

Черникова Дина Николаевна

**Анализ временных распределений излучений для оптимизации
установок неразрушающего контроля делящихся материалов с
импульсными нейтронными генераторами**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва, 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего профессионального образования
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор,
Ромоданов Вадим Леонидович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
Крамер-Агеев Евгений Александрович (НИЯУ МИФИ)

кандидат физико-математических наук,
Матвеевко Игорь Павлович (ГНЦ РФ-ФЭИ)

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский ин-
ститут автоматики им. Н.Л.Духова»

Защита состоится “13” октября 2010 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.07
в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу:
115409, Москва, Каширское ш., д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан “___” сентября 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
НИЯУ МИФИ

С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Проблема учета и контроля делящихся материалов (ДМ) является одной из важнейших в мире, так как в значительной степени определяет его стабильность. Возможная утечка ДМ в страны, не подписавшие договор об их нераспространении, а также в террористические организации, может привести к самым тяжелым последствиям, и поэтому мировая общественность уделяет значительное внимание вопросам контроля за перемещением ядерных материалов. В настоящее время стало необходимо развитие физических методов, связанных с анализом состава изделий ядерной энергетики и их обнаружением в случае несанкционированного провоза ДМ через государственные границы. Решение этой проблемы в значительной мере определяет безопасную эксплуатацию ядерных объектов и снижает риск актов ядерного терроризма.

Изучение новых путей контроля и обнаружения ДМ, которые открываются в устройствах с использованием импульсных нейтронных источников в комбинации с различными замедлителями нейтронов является перспективным направлением в создании инновационных установок неразрушающего контроля ДМ, отличающихся меньшими затратами на изготовление, универсальностью систем детектирования откликов ДМ, допускающими массовое производство и экологически безопасными при их эксплуатации. При этом возникает возможность получения в установках нейтронов разных энергий, что значительно расширяет область инспектируемых объектов, улучшает качество инспекции, а также обнаружение и идентификацию ДМ в контейнерах, не подлежащих вскрытию. В диссертации рассматриваются новые физические методы и основанные на их разработке установки, которые возможно использовать при контроле состава ДМ в тепловыделяющих сборках (ТВС) ядерных реакторов и обнаружения ДМ в аэропортах, даже в тех случаях, когда они сознательно скрываются поглощающими зондирующее излучение экранами.

Цель работы

Целью диссертационной работы является:

1. Разработка физических и методических основ установок неразрушающего контроля и обнаружения ДМ с импульсными нейтронными генераторами с целью оптимизации их параметров, повышения чувствительности, экономичности, потребительской ценности и радиационной безопасности на базе анализа нестационарных полей нейтронов и фотонов.
2. Определение параметров установок активного неразрушающего контроля и обнаружения ДМ с импульсными нейтронными генераторами.

Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна работы заключается в предложенных подходах и разработанных методах анализа временных и энергетических распределений полей излучений с различными реакциями получения нейтронов, на основе которых возможна разработка и создание инновационных установок обнаружения и неразрушающего контроля ДМ с импульсными нейтронными источниками в комбинации с различными замедлителями нейтронов. К ним относятся:

1. Впервые на основе проведенных исследований временных и энергетических характеристик полей излучений портативных генераторов ИНГ-06 и ИНГ-031, получены параметры, определяющие области их применимости в экспериментальных исследованиях.
2. Предложена новая матрица временных интервалов для отдельного определения откликов ^{235}U и ^{239}Pu по времени замедления быстрых нейтронов в свинце.
3. Предложен новый метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками с помощью использования составных сцинтилляторов.
4. Впервые получены зависимости между энергией нейтронов и временем ее достижения в процессе замедления нейтронов в свинце для различных библиотек ядерных констант.
5. Получены оптимальные геометрические и материальные параметры, а также временные соотношения полей излучений установок обнаружения и контроля ДМ на базе различных замедлителей с использованием импульсных нейтронных источников с DD и DT реакциями получения нейтронов.
6. Определены параметры установки с графитовым замедлителем и импульсным нейтронным источником для контроля ДМ в ТВС ядерных реакторов.
7. Определены параметры прототипа реальной установки обнаружения ДМ в аэропортах с помощью нейтронов разных энергий в случаях, когда ДМ скрывается экранами, поглощающими зондирующее излучение.

Практическая значимость работы определяется разработанными физическими методами и полученными рекомендациями, которые могут быть использованы при создании установок активного неразрушающего обнаружения и контроля ДМ в ТВС ядерных реакторов и была экспериментально подтверждена на примере создания прототипа установки обнаружения ДМ в аэропортах, морских портах и т. д. Реализация результатов работы открывает пути конструирования установок, отличающихся экономичностью, универсальностью систем цифрового детектирования откликов ДМ, допускает промышленное производство устройств и их безопасную эксплуатацию в условиях таможенных пунктов аэропортов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчетов констант временного спада и диффузионных констант воды, графита и бериллия, для которых определено влияние термализационного блока ядерных данных программы MCNP-4c2 на величины отклонений расчетных данных от экспериментальных значений.
2. Зависимости между энергией нейтронов и временем ее достижения в процессе замедления нейтронов в свинце, полученные для различных библиотек ядерных констант.
3. Стационарные и нестационарные спектры нейтронов и вторичных фотонов, формируемые в воздухе вокруг нейтронных генераторов ИНГ-06 и ИНГ-031 за счет взаимодействия нейтронов мишени с конструкционными материалами.
4. Метод отдельного определения откликов ^{235}U и ^{239}Pu по времени замедления быстрых нейтронов в свинце на основе матрицы временных интервалов, позволяющий значительно уменьшить эффект самоэкранировки.
5. Метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками с помощью использования составных сцинтилляторов.
6. Параметры прототипа установки обнаружения делящихся и радиоактивных материалов в аэропортах, морских портах и т.д.

Личный вклад автора

Все результаты расчетных исследований и анализ временных распределений нейтронных и фотонных полей с целью оптимизации и повышения чувствительности, экономичности, потребительской ценности и радиационной безопасности установок неразрушающего контроля и обнаружения ДМ нового типа с импульсными нейтронными генераторами получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор разработал и обосновал метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками и предложил метод тестирования библиотек ядерных данных на основе временных распределений нейтронов и фотонов. Непосредственно автором проведено исследование нейтронных и фотонных полей портативных импульсных нейтронных генераторов ИНГ-06 и ИНГ-031 и получены критерии их применимости в установках активного неразрушающего контроля нового типа.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии. Работа изложена на 164 страницах, содержит 106 рисунков, 15 таблиц и список цитируемой литературы из 52 наименований.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы доклаживались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: 3rd International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (7 – 12 июня 2010, Киев, Украина), International Conference “Addressing the Issue of Potential Terrorism and Guarding against Weapons of Mass Destruction in Central Asia” (12 – 14 апреля 2010, Душанбе, Таджикистан), Cooperation Meeting between the International Science and Technology Centre (ISTC) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) (декабрь 2008, Москва, Россия), 2 International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (8 – 13 июня 2008, Киев, Украина), IAEA International Conference on Illicit Nuclear Trafficking Collective Experience and the Way Forward (Scotland, Edinburg, 2007), Annual 47 Meeting of INMM (USA, Nashville, 2006).

Работа выполнена в рамках проектов:

1. МНТЦ №2978 “Цифровая технология обнаружения и контроля делящихся материалов в установках с импульсными нейтронными источниками”
2. Хоздоговор с ВНИИ Автоматики им. Духова Н.Л. Контракт №00-5-005-1658. Исследование энергетических спектров нейтронов и фотонов генераторов ВНИИА.
3. Грант Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области естественных, технических и гуманитарных наук. “Исследование чувствительности временных и энергетических распределений полей излучений к вариациям ядерных данных”.
4. Госконтракт № 02.740.11.0188 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме: «Комплексные исследования и оптимизация интенсивных импульсных источников нейтронов» шифр заявки «№ 2009-1.1-414-046-004».
5. Госконтракт № Н.4в.44.90.10.1104 от 12 апреля 2010 г. Тема 00-3-005-2091.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 17 работ (в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК), список которых приведен в конце автореферата.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор физических методов и установок активного контроля и обнаружения ДМ, указаны их достоинства и недостатки. Создание установок активного неразрушающего контроля и обнаружения ДМ с заданными параметрами является сложной задачей, решение которой носит системный характер. Это связано не только с правильным выбором физического метода и материалов установки, но также с конкретной аппаратурной реализацией детектирующих устройств и оптимальным соотношением конструктивных размеров всех ее элементов, дающих необходимую точность измерений ДМ при заданном по условиям эксплуатации установки времени. Следует также учесть, что иногда наилучший физический метод измерения ДМ (например, в таможенных пунктах аэропортов) может оказаться неприемлемым в силу экономических условий промышленной реализации, радиационной опасности и эксплуатации установок с присутствием высококвалифицированного персонала.

Несмотря на большое количество разработанных методов и установок контроля и обнаружения ДМ, активным методам контроля в настоящее время не уделяется должного внимания. Еще меньше публикаций об устройствах, в которых используются импульсные нейтронные источники. Процесс поиска оптимальных параметров установок с использованием импульсных нейтронных источников, нельзя полностью решить только экспериментальным путем, так как это слишком сложно и неэкономично. Требуется значительная доля расчетных исследований для поиска оптимальных параметров геометрического и материального состава установок, а также временных условий измерений для различных детектирующих устройств, работающих с импульсными нейтронными источниками. В результате исследований создается расчетная модель установки, которая позволяет моделировать необходимые процедуры получения информации о контролируемых образцах. При этом требуется детальное моделирование поведения нейтронов и фотонов в сложной трехмерной геометрии с получением зависимостей пространственных и временных распределений функционалов деления ДМ.

В настоящей работе использовался метод Монте-Карло в виде программной версии MCNP-4C2, и при этом полученные результаты можно рассматривать как «численный эксперимент». Основную неопределенность в расчетные данные, полученные методом Монте-Карло, вносит константная составляющая. На текущий момент нет систематических исследований о влиянии ядерных данных различных библиотек на расчетные результаты характеристик нестационарных полей нейтронов и фотонов в установках не-

разрушающего контроля ДМ. Поэтому исследованию чувствительности результатов расчетов различных функционалов нестационарных нейтронных и фотонных полей при использовании разных библиотек ядерных данных в диссертации уделяется большое внимание.

Во второй главе представлены расчетные исследования временных распределений нейтронов в различных замедлителях нейтронов для DD и DT реакций, реализуемых в импульсных нейтронных источниках. Сферические образцы замедлителей были выбраны с целью сведения к минимуму пространственных гармоник при получении зависимости плотности потока тепловых нейтронов от времени после импульса нейтронов источника. В качестве легких материалов были взяты вода, углерод и бериллий, а тяжелых - свинец. В расчетах использовались точечные изотропные моноэнергетические источники, расположенные в центре сферических образцов замедлителей. На начальном этапе расчетов исследовалось влияние термализационного блока (функции рассеяния $S(\alpha, \beta)$), входящего в систему констант программы MCNP-4C2 на характеристики временных распределений плотностей потоков тепловых и эпитепловых нейтронов. При этом в качестве библиотеки переносных констант использовалась библиотека сечений ENDF/B-VI.6. Определялись константы спада плотности потока тепловых нейтронов для замедлителей разных размеров, соответствующих ранее принятому ряду, достаточному для экспериментального определения диффузионных констант методом импульсного нейтронного источника. Это дало возможность вычислить сечения поглощения, коэффициент диффузии и коэффициент диффузионного охлаждения всех исследуемых легких замедлителей. Все вычисления проводились с учетом и без учета термализационного блока с целью выяснения его влияния на константы временного спада и конечные результаты расчетных значений диффузионных констант замедлителей, которые в дальнейшем сравнивались с экспериментальными данными.

В результате сравнения расчетных и экспериментальных констант временного спада тепловых нейтронов было получено, что наибольшее влияние термализационный блок имеет для воды. В водном замедлителе расхождение экспериментальных и расчетных значений констант спада для DT реакции достигает 60%, для графита все расчетные результаты занижаются по сравнению с экспериментальными на (7-15)% и практически не зависят от присутствия термализационного блока, а для бериллия наблюдаются небольшие расхождения только для малых значений радиусов.

Вычисленные диффузионные константы замедлителей сравнивались с экспериментальными значениями, и их расхождения даны в таблице 1.

Также было рассчитано время достижения максимума плотности потока тепловых нейтронов после импульса нейтронов источника в бериллии и графите. Оно оказалось слабо зависящим от радиуса сфер и равным (20-25) мкс для бериллия и (55-60) мкс для графита.

Таблица 1

Расхождения расчетных и экспериментальных диффузионных параметров замедлителей для источника нейтронов DT реакции, %

Замедлитель нейтронов	Диффузионные параметры замедлителей		
	$\Sigma_a V$	DV	C
Вода	4	5	87
Графит	15	4	7
Бериллий	3	1	19

Были показаны преимущества использования той или иной реакции получения нейтронов импульсных источников в установках неразрушающего контроля и обнаружения ДМ, спроектированных на основе различных замедлителей нейтронов. На основе определения доли нейтронов, которые доходят до тепловой энергии в легких замедлителях и при энергии нейтронов 4,9 эВ в свинцовой сфере на один испущенный нейтрон источника в DT и DD реакциях было выявлено, что для водородосодержащего замедлителя использование DD реакции в 5-8 раз эффективнее для получения тепловых нейтронов, чем использование DT реакции. Похожая ситуация наблюдается в графите, где DD источник нейтронов в 2 раза выгоднее, чем DT. Для бериллия, наоборот, для получения тепловых нейтронов DT реакция эффективнее в 2-3 раза, а для свинца использование DT реакции для получения нейтронов в электронвольтовой области энергий от 2 до 7 раз выгоднее, чем использование DD реакции. Анализ проведенных исследований показал, что с учетом радиационной обстановки DD реакция имеет предпочтение в тех случаях, когда установка работает во внелабораторных условиях (например, помещениях аэропортов) и при этом ограничена в выходе нейтронов нейтронного генератора.

В работе предлагается подход к тестированию ядерных констант, находящихся в различных библиотеках ядерных данных, который опирается на возможность сравнения результатов расчетов функционалов нестационарных полей нейтронов и фотонов с соответствующими экспериментальными значениями при действии импульсных источников нейтронов. При этом тестирование ядерных данных соответствует изменяющимся спектрам нейтронов и фотонов, формируемым в материалах и установках в различное время после импульса нейтронов источника. Основой тестирования является сравнение временных параметров устройств неразрушающего контроля ДМ, таких как константы временного спада полей нейтронов разных энергий и скорости делений различных нуклидов во временных интервалах их измерения после импульса нейтронов источника.

При таком подходе во всех спектрах излучений и их функционалах отсутствует информация о нейтронах источника, а также и об анизотропии характеристик их вылета из источника, что повышает достоверность сравниваемых экспериментальных и расчетных данных. Для оценки чувствительности расчетных характеристик временных и энергетических распределений нейтронов и вторичных фотонов в различных замедлителях к вариации ядерных данных были проведены расчеты временных распределений плотности потока тепловых нейтронов в сферических замедлителях различных радиусов для импульсных источников нейтронов DT и DD реакций.

Для оценки погрешностей результатов, связанных с различными библиотеками констант, были рассчитаны относительные отклонения результатов от данных, полученных при решении той же задачи с использованием библиотеки ENDF/B-VI.6. На рис. 1 показаны примеры наблюдаемых относительных отклонений плотностей потока тепловых нейтронов в водном и графитовом замедлителях. Подобные результаты получены для надтепловых нейтронов и вторичных фотонов для водного, графитового и бериллиевого замедлителей.

С целью сравнения измеренных в эксперименте скоростей деления урановых образцов с результатами их расчета по различным библиотекам ядерных данных была создана экспериментальная установка, представляющая собой модель установки неразрушающего обнаружения или контроля ДМ на основе графитового замедлителя нейтронов, в которой в одном эксперименте возможно реализовать облучение образцов, как тепловыми, так и эпитепловыми нейтронами. Модель соответствует установке обнаружения ДМ в аэропортах или контроля состава низкообогащенных ТВС ядерных реакторов. Внутри установки имеется полость, в которую помещаются инспектируемые образцы ДМ.

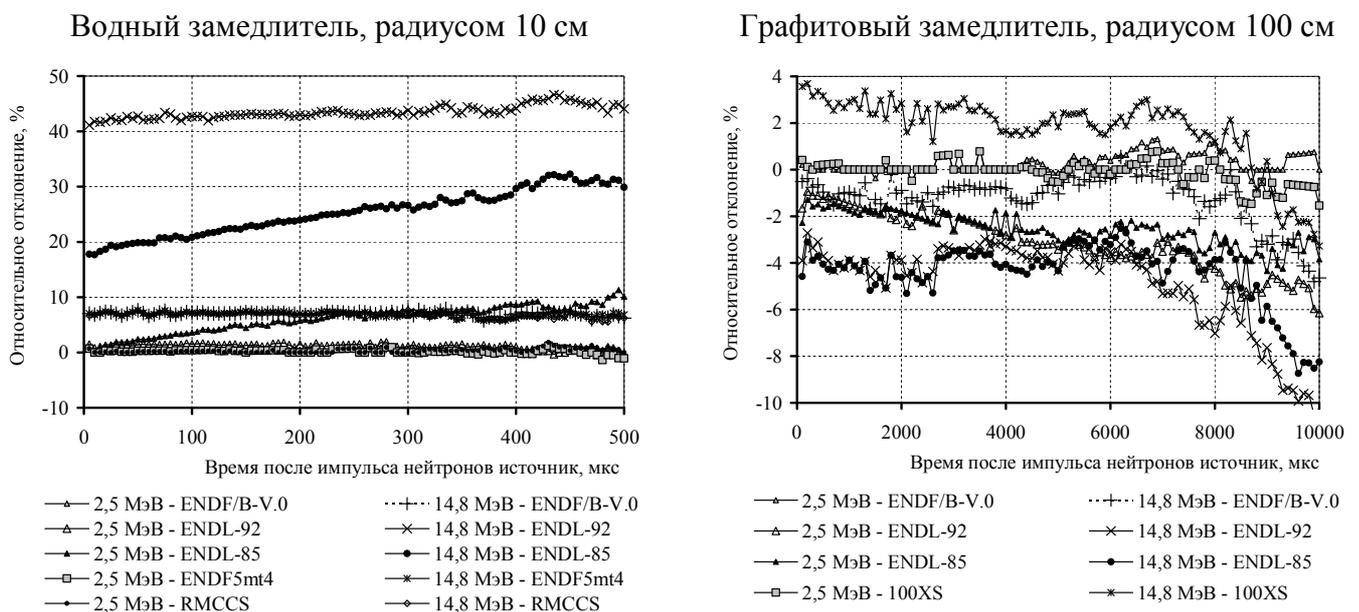


Рис. 1. Временные зависимости относительного отклонения рассчитанной плотности потока тепловых нейтронов с различными библиотеками констант в замедлителях для DT и DD реакций.

Измерения временных зависимостей откликов нейтронов деления урановых образцов проводились с помощью стильбенового сцинтиллятора. Измерялся отклик нейтронов от трех цилиндрических блоков урана с общей массой ^{235}U равной 96 граммам и обогащением 2%. Диаметр блоков составлял 31 мм при высоте 120 мм. Использовался импульсный нейтронный генератор ИНГ-031 с DT реакцией получения нейтронов.

Проведенный анализ полей нейтронов в графитовой установке позволил оценить относительные отклонения временных зависимостей скоростей делений уранового образца на эпитепловых и тепловых нейтронах, рассчитанных с разными библиотеками ядерных данных, от экспериментально полученных значений скоростей реакций. Оказалось, что для всех библиотек значения расчетных констант временного спада скоростей деления ниже экспериментальных значений. При этом наибольшее отклонение $\sim 12\%$ наблюдается для библиотеки ENDF/B-VI.2, наименьшее $\sim 3\%$ для библиотеки ENDF/B-VI.6, а для остальных библиотек значения отклонений находятся в пределах от 5% до 8%.

Была проведена серия расчетов временных и энергетических распределений плотности потока нейтронов в свинцовых сферических замедлителях с импульсным нейтронным источником, частичные результаты которых представлены на рис. 2. Расчеты проводились с различными библиотеками констант. Были получены относительные отклонения времени замедления нейтронов и плотности потока нейтронов в максимуме энергетического распределения от эмпирических значений для источника нейтронов с энергией 14,3 МэВ. Некоторые результаты даны на рис. 3. Проведен анализ полученных результатов и построены диаграммы отклонений результатов расчетов от аналогичных данных, полученных с библиотекой ENDF/B-VI.6.

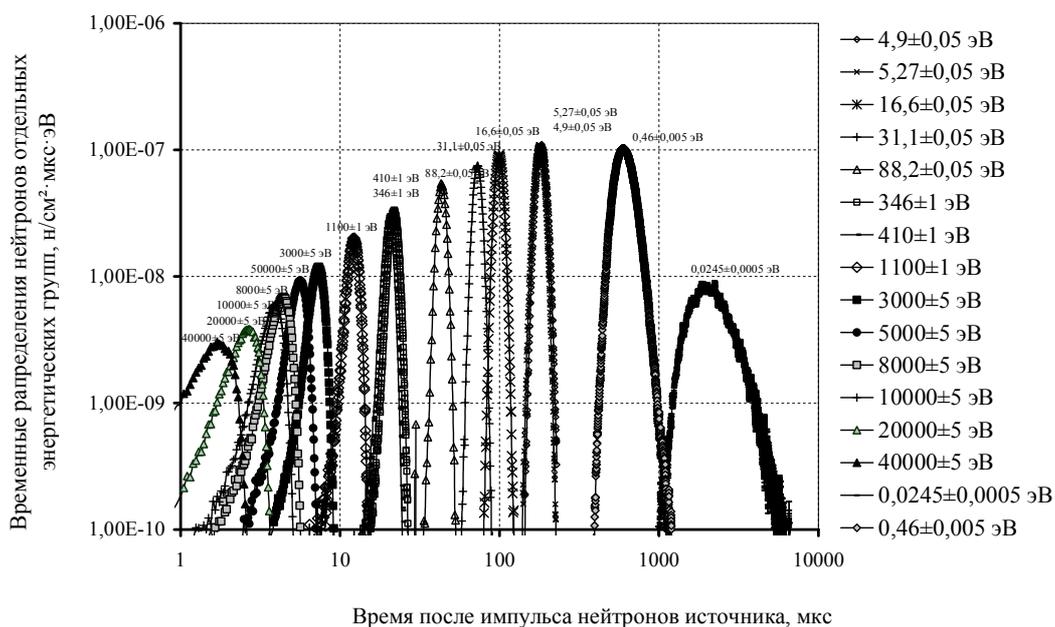


Рис.2. Временные зависимости плотности потока нейтронов для различных энергетических интервалов на расстоянии 60 см от источника нейтронов с энергией 14,3 МэВ в шаре из свинца радиусом 120 см, рассчитанные с использованием библиотеки ENDF/B-VI.6.

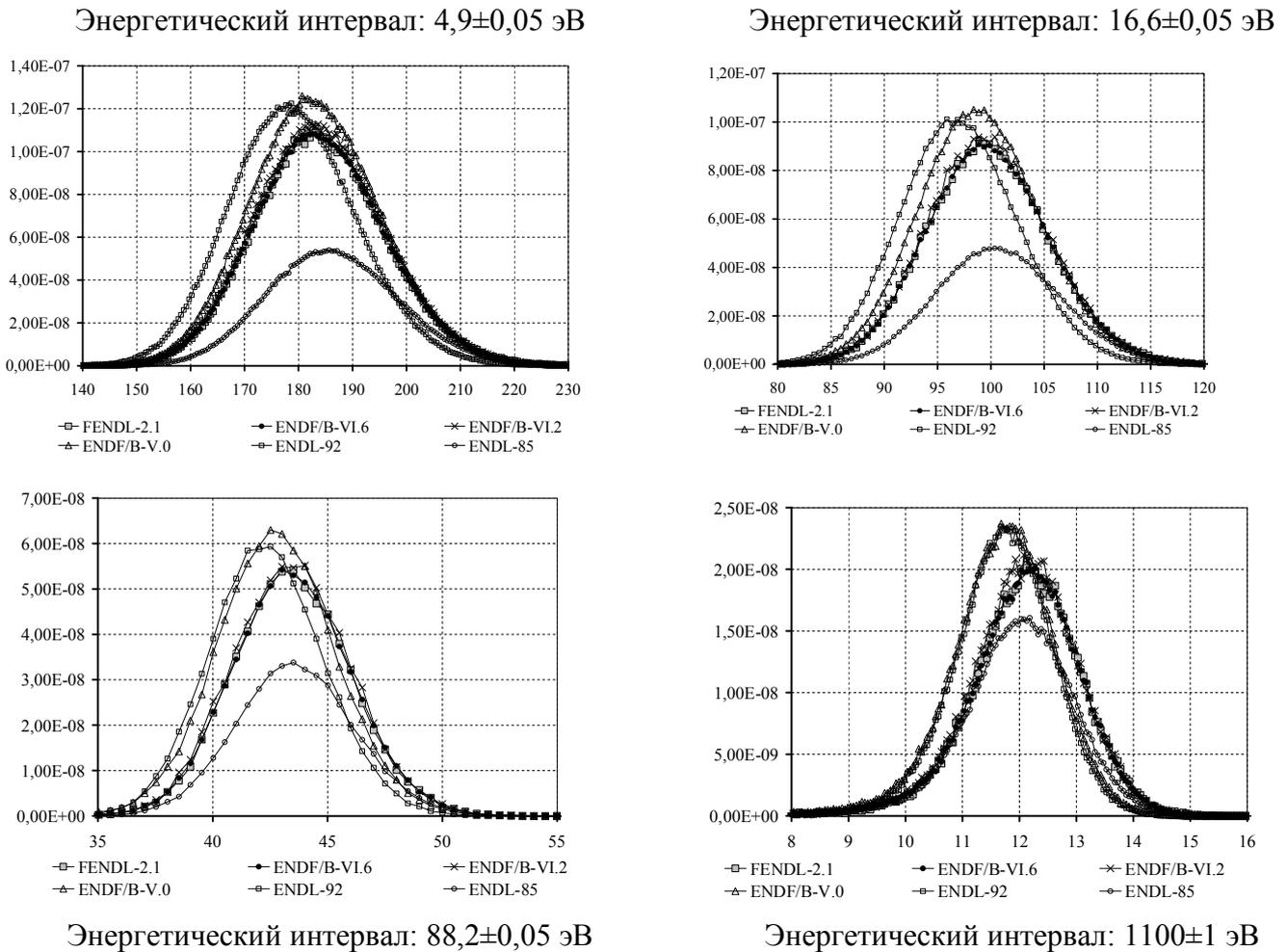


Рис. 3 Временные зависимости плотности потока нейтронов в свинце для различных энергетических интервалов, рассчитанные с использованием различных библиотек ядерных данных.

В третьей главе даны расчетные характеристики полей излучений, создаваемых портативными импульсными нейтронными генераторами. Принято считать, что они излучают моноэнергетические нейтроны в зависимости от используемой DD или DT реакций и являются изотропно излучающими источниками. Однако, проходя через конструкционные материалы нейтроны, рассеиваются и поглощаются ими. Это приводит к изменению углового и энергетического распределений нейтронов и образованию вторичного фотонного излучения.

Источником нейтронов в программе MCNP являлась тонкая дисковая тритиевая мишень; угловое и энергетическое распределение вылетающих из мишени нейтронов получено из кинематического расчета, выполненного для точечной мишени. Угловое распределение нейтронов принималось равновероятным в диапазоне от 0° до 180° . Вычислялись энергетические, угловые и временные распределения плотности потока нейтронов и вторичных фотонов в точках на расстоянии 1 м от центра мишени генератора. Принималось следующее энергетическое распределение нейтронов по группам: (13-15) МэВ – нейтроны, соответствующие энергии нейтронов мишени, (1-13) МэВ – нейтроны, с энергиями меньшими энергии нейтронов мишени, нейтроны с энергиями от 0,46 эВ до 1 МэВ и тепловые нейтроны с энергиями ниже 0,46 эВ.

На рис. 4 даны угловые распределения полной плотности потока нейтронов и вторичных фотонов при наличии и отсутствии конструкционных материалов и результаты кинематического расчета.

Соотношения между отдельными энергетическими группами нейтронов даны на рис. 5, Видно, что, замедленные нейтроны могут давать вклад до нескольких процентов в полную плотность потока нейтронов. Характерной особенностью полей излучений вокруг генераторов является появление вторичного фотонного излучения (рис. 6), как результат взаимодействия нейтронов, испущенных мишенью, с конструкционными материалами генератора. Причем спектр фотонного излучения охватывает широкий энергетический диапазон, достигающий до 8 МэВ.

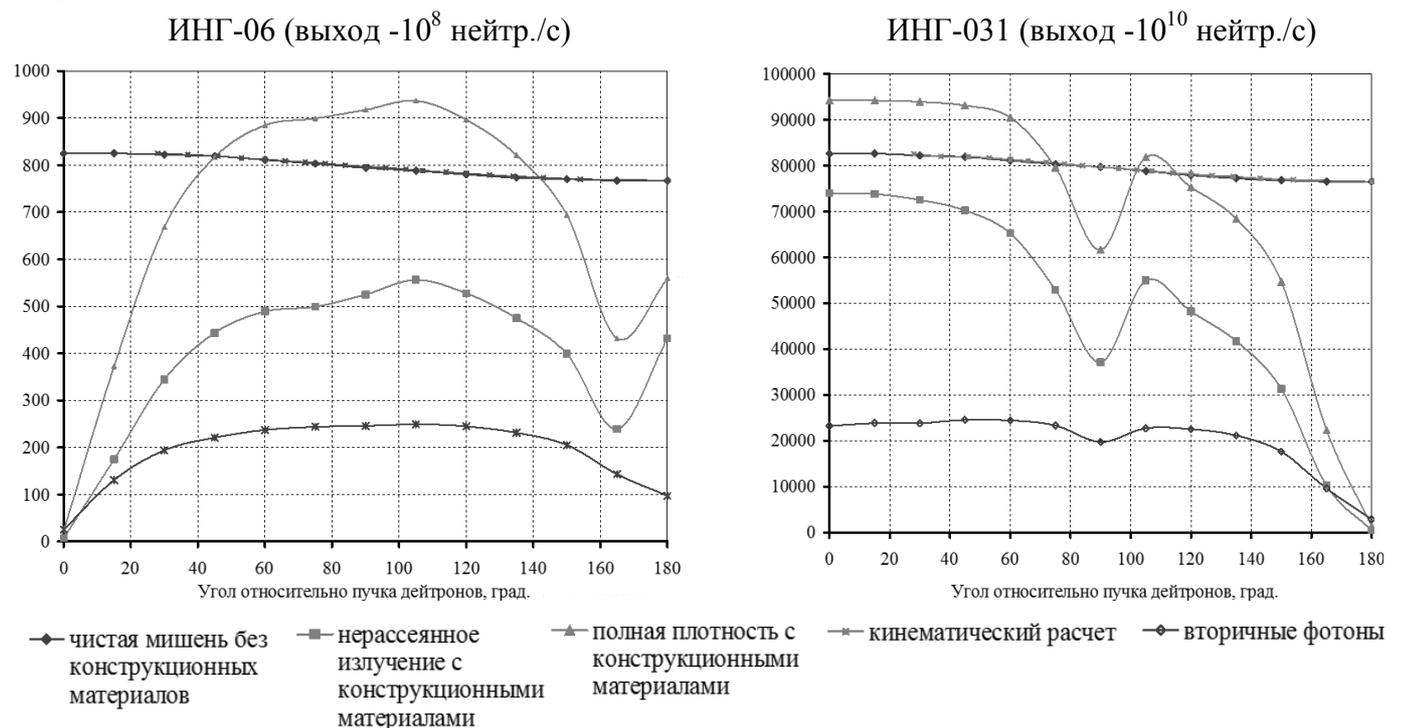


Рис. 4. Плотности потоков нейтронов и вторичных фотонов в точках на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ под различными углами относительно направления потока дейтронов.

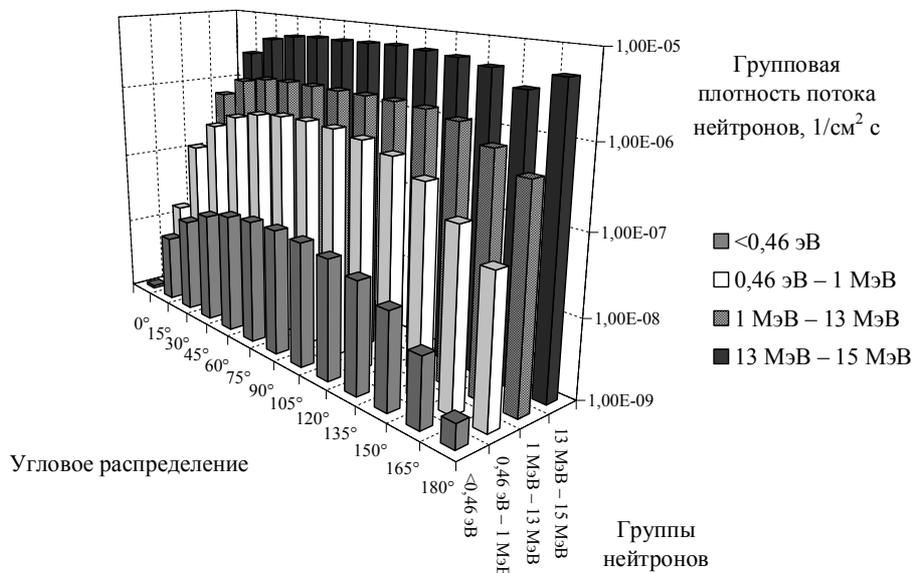


Рис. 5 Вклады нейтронов различных энергетических групп в спектр нейтронов, наблюдаемый под разными углами относительно первичного пучка дейтронов генератора ИНГ-06.

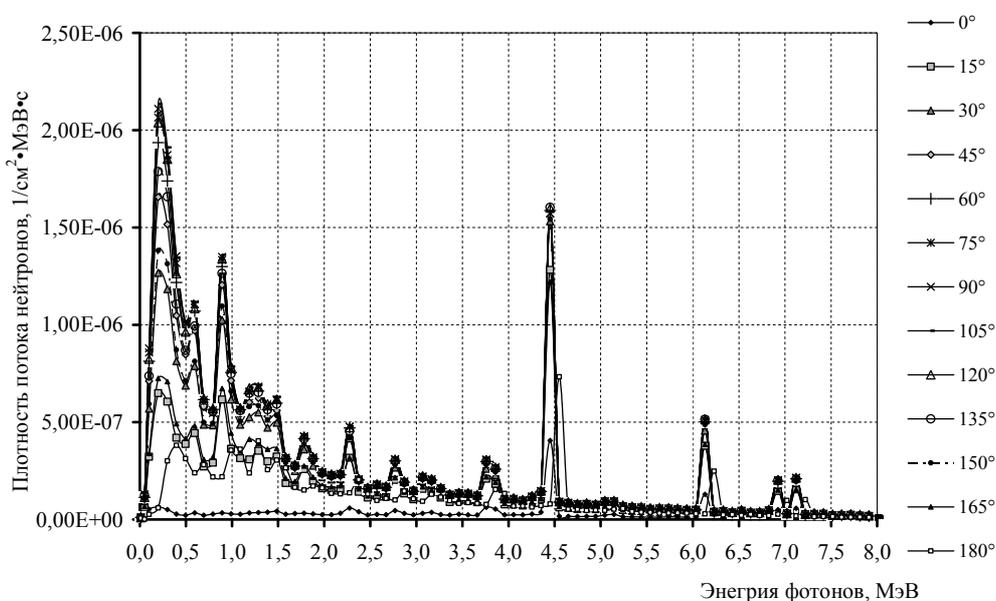


Рис.6. Энергетические распределения плотностей потоков фотонов в различных точках вокруг нейтронного генератора типа ИНГ-06 с учетом реальных конструкционных материалов.

При импульсном режиме работы имеет значение форма импульса нейтронов генератора. Если импульс нейтронов является мгновенным, то образование замедленных нейтронов приводит к «затягиванию» этого импульса. На рис. 7 представлены временные распределения излучений, формируемые различными генераторами при мгновенном импульсе нейтронов.

Каждая точка нормирована на временной интервал 10 нс. Для оценки реальной формы импульса нейтронов и фотонов были выполнены расчеты временных распределений излучений на расстоянии 1м от центра мишени для разных углов в предположении, что длительность импульса составляет 1 мкс для генератора ИНГ-031 и 20 мкс для

генератора ИНГ-06. На рис. 8 представлены результаты, полученные для генератора ИНГ-031. Принималось, что выход нейтронов в течение импульса постоянен во времени. Проведенные исследования влияния конструкционных элементов нейтронных генераторов на характеристики полей излучений показали, что происходит изменение угловых и энергетических распределений нейтронов. В энергетических распределениях нейтронов появляются нейтроны с энергиями, отсутствующими в “чистой” мишени без конструкционных элементов, причем диапазон этих энергий простирается до тепловой области. Наличие конструкционных элементов искажает форму импульса нейтронов и происходит «затягивание» импульса нейтронов, испускаемых мишенью, до сотен мкс.

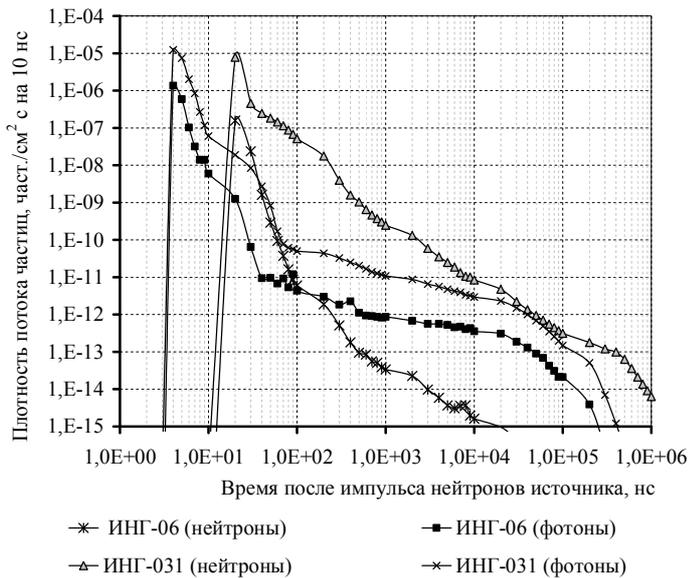


Рис. 7. Временное распределение плотностей потоков нейтронов и вторичных фотонов для генераторов ИНГ-031 и ИНГ-06.

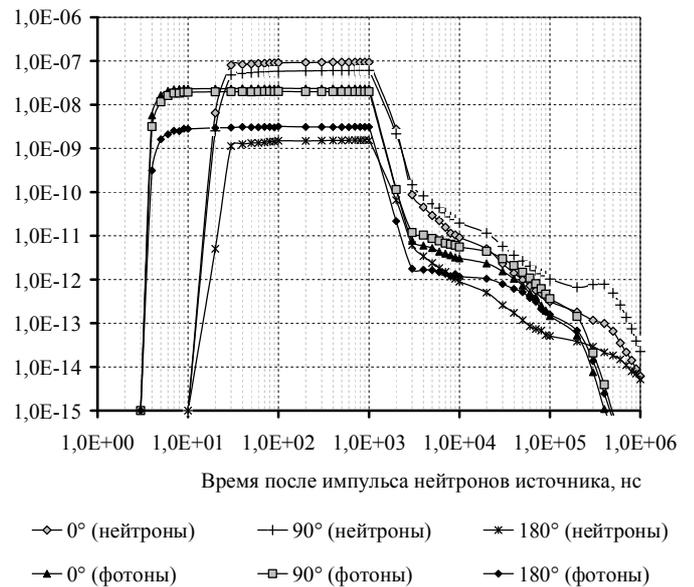


Рис. 8. Временное распределение плотностей потоков нейтронов и вторичных фотонов для генератора ИНГ-031.

Обнаруженные закономерности формирования полей излучений необходимо учитывать при решении практических задач, к числу которых относятся такие, как обнаружение водородосодержащих материалов по наличию тепловых нейтронов после импульса нейтронного генератора, контроль состава ДМ на быстрых нейтронах и организация стартовых импульсов во времяпролетных методах с помощью сцинтилляционных систем.

В четвертой главе описано развитие методической базы установок неразрушающего контроля и обнаружения ДМ с использованием импульсных нейтронных генераторов. Задачи контроля состава ТВС и обнаружения ДМ в пунктах их контроля (аэропорты) несмотря на их принципиальную схожесть, имеют существенные различия при их методической и практической реализации. Главное различие этих установок состоит в том, что контроль ТВС реализуется в специальных лабораториях и ставит задачу количественного определения состава ТВС, в то время как таможенные устройства должны с большой степенью вероятности определять в аэропортах только наличие ДМ

за время (5-7) секунд и без активации материалов багажа нейтронами. При этом таможенная установка должна работать при допустимых уровнях радиационной обстановки в аэропортах, чему соответствует выход нейтронов источника на уровне 10^7 нейтр./с.

Были проведены расчеты нестационарных спектров нейтронов в графитовой установке, которые показали, что сразу после окончания импульса нейтронов источника и вплоть до (100-150) мкс в установке присутствуют эпитепловые нейтроны. Следовательно, в этой области энергий нейтронов с помощью цифровой сцинтилляционной системы детектирования можно, разделив отклики нейтронов и фотонов, вести контроль состава ТВС с меньшей экранировкой ДМ. Было показано, что в интервале времени до (60-100) мкс после окончания импульса нейтронов источника можно определять состав ТВС вплоть до обогачений урановых образцов на уровне (40-50)%. Полученные расчетные результаты представлены на рис. 9.

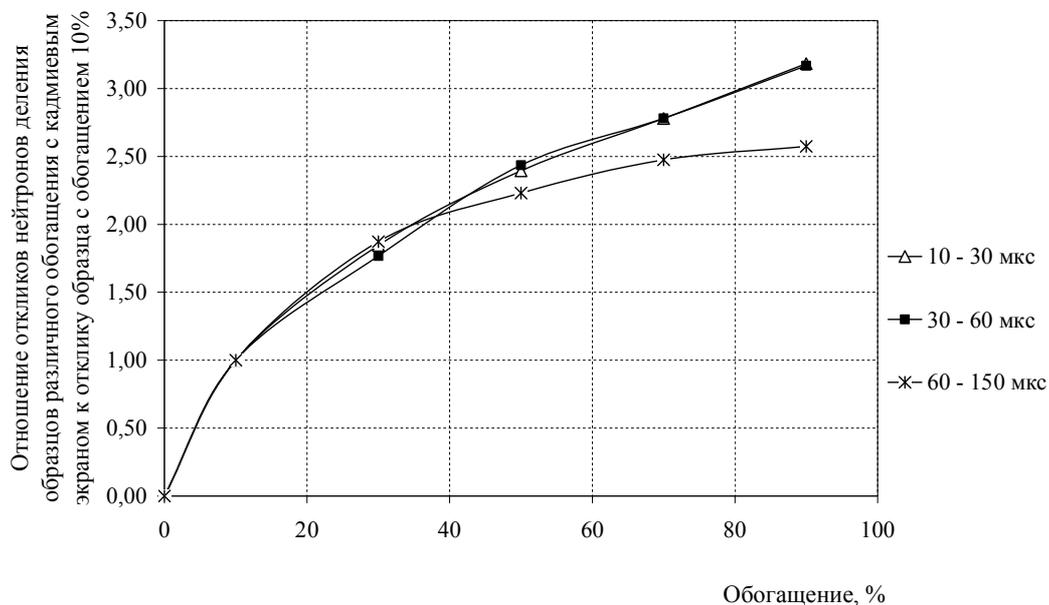


Рис. 9. Отношение откликов нейтронов деления урановых сферических образцов различного обогачения с кадмиевым экраном к отклику образца с обогачением 10% в установке на базе графитового замедлителя.

Одним из методов контроля ДМ в ТВС является метод спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце. На основании результатов расчетных исследований временных и энергетических характеристик свинцового замедлителя был предложен способ отдельного определения откликов ^{235}U и ^{239}Pu по времени замедления быстрых нейтронов в свинце на основе матрицы временных интервалов, позволяющий уменьшить эффект экранировки ДМ. Для его реализации были выполнены расчеты временных распределений числа делений в сферическом образце из ДМ массой 1 кг от импульсного источника нейтронов ДТ реакции. Источник находился в центре свинцового шара радиусом 120 см, образец располагался на расстоянии 60 см от его центра и включал ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu в концентрациях, изменяемых в диапазоне от 0,5 до 2% по ^{239}Pu и от 2 до 10% по ^{235}U . Анализ полученных расчетных результатов (рис. 10) позволил вы-

делить временные интервалы, в которых наблюдается заметная разница в числе делений, происходящих на ^{235}U и ^{239}Pu . К ним относятся (5-25) мкс; (40-55) мкс; (60-80) мкс; (100-130) мкс; (145-155) мкс и (195-250) мкс. В этих временных интервалах наблюдается наиболее высокая энергия замедленных нейтронов, что и ведет к снижению самоэкранировки ДМ.

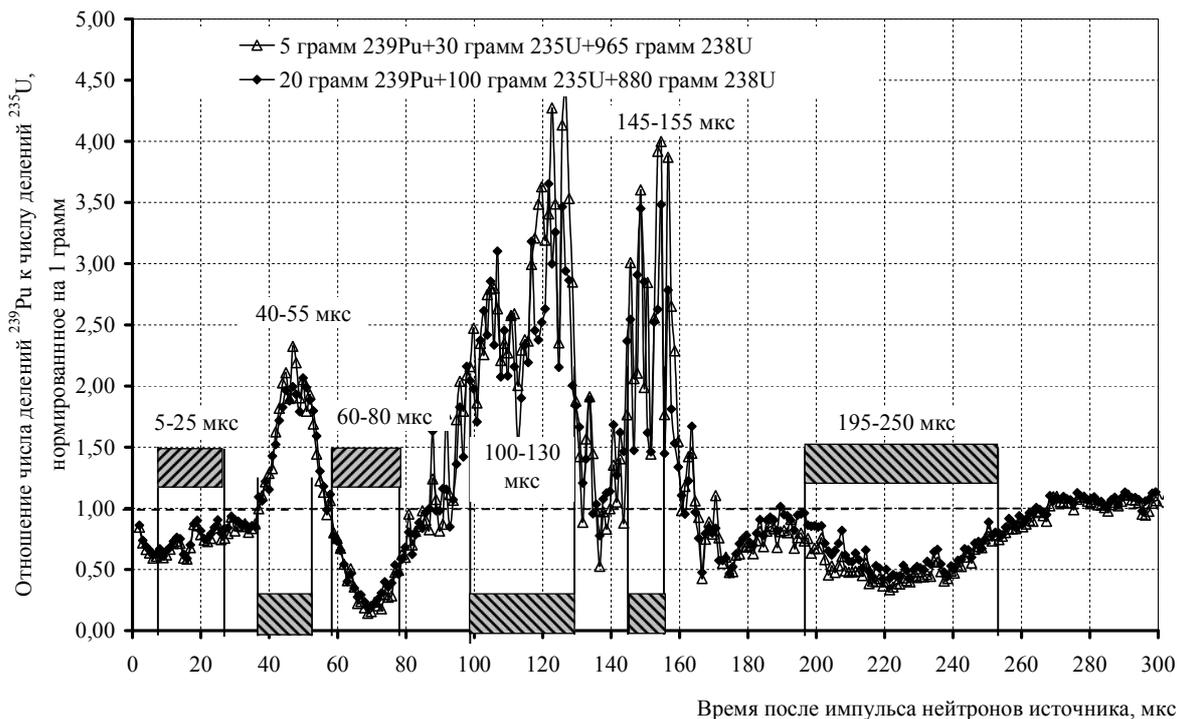


Рис. 10 Временная зависимость отношения числа делений ^{239}Pu к числу делений ^{235}U , нормированная на 1 грамм.

В этих временных интервалах были рассчитаны скорости делений на отдельных делящихся нуклидах и образце в целом. В итоге была получена матрица скоростей делений размером 4x4 по концентрации ^{235}U и ^{239}Pu в образце для 6 временных интервалов и показана возможность на основе полученной матрицы определять концентрации отдельных делящихся нуклидов в образце по полному числу делений в нем.

Анализ временных распределений нейтронов в графитовом замедлителе показал принципиальную возможность создания установок обнаружения ДМ, сознательно скрывааемых сильными поглотителями тепловых нейтронов или свинцом. На рис. 11 представлено схематическое изображение экспериментальной установки. Во время импульса быстрых нейтронов источника нейтроны попадают практически одновременно во все сцинтилляционные детекторы и в графитовый замедлитель. Нейтроны, замедляющиеся в графите, будут давать в измерительной камере сначала эпитепловые, а далее тепловые нейтроны.

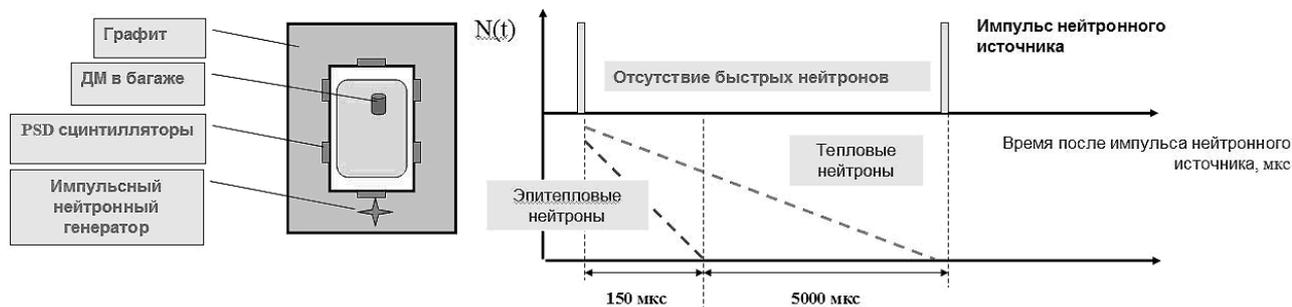


Рис. 11 Схематическое изображение экспериментальной установки обнаружения ДМ.

В случае наличия в измерительной камере ^{235}U или ^{239}Pu , нейтроны деления попадают в сцинтиллятор и создают отклик протонов отдачи. После импульса нейтронов источника в установке практически нет физических процессов, кроме процесса деления, в которых бы возникали быстрые нейтроны. Поэтому факт детектирования быстрых нейтронов после импульса нейтронов источника свидетельствует о наличии ДМ в инспектируемом объеме. Фотоны, имеющиеся в установке, создают отклик электронов комптоновского рассеяния и отделяются от отклика нейтронов по форме сцинтилляционного импульса. Установка может работать, как в активном режиме, регистрируя число мгновенных нейтронов деления нечетных нуклидов ДМ и их запаздывающее нейтронное и фотонное излучения, так и в пассивном режиме, детектируя собственное фотонное и нейтронное излучения нуклидов ДМ.

Методические и оптимизационные исследования нестационарных полей нейтронов и фотонов в модели установки таможенного контроля ДМ в аэропортах, показали, что загрузка сцинтилляционных трактов настолько велика, что не позволяет использовать традиционные аналоговые блоки разделения откликов нейтронов и фотонов. Поэтому были выданы рекомендации на создание цифровой технологии разделения откликов нейтронов и фотонов при нагрузках на уровне (10^5-10^6) частиц/с. Такая технология была реализована на практике, что позволило определить оптимальные параметры прототипа установки контроля ДМ (включая радиационную обстановку) и в дальнейшем разработать метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками.

Был проведен выбор формы сцинтилляционных блоков детектирующей системы установки. Расчеты проводились для прямоугольных и цилиндрических блоков, имеющих один и тот же объем сцинтиллятора. Результаты расчетов показали, что фактически нет зависимости откликов от формы сцинтилляторов, и поэтому из технологических соображений были выбраны сцинтилляторы цилиндрической формы. Временные зависимости откликов нейтронов характеризуют различные энергии нейтронов в установке и определяют возможность обнаружения ДМ, скрываемых различными поглощающими излучения экранами. Поэтому была проведена серия расчетов поведения нейтронов в графитовой установке в зависимости от времени после импульса нейтронов источника для ДМ, скрытых кадмиевыми экранами и без них. При этом изучались

зависимости откликов нейтронов в случаях, когда в установке были вставки из различного материала, помещенные между мишенью нейтронного генератора и измерительной полостью. Результаты расчетов показали, что эпитепловые нейтроны существуют в установке ~ 150 мкс после импульса нейтронов источника, а в течение первых 40 мкс отклики нейтронов от ДМ в кадмиевых экранах и без них практически не имеют отличия.

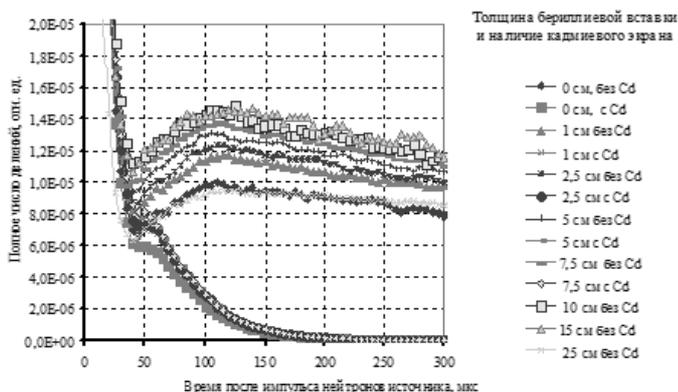


Рис. 12. Временная зависимость числа делений в образцах урана, покрытых кадмиевым экраном и без него в установке с графитовым замедлителем нейтронов при различной толщине бериллиевой вставки.

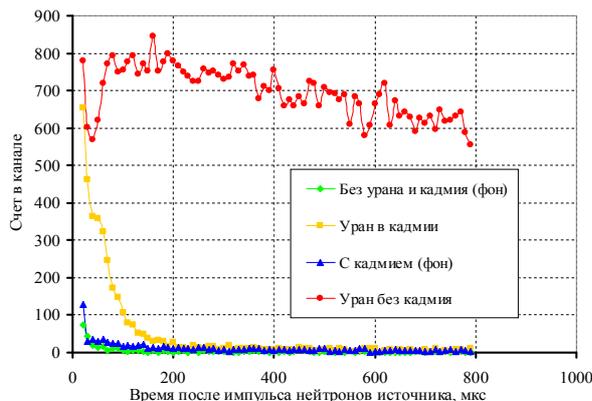


Рис. 13. Экспериментальная зависимость полного числа делений ^{235}U с кадмиевым экраном и без него в установке с графитовым замедлителем нейтронов.

Видно, что вид расчетных (рис. 12) и экспериментальных (рис. 13) кривых хорошо согласуется между собой, и показывает возможность обнаружения ДМ, скрытого кадмиевым поглотителем. Отсюда следует вывод о том, что начинать измерения следует как можно раньше после окончания импульса нейтронов источника. Исследование влияния вставок различных материалов между мишенью нейтронного генератора и измерительной камерой на величину отклика нейтронов деления показали, что его максимум достигается на расстоянии (12-15) см от измерительной камеры для бериллиевой вставки. Аналогичные результаты были получены для графитовой и комбинированной вставок, расположенных в установке обнаружения ДМ.

Так как экспериментальное определение эффективности многоканальной системы детектирования невозможно произвести на стадии проектирования установки, были проведены расчетные исследования, которые позволили определить коэффициенты увеличения нейтронного отклика и загрузки для перехода от системы с одним сцинтилляционным детектором к системе с 16 блоками, находящимися в прототипе установки. Оказалось, что отклик в 16-канальной системе больше, чем отклик в системе с одним сцинтиллятором приблизительно в 5 раз и не зависит от наличия кадмиевого экрана. Обратная ситуация наблюдается для комптоновских взаимодействий фотонов, загрузка 16-ти канальной системы в 12-19 раз выше, чем в системе с одним сцинтиллятором, причем, исключение самого загруженного сцинтилляционного детектора позволяет

снизить загрузку в 1,2-1,3 раза, практически не меняя эффективности детектирования нейтронов.

Для увеличения эффективного выхода нейтронов (числа нейтронов зондирующего спектра на один нейтрон первичного источника) были рассмотрены варианты использования в установке источников нейтронов DD и DT реакций, а также использование источника нейтронов DT реакции совместно с конверторами нейтронов типа вольфрам/графит/полиэтилен ($W/C/CH_2 = 7.5\text{см}/7,5\text{см}/2,5\text{см}$) и свинец/графит/полиэтилен ($Pb/C/CH_2 = 7.5\text{см}/7,5\text{см}/2,5\text{см}$). В результате расчетных исследований было выявлено, что лучшим для увеличения эффективного выхода нейтронов DT реакции является конвертер спектра на основе вольфрама. Он позволяет в 1,5-2 раза увеличить число нейтронов зондирующего спектра на один нейтрон первичного источника, однако при этом в 2,5 раза увеличивает загрузку на сцинтилляционные тракты за счет возникающего фотонного излучения. Использование источника нейтронов DD реакции дает выгоду в нейтронном отклике в 1,6 раза по сравнению с DT реакцией, увеличивая при этом число фотонов в 1,5-1,6 раза. Однако этот вариант установки обеспечивает невозможность радиоактивного загрязнения помещений таможенных пунктов, даже при полном разрушении нейтронного источника и позволяет уменьшить габариты радиационной защиты установки. В результате этих исследований было принято решение в установке неразрушающего контроля ДМ в аэропортах использовать источник нейтронов DD реакции.

Следующим этапом расчетов являлось исследование спектров нейтронов и фотонов в модели таможенной установки, а также источников загрузки сцинтилляционных трактов. Анализ результатов расчетов показал, что практически всю загрузку составляют фотоны с энергией 2,23 МэВ, принадлежащие реакции радиационного захвата тепловых нейтронов водородом сцинтилляторов. При этом было показано, что отклик фотонов состоит из трех временных частей. Первая часть отклика характеризуется константой спада тепловых нейтронов сцинтиллятора цилиндрической формы, вторая часть определяется константой спада тепловых нейтронов в графитовой системе, а третья часть зависит от собственного фотонного излучения образца ДМ. На рис. 14 представлены экспериментальные и расчетные временные зависимости плотности потока фотонов в прототипе установки обнаружения ДМ с многоканальной системой сцинтилляционных детекторов.

На основе полученных распределений были определены экспериментальные и расчетные константы спада, представленные в таблице 2. Физическое толкование временного поведения откликов нейтронов и фотонов легло в основу создания методики снижения загрузки сцинтилляционных трактов без снижения отклика нейтронов деления.

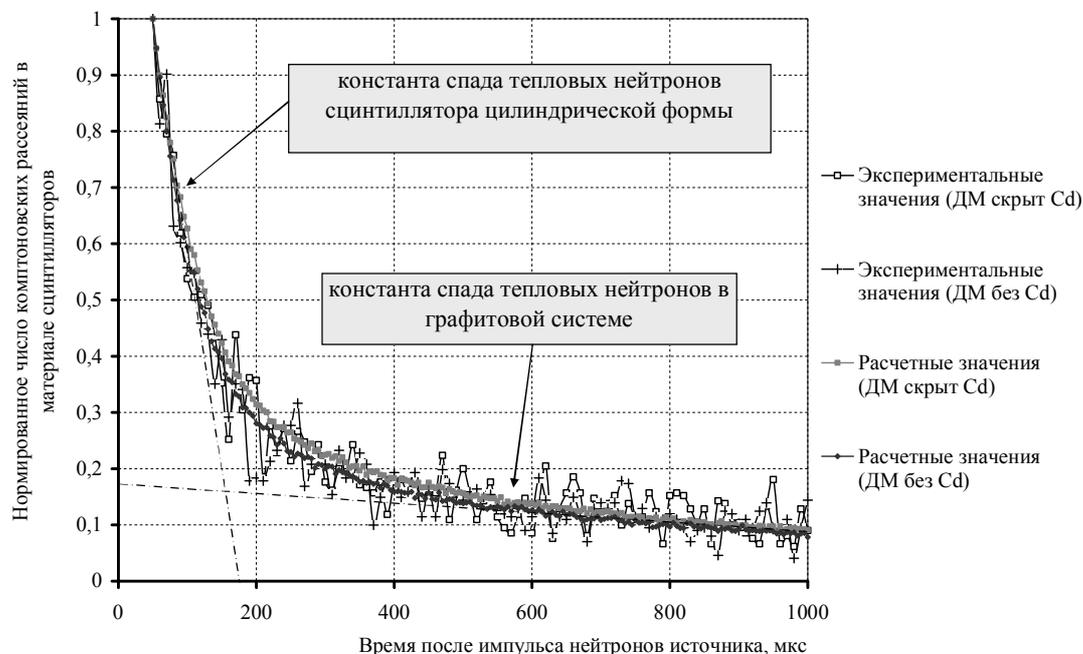


Рис. 14 Расчетные и экспериментальные временные зависимости плотности потока фотонов в прототипе установки обнаружения ДМ с многоканальной системой сцинтилляционных детекторов (выход нейтронов нейтронного генератора – $0,54 \cdot 10^4$ нейтронов/импульс).

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных констант спада плотности потока фотонов установке обнаружения ДМ в аэропортах.

	Константа спада, s^{-1}			
	Расчетные		Экспериментальные	
	ДМ без Cd	ДМ скрыт Cd	ДМ без Cd	ДМ скрыт Cd
Константа спада тепловых нейтронов сцинтиллятора цилиндрической формы	14230±4%	13250±4%	18479±12%	13499±11%
Константа спада тепловых нейтронов в графитовой системе	1122±5%	1154±4%	1038±12%	846±15%

Таким образом, возникшая в процессе исследований задача снижения загрузки сцинтилляционного тракта была решена с помощью нового подхода, при котором сохраняются все положительные свойства сцинтилляционной детектирующей системы при значительном уменьшении ее загрузки и сохранении эффективности детектирования быстрых нейтронов деления. Анализ возможных путей снижения загрузки показал, что наилучшие параметры системы можно получить при использовании составного сцинтиллятора, разделенного на две части экраном из сильного поглотителя тепловых нейтронов (рис. 15). При этом константы временного спада тепловых нейтронов разделенных частей составного сцинтиллятора подбираются одинаковыми. Расчетные исследования показали, что использование составных детекторов дает выигрыш в загрузке по

отношению к однородному детектору от 2 до 11 раз в интервале времени до 85 мкс после импульса нейтронов источника, что видно на рис. 15.

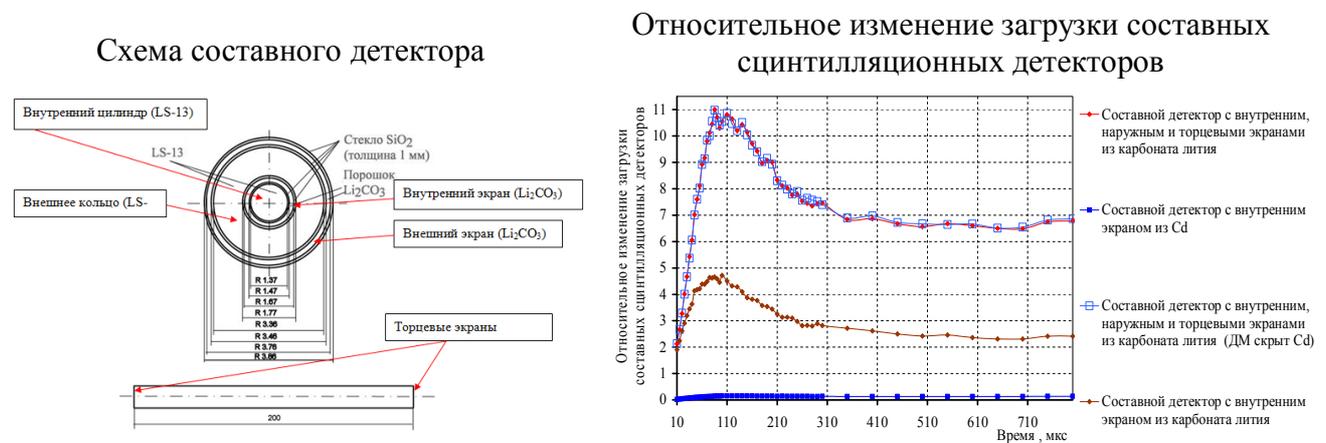


Рис. 15. Относительное изменение загрузки составных сцинтилляционных детекторов со стенками из различных поглощающих тепловые нейтроны экранов от времени после импульса нейтронов источника.

В случае использования сцинтилляционной системы детектирования нейтронов деления на основе LS-13, состоящей из 16 отдельных составных блоков с размерами Ø65x180 мм в установке обнаружения и контроля ДМ в аэропортах, выигрыш в загрузке составляет от 4 до 9 раз.

Была также рассмотрена возможность снижения загрузки путем использования дейтерийсодержащего сцинтиллятора типа BC-537 фирмы BICRON. Анализ полученных результатов показал, что по загрузочным характеристиками сцинтилляторы типа BC-537 сравнимы с предложенным составным сцинтиллятором. При этом составной сцинтиллятор на основе LS-13 имеет сравнимые с BC-537 метрологические свойства и лучшие эксплуатационные характеристики, он менее пожароопасен и более экономически доступен при изготовлении многоканальных сцинтилляционных систем.

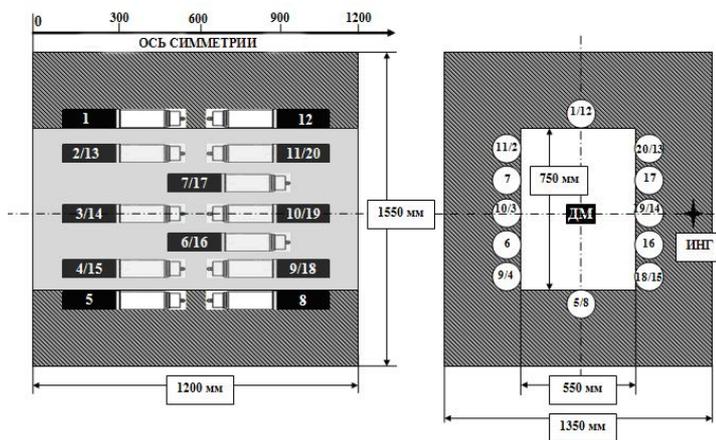
Были проведены исследования зависимости эффективности установки от толщины графитовой стенки измерительной камеры. При этом, наиболее важно получить выигрыш числа делений в эпитепловой области нейтронов. Однако, было выявлено, что увеличение толщины графитовой стенки для рассматриваемой многоканальной системы детектирования является нецелесообразным, так как, несмотря на небольшое увеличение нейтронного отклика при увеличении толщины стенки до 60 см, загрузка системы возрастает в большей мере.

Важным элементом практического использования любой установки, включающей в себя источники ионизирующих излучений, является обеспечение условий радиационной безопасности персонала, обслуживающего установку и населения, которое может подвергаться радиационному воздействию при приближении к установке. Проведенные расчетные исследования радиационной обстановки в помещении таможенной

установки позволили предложить эффективную противорадиационную защиту, обеспечивающую радиационную безопасность персонала и населения практически на поверхности предложенной защиты толщиной $\sim(6-12)$ см при работе с нейтронным генератором, использующим DD реакцию с выходом $2 \cdot 10^7$ нейтр./с.

Таким образом, проведенные расчетные исследования привели к созданию экспериментального образца прототипа таможенной установки аэропортов (рис. 16), в котором, как было показано расчетным и экспериментальным путем, возможно обнаружение за (2-7) секунд ДМ, скрытых свинцовыми, кадмиевыми и композитными экранами (кадмий и плексиглас) на уровне $\sim(2-10)$ грамм в зависимости от положения ДМ в багаже и ядерно-физических свойств его материалов.

Схема прототипа установки таможенного обнаружения и контроля ДМ



Экспериментальный образец установки таможенного обнаружения и контроля ДМ



Рис. 16. Прототип установки таможенного обнаружения и контроля ДМ в аэропортах и схема расположения сцинтилляционных детекторов в нем.

Расположение и количество сцинтилляционных детекторов в установке оптимизировалось расчетным путем с целью достижения равномерности распределения отклика ДМ по объему установки. Анализ комплекса характеристик установки обнаружения ДМ показал, что с учетом коэффициента перехода от одноканальной установки к многоканальной, достаточно использования 20 отдельных цифровых каналов с выходами на отдельные цифровые платы разделения откликов нейтронов и фотонов. Сцинтилляционные детекторы располагались так, чтобы в центре установки их было меньше, чем на периферии. Это объяснялось тем, что импульсный нейтронный генератор находился в центре одной из сторон графитового замедлителя. Это обуславливало максимальный поток нейтронов и, соответственно, отклик нейтронов деления в центре установки. На рис. 17 показаны экспериментальные и расчетные результаты отклика нейтронов от 15 грамм ^{235}U за 4 секунды облучения образца в установке. Анализ полученных результатов показал, что расчетные и экспериментальные данные, полученные с целью определения чувствительности установки к местоположению ДМ, хорошо согласуются, что

видно даже в случае сокрытия ДМ кадмиевым экраном. При этом ДМ обнаруживается в любой точке установки, несмотря на то, что эффективность установки при этом несколько уменьшается.

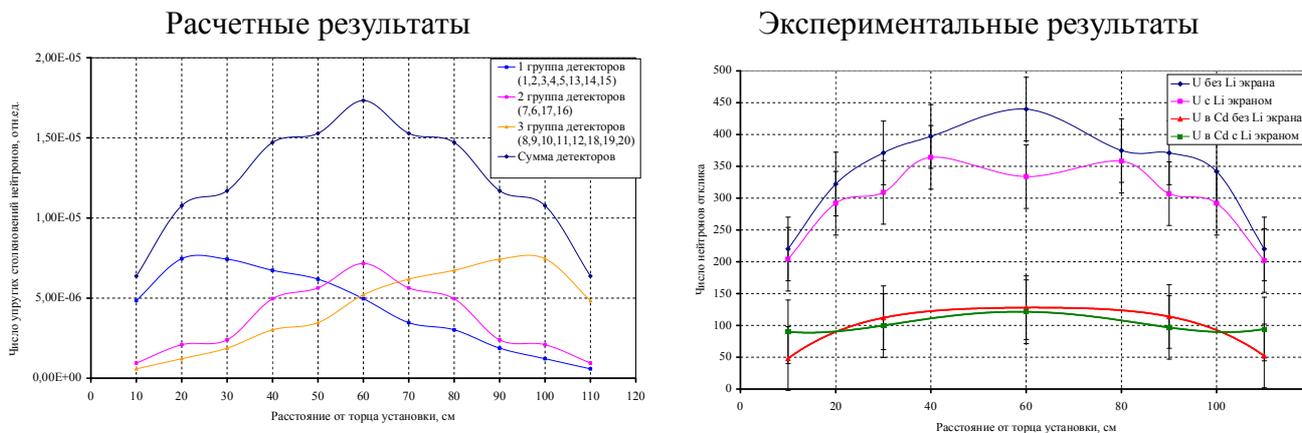


Рис. 17 Экспериментальные и расчетные результаты отклика нейтронов от 15 грамм ^{235}U за 4 секунды облучения образца в установке.

Таким образом, на примере прототипа установки обнаружения ДМ в аэропортах, морских портах и т. д., работающей на основе цифровой технологии разделения откликов нейтронов и фотонов с высокой загрузкой сцинтилляционных трактов, была экспериментально подтверждена практическая ценность проведенного в диссертационной работе анализа временных распределений излучений для оптимизации установок неразрушающего контроля ДМ с импульсными нейтронными генераторами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Контроль и учет ядерных материалов в настоящее время является одной из важнейших задач в мире, решение которой связано с проблемой нераспространения ДМ и безопасной эксплуатацией ядерно-энергетических установок. Создание устройств обнаружения ДМ в аэропортах и их контроль в ТВС ядерных реакторов является сложной системной задачей, решение которой требует проведения большого объема экспериментальных исследований. Ввиду этого, расчетные исследования, которые существенно сокращают временные и экономические ресурсы создания установок контроля, представляют собой необходимый этап в их практической реализации. В диссертации для этих целей использован метод Монте-Карло, который можно представить как численный эксперимент для трехмерных конфигураций устройств обнаружения ДМ. На основе проведенного в диссертационной работе анализа нестационарных полей нейтронов и фотонов в различных замедлителях и установках контроля ДМ с импульсными источниками нейтронов были рассмотрены новые физические методы и основанные на их разработке установки, которые возможно использовать при контроле состава ДМ в теп-

ловыделяющих сборках (ТВС) ядерных реакторов, обнаружения ДМ в аэропортах, даже в тех случаях, когда они сознательно скрываются поглощающими зондирующее излучение экранами. Проведенные расчетные исследования показали роль конструкционных материалов при формировании стационарных и нестационарных полей излучений портативных нейтронных генераторов и дали возможность получения рекомендаций по их применению в конкретных экспериментах контроля состава различных материалов.

По результатам, полученным в диссертации, можно сделать следующие основные выводы:

1. В результате расчетного анализа временных распределений полей тепловых нейтронов в сферических водных, графитовых, бериллиевых и свинцовых замедлителях нейтронов показана необходимость введения термализационного блока констант при расчетах в программе MCNP-4c2. Отсутствие термализационного блока приводит к отклонениям в расчетах величины констант спада тепловых нейтронов до 60% для воды, (7-15)% для графита и (2-5)% для бериллия (для малых значений радиусов). Расхождений для сечения поглощения и коэффициента диффузии замедлителей составляет: (1-14)% для графита, ~19% для бериллия (для коэффициента диффузионного охлаждения).
2. Получено, что для воды использование DD реакции в 5-8 раз, а для графита в 2 раза эффективнее для получения тепловых нейтронов, чем использование DT реакции. Для бериллия DT реакция эффективнее в 2-3 раза, а для свинца - от 2 до 7 раз (для энергии 4,9 эВ), чем реакция DD.
3. Предложен и апробирован метод тестирования библиотек ядерных данных на основе временных и энергетических распределений полей излучений в различных замедлителях нейтронов, при использовании которого во всех спектрах излучений и их функционалах отсутствует информация о нейтронах источника, а также об анизотропии характеристик их вылета из источника, что повышает достоверность сравниваемых экспериментальных и расчетных данных.
4. Получены результаты чувствительности временных распределений плотностей потоков тепловых и надтепловых нейтронов, а также вторичных фотонов в воде, графите и бериллии с DT и DD реакциями получения нейтронов к вариации ядерных данных в различных библиотеках констант.
5. Получены зависимости между энергией нейтронов и временем ее достижения в процессе замедления нейтронов в свинце для различных библиотек ядерных данных.
6. Определены нейтронные и фотонные спектры портативных импульсных нейтронных генераторов ИНГ-06 и ИНГ-031, возникающие благодаря взаимодействию нейтронов источника с конструкционными материалами генераторов в различное время после импульса нейтронов источника при их стационарном и импульсном режимах работы.
7. Проведен анализ временных распределений полей излучений в установке контроля состава урановых образцов на основе графитового замедлителя нейтронов, в результате

чего определено время до (60-100) мкс после импульса нейтронов источника для контроля урановых образцов с обогащением до (40-50)% по ^{235}U .

8. Определена матрица временных интервалов: (5-25) мкс; (40-55) мкс; (60-80) мкс; (100-130) мкс; (145-1550) мкс и (195-250) мкс после импульса нейтронов источника, позволяющая уменьшить эффект самоэкранировки при определении концентраций ^{235}U и ^{239}Pu в ТВС в измерениях по времени замедления быстрых нейтронов в свинце.

9. Разработан метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками с помощью использования составных детекторов, дающий выигрыш в загрузке сцинтилляционных трактов от 2 до 11 раз.

10. Выполнен анализ расчетных и экспериментальных нестационарных полей нейтронов и фотонов в установке обнаружения делящихся и радиоактивных материалов, в результате чего на основе графитового замедлителя и импульсного DD нейтронного источника с выходом на уровне $\sim 2 \times 10^7$ нейтр./с. с использованием цифровой технологии обработки сигналов сцинтилляторов был создан и экспериментально обоснован прототип установки обнаружения ДМ в аэропортах, в котором за ~ 7 с можно обнаружить от 1 до 10 грамм ^{235}U или ^{239}Pu даже в случаях их сознательного сокрытия с помощью поглощающих излучения экранов, например, свинцовых или кадмиевых.

Основные публикации по теме диссертации

1. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova. Testing of data libraries for lead, based on the analysis of time and energy distributions of neutrons // Proc. of 3rd International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kiev, Ukraine, June, 2010.
2. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova, et al. Evaluation of ^{235}U and ^{239}Pu content in fuel assembly by using neutron slowing-down time in lead // Proc. of 3rd International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kiev, Ukraine, June, 2010.
3. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova, et al. Fissile material detection and control facility with pulsed neutron sources and digital data processing // Proc. of International Conference "Addressing the Issue of Potential Terrorism and Guarding against Weapons of Mass Destruction in Central Asia", Dushanbe, Tajikistan, April 2010.
4. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. Метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками // Приборы и техника эксперимента, 2010, № 3, с. 49-54.
5. Ромоданов В.Л., Черникова Д.Н., Белотелов Д.И., Радаев А.И. Расчетные и экспериментальные результаты временных распределений откликов ДМ в графитовом

- замедлителе с импульсным нейтронным источником // В сб.: Доклады научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. Т.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2010, с. 46-47.
6. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova, et al. Digital Technology for Fissile Material Detection: Experience and Educational Activity in MEPHI // Proc. of International Workshop on Non-Proliferation Embedded at The XI International Conference "Nuclear Safety&Nuclear Education", Obninsk, Russia, October, 2009.
 7. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н., Мухамадьяров И.В., Афанасьев В.В., Белевитин А.Г. Обнаружение делящихся материалов в багаже пассажиров аэропортов в установках с импульсными нейтронными источниками и цифровой обработкой данных // Известия Высших Учебных Заведений. Ядерная энергетика, 2008, № 4, с. 157-164.
 8. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н., Мухамадьяров И.В., Афанасьев В.В., Белевитин А.Г. Расчетно-экспериментальные исследования установки обнаружения делящихся материалов в аэропортах // Атомная энергия, 2008, № 105, с. 118-123.
 9. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova, et al. Digital technology for Fissile Material Detection // Cooperation Meeting between the International Science and Technology Centre (ISTC) and the International Atomic Energy Agency (IAEA), Moscow, Russia, December, 2008.
 10. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova. Testing of data libraries based on the analysis of time distributions of radiations // Proc. of 2d International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kiev, Ukraine, June, 2008.
 11. V. L. Romodanov, V. K. Sakharov, D. N. Chernikova, et al. A fissile material detection and control facility with pulsed neutron sources and digital data processing // Proc. of IAEA International Conference on Illicit Nuclear Trafficking Collective Experience and Way Forward, Edinburg, Scotland, November, 2007.
 12. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. Расчетные исследования прототипа установки обнаружения делящихся материалов с импульсным нейтронным источником // В сб.: Доклады научной сессии МИФИ-2007. Т.8. М.: МИФИ, 2007, с. 107-108.
 13. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. Зависимость эффективности обнаружения делящихся материалов от состава и размеров вставок между импульсным нейтронным источником нейтронов и багажной камерой // В сб.: Доклады научной сессии МИФИ-2007. Т.5. М.: МИФИ, 2007, с. 129-130.
 14. Ромоданов В.Л., Черникова Д.Н. Сравнительные характеристики использования различных сцинтилляторов в установках с импульсными нейтронными источниками

- ками для обнаружения и контроля делящихся материалов // В сб.: Доклады научной сессии МИФИ-2007. Т.5. М.: МИФИ, 2007, с. 127-128.
15. Ромоданов В.Л., Черникова Д.Н. Расчетные исследования установок контроля состава ТВС ядерных реакторов с импульсными нейтронными источниками // В сб.: Доклады научной сессии МИФИ-2007. Т.8. М.: МИФИ, 2007, с. 112-113.
 16. Romodanov V.L., Chernikova D.N., Sakharov V.K. A method to decrease the load on scintillation channels in fissile material detection and control devices with pulsed neutron sources // Proc. of Annual 47 Meeting of INMM, Nashville, USA, paper #110, July, 2006.
 17. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. Метод снижения загрузки сцинтилляционных трактов в установках с импульсными нейтронными источниками // В сб.: Доклады научной сессии МИФИ-2006. Т.8. М.: МИФИ, 2006, с. 98-99.