. Aleklett, L. Sihver // At. Data Nucl. Data Tables. – 1993. – Vol. 53. – P. 1-22.
24. Wilson, W. Delayed Neutron Study Using ENDF/B-6 Basic Nuclear Data. / W. Wilson, T. England // Progress in nuclear energy – 2002. – Vol. 41. - P. 71-107
25. Abriola, D. Beta-delayed Neutron Emission Evaluation / D. Abriola, B. Singh, I. Dillmann // IAEA Report INDC(NDS)-0599/BN, G, ND. IAEA, Vienna, Austria – 2011. 78 p.
26. D'Angelo, A. Conclusions concerning the delayed neutron data for the major actinides / A. D'Angelo, J.L. Rowlands // Progress in nuclear energy. – 2002. – Vol. 41. – P. 391-412.

27. Spriggs, G.D. An 8-group delayed neutron model based on a consistent set of half-lives / G.D. Spriggs, J.M. Campbell, V.M. Piksaikin // Prog. Nucl. Energy – 2002. – Vol. 41. – P. 223-251.
28. Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission. <https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/database.html> (дата обращения 22.10.21)