Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Акционерное общество «Государственный научный центр
Российской Федерации – Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского»

На правах рукописи

Ломаков Глеб Борисович

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Диссертация

На соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Мантуров Геннадий Николаевич

Обнинск 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. Анализ дифференциальных экспериментов и валидация нейтронно-физических констант конструкционных материалов 19
1.1 Описание дифференциальных экспериментов по прохождению частиц через вещество 20
1.2 Эксперименты в сферической геометрии 30
1.3 Эксперименты в плоской геометрии 33
1.4 Выводы к Главе 1 41
ГЛАВА 2. Повышение точности определения нейтронно-физических констант на основе анализа дифференциальных экспериментов 43
2.1 Обзор современного состояния библиотек ОЯД 44
2.2 Область разрешенных резонансов 46
2.3 Область неразрешенных резонансов 52
2.4 Выводы к Главе 2 57
ГЛАВА 3. Развитие системы групповых нейтронно-физических констант БНАБ для расчета характеристик радиационной защиты 59
3.1 Краткий обзор систем групповых констант БНАБ, BUGLE/VITAMIN и SCALE, испсользуемых для расчета радиационной защиты 61
3.2 Минимизация погрешности группового приближения при формировании библиотеки микроконстант БНАБ 63
3.3 Развитие программы подготовки макроконстант CONSYST 78
3.4 Выводы к главе 3 87
ГЛАВА 4. Определение погрешности группового приближения при расчете пространственно-энергетического распределения реакторных частиц 88
4.1 Краткий обзор методов и программ расчета радиационной защиты 88
4.2 Расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов 91
4.3 Расчетное моделирование экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах 95
4.4 Выводы к главе 4 100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 107
Приложение А. Журнал измерений 125
Приложение Б. Сравнение наблюдаемого сечения железа с расчетами по РОСФОНД 126
Приложение В. Сравнение наблюдаемого сечения кремния с расчетами по современным библиотекам 129
Приложение Г. Сравнение наблюдаемого сечения ниобия с расчетами по современным библиотекам 131
Приложение Д. Описание формата GNDL представления данных 135
Приложение Е. Список сечений, записываемых в формат GNDL 138

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АЭС	-	атомная электростанция
БНАБ	-	Российская система групповых констант, последняя версия которой основана на библиотеке ОЯД РОСФОНД
БФС	-	быстрый физический стенд ГНЦ РФ-ФЭИ
ИИ	-	ионизирующее излучение
$K_{эф}$	-	эффективный коэффициент размножения нейтронов
НФХ	-	нейтронно-физические характеристики
ОЯД	-	оцененные ядерные данные
ОЯТ	-	отработавшее ядерное топливо
РОСФОНД	-	Российская национальная библиотека оцененных ядерных данных (последняя версия РОСФОНД2010)
РУ	-	реакторная установка
ТВС	-	тепло-выделяющая сборка
ЯЭУ	-	ядерная энергетическая установка
EXFOR	-	библиотека экспериментальных данных по ядерным реакциям
ICSBEP	-	международный справочник оцененных бенчмарк-экспериментов по исследованию критической безопасности
SINBAD	-	база данных бенчмарк-экспериментов по радиационной защите

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ядерной техники – ядерных реакторов необходимо проведение расчетов по определению пространственно-энергетического распределения реакторного нейтронного и гамма излучений. При этом одной из важнейших задач является обеспечение надежного контроля и расчетной оценки радиационных условий эксплуатации несменяемых элементов конструкций реактора – стального корпуса, элеватора загрузки-выгрузки ТВС, сборок боковой защиты и др., а также радиационных условий в помещениях вне реактора. При обращении на АЭС со свежим и отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) важным является обеспечение надежности расчетной оценки дозовых характеристик устройств транспортирования ТВС. Точность этих расчетов существенно влияет на оценку размеров и экономичность всей реакторной установки (РУ).

Расчет защиты от ионизирующих излучений (ИИ) является наиболее времязатратной процедурой. Это связано с плохой сходимостью используемых расчетных методов и сложным описанием взаимодействия частиц с материалами при больших ослаблениях потока нейтронов.

Среди наиболее распространенных расчетных методов в первую очередь следует отметить метод дискретных ординат (детерминистический S_n-метод [1]) и стохастический метод Монте-Карло [2] с его многочисленными модификациями. При достаточно мощной вычислительной технике и наличии удовлетворительных библиотек оцененных ядерных данных (ОЯД) эти методы дают возможность получать решения большинства практических задач физики радиационной защиты.

Однако расчеты радиационной защиты сопряжены с большими погрешностями в оцениваемых функционалах и повышение точности расчетов защиты может быть достигнуто, в том числе, за счет дальнейшего совершенствования библиотек нейтронных данных. В работе [3], представлена оценка вклада константной погрешности в результаты расчета активации натрия за защитой быстрого реактора, которая составляет ±50 %. Это демонстрирует

необходимость нацелить усилия на минимизацию константной погрешности, которая представляется весьма актуальной и практически значимой задачей, т.к. эти данные используются во всех нейтронно-физических кодах.

На начальном пути развития ядерной энергетики и далее, с появлением первых электронно-вычислительных машин, использовался преимущественно детерминистический метод, использующий в качестве нейтронно-физических констант групповые (усредненные по широким энергетическим интервалам) сечения взаимодействия, что позволяет рассчитывать оцениваемые функционалы достаточно быстро. Результат решения такого метода зависит от шага расчетной сетки и количества дискретных направлений углового распределения. Минусом указанного подхода является ограниченность описания детальной геометрии – только стандартные геометрические наборы из параллелепипедов, концентрических цилиндров и сфер (XYZ, RΘZ и т.д.). В нашей стране развиваются программы, использующие этот метод в организациях ИПМ (РОЗ/КАСКАД/КАТРИН [4-6] и РАДУГА [7]), ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (пакет РЕАКТОР-ГП [8] и программа PMSNSYS [9]) и ИБРАЭ РАН (ODETTA [10]). За рубежом используются зарекомендовавшие себя пакеты программ DANTSYS [11] (LANL, США) и DOORS3.2a [12] (ORNL, США).

Стохастический метод (Монте-Карло) развивается параллельно и позволяет получать функционалы без каких-либо упрощений по геометрии, при использовании как групповых, так и поточечных сечений. Время счета, при детальном описании энергетической зависимости взаимодействия частиц с материалом, больше, чем у детерминистических программ. Отечественные программы, использующие метод Монте-Карло, развиваются в ГНЦ РФ-ФЭИ (MMKKENO [13], ММКС [14]), в НИЦ КИ (MCU [15]), во ВНИИЭФ (TDMCC [16]). За рубежом используются популярные коды и пакеты: MCNP [17] (LANL, США), SERPENT [18] (VTT, Финляндия), SCALE [19] (ORNL, США) и др.

В последнее время стали широкодоступны мощные многоядерные компьютерные комплексы, которые позволяют ускорять расчеты практически

пропорционально количеству используемых ядер. При этом существенное уменьшение времени счета с увеличением количества используемых ядер достигается в программах, использующих стохастический метод, которые, с ростом вычислительной мощности постепенно вытесняют детерминистические программы. Однако при решении задач радиационной защиты прямым решением получить приемлемую точность расчетных результатов, используя метод Монте-Карло, не всегда оказывается возможным из-за большого времени счета, даже с применением суперкомпьютеров. Это преодолевается посредством неаналогового моделирования [20] – методами понижения дисперсии – (расщепление рулетки, весовые окна и др.), которые требуют определенной квалификации специалистов и позволяют достигать требуемой точности в спектральных характеристиках за приемлемое время счета. Для этого активно развиваются гибридные схемы [21] на основе совместного использования стохастического и детерминистического методов. В задачах с детектором в качестве весовой функции может выступать решение сопряженного уравнения переноса [22]. Для расчета пространственно-энергетического распределения полей излучений во всей расчетной области может использоваться величина, обратная прямому решению или его свертке по энергии в качестве весовой функции.

Существуют также итерационные методы повышения точности расчетов методом Монте-Карло, например, итерации по весовым окнам в программе MCNP. Такой подход позволяет получать оцениваемые функционалы с хорошей точностью даже при ослаблении потока частиц в 18-20 порядков [23, 24].

Описанные выше методы влияют на две из трех компонент погрешности при расчете функционалов потока, а именно на методическую (статистика в методе Монте-Карло и приближения S_n-метода) и технологическую (упрощение геометрии в S_n-методе).

Настоящая работа посвящена уменьшению константной (третьей) компоненты погрешности расчетов НФХ, которая, как показано выше [3], в ряде случаев, вносит определяющий вклад в оцениваемые в расчетах величины.

Общемировая практика расчетов радиационной защиты основывается на использовании групповых констант, при этом точность рассчитываемых функционалов зависит от целого ряда неопределенностей и погрешностей, накапливающихся на каждом этапе формирования нейтронно-физических констант: от оценки экспериментальных данных до усреднения используемых в расчете групповых сечений. Для минимизации погрешности группового приближения при выполнении расчета защиты необходимо корректно усреднить микроскопические сечения взаимодействия нейтронов и гамма-квантов с материалами среды и выполнить корректную подготовку макроскопических сечений среды. Особое внимание необходимо уделить формированию матриц рассеяния и образования вторичных гамма-квантов, важных при моделировании прохождения ИИ через протяженные слои реакторных материалов, влияющих на пространственно-энергетическое распределения нейтронных и фотонных полей.

Групповые константы, как правило, объединяются в библиотеку, которая используется программой подготовки макроконстант для нейтронно-физических расчетов объекта ядерной техники – ядерного реактора и его радиационной защиты.

В 2007 году в ГНЦ РФ-ФЭИ была сформирована библиотека групповых сечений БНАБ-РФ [25, 26], в которой использованы усредненные нейтронно-физические константы из отечественной библиотеки ОЯД РОСФОНД [27], в 299-ти нейтронной и 127-ми фотонной групповых структурах, в P_5-приближении, для температур среды от 300 до 3000 K и возможностью свертки в меньшее число групп. Минимизация расчетно-экспериментальных расхождений (при расчете с использованием библиотеки БНАБ-РФ) достигается за счет использования лучших мировых оценок, отобранных и включенных в библиотеку РОСФОНД. В предыдущих версиях библиотек БНАБ (-93, -78 и -64 [28-30]) групповые константы были откорректированы на экспериментах, в частности, на измерениях функций пропускания нейтронов, выполненных Филипповым В.В. [31]. В библиотеках БНАБ традиционно используется

экспертный подход к выбору необходимой для нейтронно-физических расчетов информации и виду ее представления, что экономит объем занимаемой памяти и время подготовки макроконстант. Например, в групповые константы энерговыделения, полученные с помощью NJOY на основе файлов ОЯД, внесены коррективы, обеспечивающие сохранение энергобаланса при реакциях захвата, неупругого рассеяния, деления. В файлах этот энергобаланс сплошь и рядом нарушается – особенно когда спектры гамма-квантов приводятся для совокупности реакций. Другим примером, влияющим на скорость получения макроконстант, является запись матриц неупругого рассеяния. В системе констант БНАБ записывается кумулятивная матрица неупругого рассеяния для первых двух угловых моментов (P_0 и P_1), в зарубежных аналогах для каждого энергетического уровня и для отдельных реакций (n2n, n3n и т.д.) записываются матрицы для всех шести моментов. Такое положение дел в последнем увеличивает время подготовки макроконстант в разы, учитывая, что для отдельного нуклида вместо одной-двух матриц (БНАБ) записываются до 20-50 матриц неупругого рассеяния для каждого энергетического уровня (MATXS, AMPX). С ростом числа групп разница в скорости подготовки макроконстант растет пропорционально числу групп.

Основой для создания новой системы констант БНАБ-РФ является БНАБ-93, которая была разработана в 90-х годах, с появлением персональных ЭВМ. Она имеет 299-ти групповую нейтронную структуру только для важных топливных и конструкционных материалов, для остальных используются традиционные 28 групп. БНАБ-93 была расширена новыми типами данных (по сравнению с БНАБ-78) для расчета радиационных характеристик [32]. Подготовка макроконстант для нейтронно-физических расчетов была обеспечена разработанной в то время программой CONSYST [33], которая была усовершенствована для использования мультигрупповых данных библиотеки БНАБ-РФ [34]. Одним из важных этапов развития константного обеспечения является ее адаптация под многие инженерные и прецизионные расчетные

коды, что, в частности, позволяет тестировать константы, используя разные расчетные методы.

Популярными зарубежными аналогами групповых библиотек констант являются TRANSX/MATXS [35], BUGLE/VITAMIN [36]. В комплексе программ SCALE существует библиотека групповых констант, созданная специально для расчетов радиационной защиты, основанная на популярных версиях американских библиотек ENDF/B-VI.8 [37] и ENDF/B-VII [38]. Главное отличие зарубежных систем групповых констант от отечественной состоит в заложенных в программы подготовки макроконстант алгоритмах и форме представления хранимой совокупности перерабатываемой информации. При этом важно отметить, что привлечение независимой системы констант для верификации отечественного константного обеспечения позволяет выявить расхождения в методике формирования исходных библиотек групповых микроконстант БНАБ и в методике подготовки макроконстант для нейтронно-физических расчетов. Для сравнения библиотек необходима полная идентичность групповой структуры, приближений, спектра усреднения и др., единство исходных данных обеспечивается использованием единой библиотеки РОСФОНД. Полное совпадение расчетных функционалов, особенно в энергетических распределениях потоков нейтронов и гамма-квантов, с использованием разных групповых систем означает корректность подготовки групповых констант.

Использование группового приближения оправдано, если потеря точности при усреднении нейтронно-физических констант слабо влияет на рассчитываемую величину, существует ограничение по времени расчета или необходимо быстро выполнить серию оценочных расчетов. Поэтому необходимо минимизировать расхождения результатов расчетов с использованием групповых и поточечных нейтронно-физических констант, чтобы обеспечить близкую к прецизионным расчетам точность оцениваемых функционалов получаемых в групповом приближении. Это является одной из основных задач в области константного обеспечения – усреднение непрерывной

зависимости сечения взаимодействия частиц с ядрами материалов (уменьшив при этом расчетное время) и обеспечение достаточной точности расчетной величины.

Однако хорошее совпадение групповых и прецизионных результатов расчета не дает гарантированного совпадения оцениваемых функционалов с экспериментальными данными из-за возможного содержания в библиотеке противоречивой (недостаточной) информации о взаимодействии частиц с ядрами материалов. Хранимая в библиотеках информация создается (оценивается) на основе экспериментальных и/или теоретических данных. Эти данные проходят этапы верификации и валидации для получения надежного набора свойств топливных, защитных и конструкционных материалов. Существуют библиотеки, создаваемые под определенные реакторные установки, основанные на опыте проведения близких к таким установкам экспериментов. Характеристики взаимодействия частиц с веществом принято записывать в файлы с определенным форматом, для каждого нуклида в отдельности. В настоящее время эти характеристики принято называть ОЯД, а формат их хранения – форматом ENDF (Evaluated Nuclear Data File) [39]. В рамках рабочей группы WPEC OECD/NEA ведутся работы по совершенствованию этого формата – обобщенных структур GND [40].

В свою очередь от надежности информации, хранимой в ОЯД, зависит результат расчетного предсказания оцениваемых величин. В настоящее время наиболее распространенными являются современные версии библиотек ОЯД: американская (ENDF/B-VII.1 [41]), европейская (JEFF-3.2 [42]), японская (JENDL-4.0 [43]), российские (РОСФОНД2010 и BROND-3.1 [44]) и набирает популярность голландская (TENDL-2014 [45]). При беглом рассмотрении все библиотеки хранят практически одинаковую информацию, но если разбирать отдельно каждый нуклид, то можно заметить между ними различия, а иногда и существенные расхождения. Это объясняется спецификой используемых моделей и подходов, а также применяемых параметров при описании экспериментов по определению свойств материалов и взаимодействий частиц с

ними. При выборе библиотеки очень важно знать особенности тех или иных ОЯД, на которых она основана. Сегодняшняя точность и детальность ОЯД была достигнута благодаря развитию компьютерной техники, спектрометрии и уменьшению разрешающей способности детекторов. Библиотеки начали пополняться поточечной информацией с большим числом разбиений по энергии. Помимо экспериментальной информации в ОЯД находятся также данные, полученные по теоретическим моделям для редких или сложнорегистрируемых характеристик ядерных взаимодействий.

В российской национальной библиотеке ОЯД РОСФОНД собраны лучшие оценки ядерных характеристик, направленные на описание отечественных интегральных экспериментов, поэтому она рекомендована для проведения верификации и аттестации кодов для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов (РБ 061-11 [46]). Поддержание российской библиотеки на мировом уровне знаний и тенденций в области ядерных данных напрямую связано с задачами обеспечения ядерной безопасности при проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ядерной техники. Причем актуальная информация должна храниться не только для основных топливных, но и для конструкционных материалов [47]. Чтобы во время использования библиотек БНАБ и РОСФОНД в проектных и/или научных организациях при исследовании новых компоновок активной зоны, защиты или других элементов ядерных установок были получены корректные расчетные функционалы. Анализ работ мировых экспертов в области ядерных данных, доступ к экспериментальной информации и материалам рабочих групп позволяет выполнять поставленную задачу, повышая точность рассчитываемых функционалов. Современная тенденция, направленная на уточнение ОЯД, опирается на анализ существующих и ранее неучтенных экспериментов, пересмотр и оценка на новом уровне которых позволяет извлечь дополнительную информацию.

Эксперименты делятся на два типа: по-элементные (дифференциальные, микроскопические), в которых проводятся исследования физических свойств

отдельно взятого материала, и интегральные (макроскопические), в которых содержится большое количество различных материалов. Основную информацию о ядерных взаимодействиях для элементов получают из дифференциальных экспериментов, оценивая полное сечение, деление, захват, энерго-угловые распределения частиц и т.д. Эту информацию объединяют в библиотеки и проводят верификацию на интегральных экспериментах, которые позволяют выявить влияние отдельных изменений сечений на конкретную установку при определенном спектре нейтронов.

Большое число измерений характеристик атомного ядра в нейтронном поле было выполнено в разных странах в период 50-80-хх годах. В ГНЦ РФ-ФЭИ проводились измерения целого ряда конструкционных материалов через толстые слои образцов с широким энергетическим интервалом, приближенным к ширине группы БНАБ [48]. По результатам указанных измерений были разработаны методы получения и корректировки групповых сечений, а также результатов расчета нейтронно-физических функционалов.

В исследованиях взаимодействий нейтронов с ядрами вещества зачастую используют времяпролетный метод (time-of-flight) измерения функций пропускания нейтронов через тонкие образцы, обеспечивающий высокую точность и достаточно узкий энергетический интервал получаемых данных [49]. Такие измерения реакторных материалов проводят для отдельных энергетических областей и в последнее время (исходя из опубликованных данных) в основном в России (ОИЯИ), Америке (ORNL) и Японии (JAEA), т.к. в большинстве своем это дорогостоящие эксперименты, проводимые для определенных целей данной страны.

Для проведения научно-исследовательских опытно конструкторских работ (НИОКР) в обоснование безопасности ЯЭУ исследование нейтронных свойств основных конструкционных материалов (железо, свинец, кремний и ниобий) является важной задачей для подтверждения надежности и выявления недостатков в нейтронно-физических константах.

- Железо является неотъемлемой частью любой конструкции, начиная от корпуса реактора и заканчивая приводными механизмами [50]. Ведущими мировыми учеными ведутся работы по выработке единой оценки для железа-56 [51].
- Свинец используется в качестве теплоносителя в реакторе типа БРЕСТ [52, 53] и в защите от ИИ [54].
- Кремний является основным конструкционным материалом природных хранилищ отработанного топлива [55], входит в состав бетона (до 30 %), инновационных керамических оболочек топлива (SiC) [56-58] и в ДУО-сталях повышенное содержание кремния [59]. В 2002 году в США была опубликована новая оценка нейтронных резонансных параметров в области энергий от тепловой до 1,8 МэВ на экспериментах по измерению функции пропускания для кремния [60], полученная с помощью кода SAMMY [61], которая вошла во все ведущие мировые библиотеки ОЯД.
- Другим, набирающим популярность и обладающим хорошими физическими свойствами, важным элементом таблицы Менделеева является ниобий, который является одним из основных конструкционным материалов космических ЯЭУ [62], применяется в ускорительных системах [63], используется в оболочках топливных таблеток и тепловыделяющих элементов, им легируют различные стали, в том числе, уран [64]. В 2008 году японскими специалистами были проанализированы и опубликованы результаты исследования эффектов самоэкранировки полного сечения ниобия на модельных расчетах, которые свидетельствовали о потребности расширения области неразрешенных резонансов [65]. В публикации 2014 года (теми же авторами) резонансная область была увеличена, но также отмечено, что для обоснованности необходимо провести эксперименты по глубокому прохождению нейтронов сквозь исследуемый материал [66].

В настоящей работе выполнен анализ и валидация на отечественных экспериментах по прохождению ИИ через различные толщины материалов для

железа, свинца, кремния и ниобия, направленные на исследование резонансной структуры полного сечения, захвата и рассеяния нейтронов, а также образования вторичных гамма-квантов в результате нейтронных реакций. Широкий набор, указанных выше, исследуемых характеристик позволяет охватить основные типы взаимодействий излучения с важными реакторными материалами в быстрой области энергий, выявить недостатки их описания в файлах ОЯД и уточнить нейтронно-физические константы.

Следующими этапами после получения новых нейтронных характеристик реакторных материалов являются валидация и верификация этой информации. Общепризнанными в международном научном сообществе базами тестовых бенчмарк-экспериментов являются справочники по критической безопасности ICSBEP [67], реакторным экспериментам IRPhEP [68] и радиационной защите SINBAD [69]. Указанные справочники принято использовать для верификации и валидации ОЯД, систем подготовки констант и расчетных кодов. Однако не все эксперименты могут быть использованы для этих целей [70]. В SINBAD также имеются эксперименты, которые не рекомендуют использовать для валидации и верификации программ и констант [71].

Контроль и участие в каждом из описанных выше этапов от проведения экспериментов до усреднения ядерных данных и расчета оцениваемых величин позволяет разрабатывать надежную универсальную систему констант для расчета активных зон и радиационной защиты реакторов на быстрых нейтронах.

Диссертация посвящена уточнению нейтронно-физических констант (РОСФОНД/БНАБ) в поточечном и групповом представлениях и развитию программы подготовки макроконстант (CONSYST), используемых для расчетов характеристик радиационной защиты реакторов на быстрых нейтронах.

Цель и задачи исследования

Целью работы является уточнение нейтронно-физических констант в быстрой области энергий и их верификация в расчетах экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

- Выполнен анализ дифференциальных экспериментов и валидация нейтронно-физических констант для конструкционных материалов.
- Получены оценки нейтронных резонансов для библиотеки РОСФОНД на основании анализа дифференциальных экспериментов в быстрой области энергий.
- Предложен и реализован новый алгоритм подготовки микросечений для системы групповых констант БНАБ в части формирования матриц рассеяния и образования вторичных гамма-квантов.
- Расширен набор выходных форматов программы подготовки констант CONSYST для адаптации её под новые инженерные коды.
- Выполнена верификация нейтронно-физических констант в расчетах экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах из международных справочников бенчмарк-экспериментов.

Научная новизна работы

- Впервые выполнена оценка погрешности группового приближения при расчетном моделировании экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах (при ослаблении потока частиц в 10^4 раз), предельное значение которой не превышает 5 %.
- Впервые предложен и реализован новый алгоритм подготовки микро и макроконстант для системы CONSYST/БНАБ.
- Впервые выполнена прецизионная оценка экспериментов по пропусканию нейтронов через толстые образцы реакторных материалов (кремния и ниобия).
- Получена новая оценка нейтронных констант на основании оцененных экспериментов для кремния и ниобия.

Практическая значимость

- Обосновано использование системы констант БНАБ для расчетного моделирования радиационной защиты быстрых реакторов с прецизионной точностью на основании анализа результатов расчета бенчмарк-экспериментов из международной базы данных.

- Адаптированное константное обеспечение БНАБ является составной частью проектных кодов АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
- Созданы согласованные расчетные задания для валидации нейтронных данных библиотек ОЯД для реакторных материалов (кремния и ниобия).
- Российская библиотека ОЯД РОСФОНД дополнена уточненными данными по нейтронным константам кремния и ниобия.
- Библиотеки ОЯД РОСФОНД и библиотека групповых констант БНАБ были использованы при выполнении государственных контрактов и федеральных целевых программ.
- Получены свидетельства о государственной регистрации базы данных и программы для ЭВМ на отдельные компоненты системы групповых констант CONSYST/БНАБ.

Личный вклад автора заключается

- в непосредственном выполнении всех этапов работы, а именно оценке экспериментов по пропусканию нейтронов через толстые образцы реакторных материалов для кремния и ниобия, начиная от оцифровки и систематизации данных из журналов измерений, их обработки, составления расчетных моделей до оценки экспериментов и уточнения данных нейтронных резонансов;
- в выполнении работ по расширению форматов представления констант и корректировке алгоритмов получения данных библиотеки БНАБ;
- в разработке расширенной версии системы подготовки констант CONSYST/GNDL в части формирования микро- и макроконстант;
- в выполнении, в соавторстве с коллегами, работ по верификации системы константного обеспечения в расчетах нейтронно-физических функционалов активной зоны и радиационной защиты;
- в представлении и обсуждении результатов на международных и Российских научных мероприятиях, подготовке публикаций и докладов.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Основная часть представленных расчетных величин получена с использованием прецизионного кода MCNP в расчетах как с детальным

слежением за энергией частиц, так и в групповом приближении. Все используемые в работе расчетные модели интегральных экспериментов созданы на основании информации из международных справочников по критической безопасности (ICSBEP) и баз данных экспериментов по радиационной защите (SINBAD). Обоснованность научных положений достигается за счет использования зарекомендовавших себя моделей и подходов, нашедших широкий отклик в отечественных и зарубежных публикациях.

Положения, выносимые на защиту

- Новые данные по матрицам рассеяния нейтронов и образования вторичных гамма-квантов для групповой библиотеки БНАБ.
- Расширенная версия системы подготовки групповых микро- и макроконстант CONSYST/GNDL.
- Результаты верификации системы групповых констант CONSYST/БНАБ в расчетах нейтронно-физических характеристик экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах.
- Результаты анализа экспериментов по исследованию свойств конструкционных материалов (железо, свинец, кремний и ниобий) при прохождении ИИ сквозь защитные материалы различной толщины.
- Новая оценка нейтронных констант для кремния и ниобия в области энергии 300 - 800 и 7 – 600 кэВ, соответственно.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных научных мероприятиях.

- XVI семинар по проблемам физики реакторов «Волга-2010» в 2010 г. (Тверская обл., Россия).
- Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (НЕЙТРОНИКА) в 2010, 2011, 2013, 2015 и 2016 гг. (г. Обнинск, Россия).
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012 (г. Обнинск, Россия).

- Международная конференция по радиационной защите «ICRS-12 & RPSD-2012» в 2012 г. (г. Нара, Япония).
- Международная конференция по ядерным данным «ND2013» в 2013 г. (г. Нью-Йорк, США) и «ND 2016» в 2016 г. (г. Брюгге, Бельгия).
- 10-я Юбилейная Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» в 2015 г. (г. Обнинск – Москва, Россия).
- 22 международный ежегодный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ» в 2015 г. (г. Обнинск, Россия).
- Международная конференция по физике реакторов «PHYSOR2016» в 2016 г. (г. Сан Валли, США).

Публикации

Основной материал диссертации представлен в 18-ти работах, в том числе в 8 статьях опубликованных в профильных научных изданиях, из которых 3 входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 2 проиндексированы в международной базе данных Scopus; 9 публикаций в сборниках тезисов и докладов международных и Российских конференций; имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ГЛАВА 1. Анализ дифференциальных экспериментов и валидация нейтронно-физических констант конструкционных материалов

Одними из основных источников информации, хранимой в ОЯД, являются либо измерения, либо оптико-статистическое моделирование процессов, для которых отсутствуют прямые экспериментальные данные.

Реакторные материалы можно разделить по назначению: топливо, конструкции и теплоноситель. К топливным материалам относятся делящиеся материалы, используемые в объектах ядерной техники для поддержания цепной реакции деления, такие как ^{235}U, ^{235}Pu, ^{233}U и ^{233}Th. К конструкционным относят материалы, из которых состоят элементы конструкций ядерных установок – железо, хром, никель, кремний, цирконий, ниобий, графит, алюминий, молибден и др. В качестве теплоносителя используются такие материалы как вода (H_2O и D_2O), натрий, свинец и другие.

В международном проекте CEILO сейчас идет работа по уточнению основных реакторных материалов ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu ^{56}Fe и ^{16}O [51], использующая результаты точных измерений сечений и интегральных экспериментов.

Сечение взаимодействия нейтронов с ядрами определяют в экспериментах по пропусканию нейтронов определенной энергии через достаточно тонкий образец исследуемого вещества путем проведения изменений при разной энергии нейтронов – дифференциальные эксперименты. Они проводятся коллективами исследователей в разных лабораториях и странах. Накоплено значительное количество результатов измерений, неплохо согласующихся между собой. Однако каждое совершенствование методики – улучшение энергетического разрешения эксперимента – зачастую выявляет всё новые особенности детального изменения хода сечения с энергией. Это означает, что до сих пор не преодолена проблема энергетического разрешения, и истинная энергетическая зависимость сечения ещё не выявлена.

1.1 Описание дифференциальных экспериментов по прохождению частиц через вещество

В работе выполнен расчетный анализ экспериментов, проводимых в разные годы в ГНЦ РФ-ФЭИ. В выбранных экспериментах исследуются свойства конструкционных материалов, а главное влияние толщины защитного слоя на изменение потока ИИ.

1.1.1 Эксперименты по пропусканию нейтронов в сферической геометрии

В 1980-х годах была выполнена серия экспериментов по исследованию нейтронной и гамма утечек с поверхности сфер из железа, свинца, обедненного урана, никеля и хрома с калифорниевым источником в центре.

В справочнике ICSBEP находятся две бенчмарк-модели, которые были проанализированы в данной работе и выполнено тестирование данных по переносу нейтронов, образованию и переносу гамма-квантов через вещество – железные [72] и свинцовые [73] сферы различного радиуса с калифорниевым источником в центре.

Бенчмарк-эксперимент состоит из четырёх частей:

1) Измерения нейтронных спектров от ^{252}Cf источника самого по себе (рис. 1.1) и с поверхности железных сфер радиусом 10, 15, 20, 25, 30 и 35 см (рис. 1.2).

2) Измерения фотонных спектров от ^{252}Cf источника и с поверхности железных сфер диаметром 15, 20, 25, 30 и 35 см (рис. 1.2).

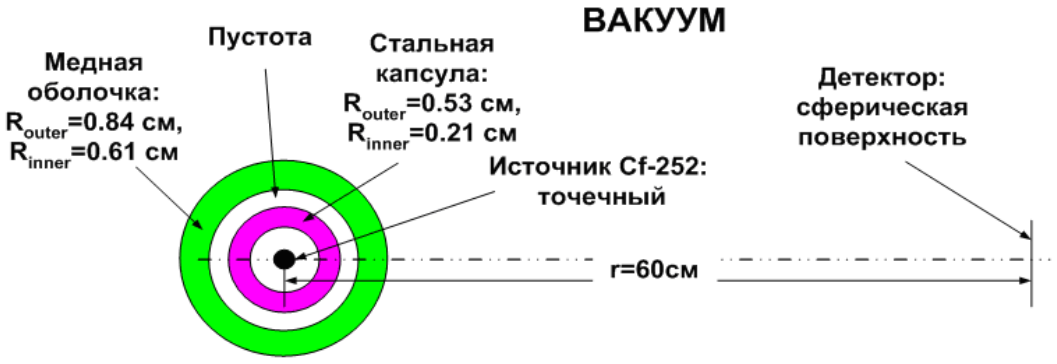


Рисунок 1.1 – Бэнчмарк-модель эксперимента по изучению ^{252}Cf источника

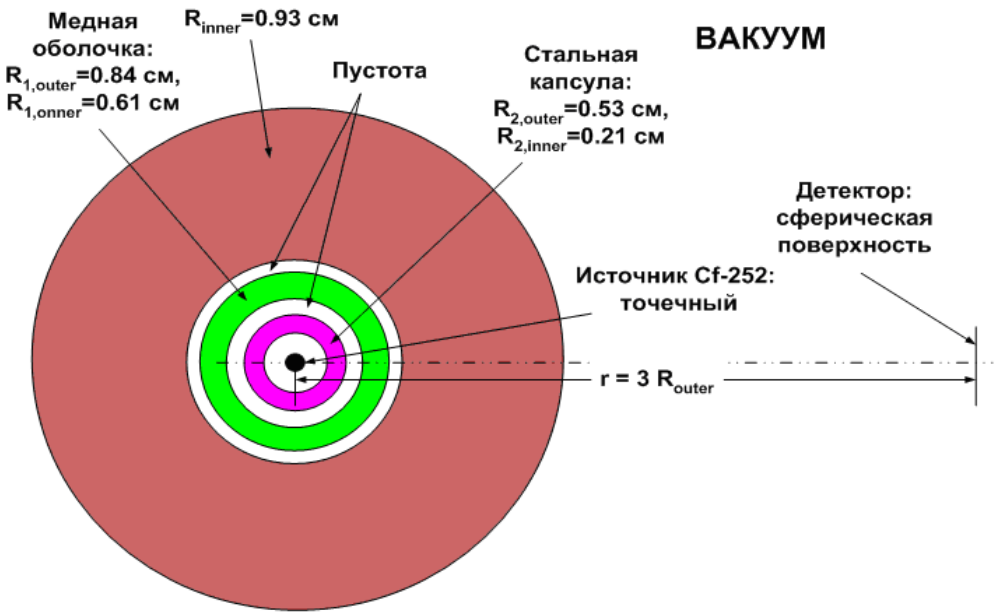


Рисунок 1.2 – Бенчмарк-модель экспериментов по изучению потоков нейтронного и фотонного излучений, с поверхностей сфер различного радиуса с ^{252}Cf источником в центре.

3) Измерения нейтронных спектров с поверхности свинцовых сфер диаметром 10, 20 и 30 см с ^{252}Cf точечным источником в центре (рис. 1.2).

4) Измерения фотонных спектров с поверхности свинцовых сфер диаметром 10, 20 и 30 см с ^{252}Cf точечным источником в центре (рис. 1.2).

В качестве нейтронно-физических констант использовались последние версии библиотек: РОСФОНД, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 и JEFF-3.2 при расчете переноса нейтронов и образования гамма-квантов. EPDL-97 [74] и EEDL-97 [75] использовались при расчете переноса гамма-квантов и электронов, соответственно.

1.1.2 Эксперименты по пропусканию нейтронов в плоской геометрии

Цикл экспериментальных исследований, выполненных в 1960-х в Физико-энергетическом институте (Обнинск, Россия) был направлен на изучение характеристик резонансной структуры полного нейтронного сечения конструкционных материалов в области энергий, где достижимое в то время энергетическое разрешение было недостаточным для детального выявления этой структуры. Исследовались свойства ядер следующих реакторных материалов: Fe, Ni, Cr, Si, Nb, Be, Cu, Zr, Mo, W, Pb, Bi, Al, Zn, V, Ti, C, Mg, P,

S, Ga, Sb, Ba, Ta и смеси Fe+Ni. Такие эксперименты позволяют оценить защитные свойства материалов - какая часть нейтронов пройдет сквозь материалы без взаимодействия, при увеличении толщины образцов. В течение примерно десяти лет на установках были выполнены измерения функций пропускания для полутора десятков элементов. Методика этих работ была опубликована в работе [76].

Были получены средние сечения взаимодействия нейтронов с реакторными материалами [77], факторы самоэкранировки [78] и подгрупповые параметры [79] для промежуточных и быстрых нейтронов, которые вошли в библиотеку групповых констант БНАБ-78. Используя эти работы, были разработаны методы получения ядерных свойств ядер (силовые функции, фаза потенциального рассеяния и др.) и корректировки рассчитанных функционалов. Полученные экспериментально средние сечения были доложены и опубликованы на ядерном семинаре [80] и в библиотеке данных EXFOR [81]. Измерение функции пропускания нейтронов через толстые слои материалов чувствительны к минимумам полного сечения вблизи резонанса [82].

Многогрупповой подход, утвердившийся в расчетах реакторов и защиты, казалось бы, сделал неактуальным вопрос о точном знании поведения сечения с изменением энергии. В этом подходе энергетическая шкала разбивается на группы. В пределах каждой группы полное сечение элемента (или изотопа) считается постоянным, а его истинное изменение с энергией учитывается с помощью специальных коэффициентов, расчет которых может быть сделан, если известно распределение сечения по величине в пределах данной группы (плотность распределения сечения данного изотопа в каждой группе).

Из информации, полученной из измеренных функций пропускания через различные слои материалов можно получить средние сечения в определенном энергетическом интервале, уточнить резонансные свойства материалов и получить подгрупповые параметры.

При создании библиотеки групповых констант БНАБ-93 был применен новый подход к формированию сечений, которые были получены из библиотеки

ОЯД ФОНД-2.2 [83], но и в этом случае для некоторых нуклидов групповые сечения были откорректированы на указанных экспериментах.

Большинство экспериментов, как уже упоминалось, было выполнено достаточно давно. Пересмотр этих данных на новом уровне, с новыми вычислительными возможностями и методами позволяет уточнить имеющуюся информацию и извлечь дополнительные сведения. Так, в 2008 году была опубликована работа по оценке экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов для железа, хрома и никеля [84], что говорит об актуальности работы по обработке и сохранению существующих экспериментальных данных. В настоящей работе проанализированы результаты оценки данных для железа и выполнена оценка экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов для кремния и ниобия.

1.1.2.1 Физика эксперимента

Целесообразность выполнения экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов через толстые образцы была обусловлена получением экспериментальных данных для величин непосредственно входящих в уравнение переноса нейтронов, стационарное интегральное уравнение переноса нейтронов [85, с. 21-22]:

$$\Phi\left(\vec{r},E,\vec{\Omega}\right)=\int_0^{\infty}\exp\left[-\int_0^{s}\Sigma_t\left(\vec{r}-t\vec{\Omega},E,\vec{\Omega}\right)dt\right]\cdot S\left(\vec{r}-s\vec{\Omega},E,\vec{\Omega}\right)ds\,, \qquad (1.1)$$

где Σ_t – полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом, S – источник нейтронов.

В многогрупповом приближении уравнение (1.1) примет вид:

$$\Phi\left(\vec{r},E,\vec{\Omega}\right)=\int_0^{\infty}\exp\left[-\int_0^{s}\Sigma_t^g\left(\vec{r}-t\vec{\Omega},\vec{\Omega}\right)dt\right]\cdot S^g\left(\vec{r}-s\vec{\Omega},\vec{\Omega}\right)ds\,,\ \text{для}\ E\in\Delta E^g.$$

В случае, если в интервале ΔE^g полное сечение (Σ_t) испытывает сильные резонансные флуктуации, вычисление интеграла становится проблематичным (особенно, если известно лишь о наличии резонансных флуктуаций сечения, но индивидуальные параметры неизвестны – область неразрешенных резонансов).

Непосредственное измерение функций пропускания для отдельных резонансных нуклидов открывает возможность решить задачу, не прибегая к чрезвычайно трудоемким измерениям детальных зависимостей нейтронных сечений.

$$T_i(t) = \int\limits_{E \in \Delta E^g} R(E) \cdot \exp\left[-\sigma_{t,i}(E) \cdot \rho_i \cdot t\right] dE,$$

где $T(t)$ – функция пропускания, зависящая от толщины образца, $R(E)$ – нормированный на интервале ΔE спектр нейтронов пучка (функция разрешения), ρ – ядерная плотность образца, t – его толщина, $\sigma_t(E)$ – полное сечение.

Метод исследования состоял в измерении в условиях «хорошей геометрии» величины пропускания нейтронов, энергия которых не выходит за пределы некоторого интервала ΔE, через образцы изучаемого материала в зависимости от толщины этих образцов. Термин «хорошая геометрия» подразумевает отсутствие вклада рассеянных нейтронов, т.е. считается, что регистрируются лишь те нейтроны пучка, которые прошли через образец без единого столкновения.

Измерения функций пропускания нейтронов проводились на ускорителях Ван-де-Граафа при определенной энергии протонов и фиксированной толщине мишени (рис. 1.3). Начинались измерения с фиксации скорости счета в открытом пучке (без образца-фильтра), а затем с образцами, постепенно увеличивая их суммарную толщину. Измерение без образца повторялось после проведения четырех-пяти измерений с образцами (пример данных, записанных в журнал измерений, приведен в приложении А). Скорость счета в открытом пучке линейно интерполировались для того, чтобы каждому измерению с образцом приписывалось свое измерение без образца и, соответственно, своя погрешность. Величина измеренного пропускания для толщины t определялась как отношение:

$$T_{изм}(t) = \frac{N(t)}{N_0},$$

где $N(t)$ – нормированная на монитор скорость счета детектора с образцом толщиной t, N_0 – аналогичная нормированная скорость счета в открытом пучке. Наблюдаемое (эффективное) сечение получается из пропускания:

$$\sigma(t) = \frac{-\ln T_{изм}(t)}{t},$$

где толщина t должна быть выражена в количестве ядер на барн. Под наблюдаемым сечением подразумевается полное сечение вещества, полученное в ходе эксперимента для данной толщины образца. Такая величина позволяет более детально изучить ход функции пропускания и получить средние полные сечения, экстраполяцией на нулевую толщину.

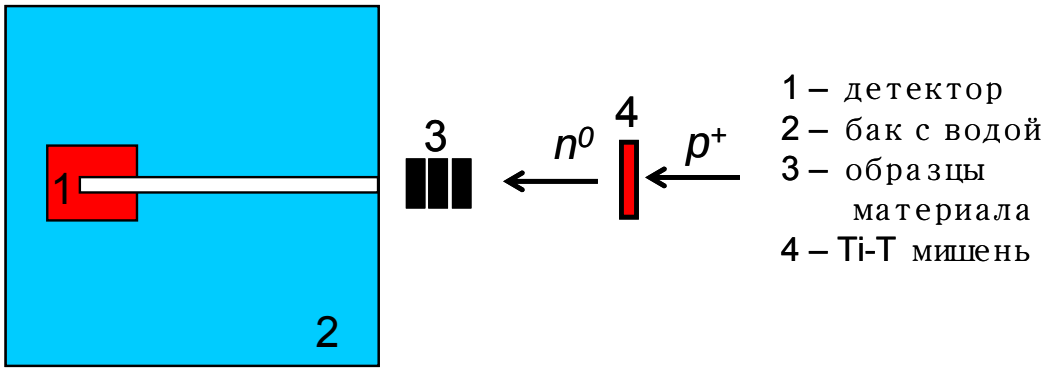


Рисунок 1.3 – Схема экспериментальной установки

Источником нейтронов служила титан-тритиевая мишень электростатического генератора протонов. Торможение протонов в этой мишени являлось главным фактором, определяющим ширину функции разрешения.

Описание источника нейтронов

Энергия протонов E_p вычисляется по частоте стабилизации тока поворотного магнита f. Использовано соотношение:

$$\frac{E_p}{E_{p0}} = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2, \qquad (1.5)$$

где E_{p0} = 1019 кэВ – пороговая энергия реакции ^{3}H(p,n) под нулевым углом, а f_0 – соответствующая ей частота поворотного магнита ускорителя – 7460 Гц. Пороговая энергия протонов для получения нейтронов под углами более 90^o равняется 1148 кэВ, а соответствующая ей частота - 12560 Гц.

Энергия нейтронов определялась из кинематических таблиц [86] для заданной протонной энергии и угла вылета относительно пучка протонов.

Определение ширины нейтронного интервала

Толщины тритиевых слоев мишеней указывались в паспортах завода-изготовителя без указания погрешностей. Эти толщины определяли ширину функции разрешения. Протоны, взаимодействующие с тритием на поверхности мишени, обращенной к пучку, имели максимальную энергию, определенную напряжением на ускорителе и согласованным с ним напряжением магнитного поля. Протоны, взаимодействующие с тритием в слоях мишени, прилегающих к молибденовой подложке, претерпевшие торможение в титане, имели минимальную энергию. Таким образом, толщина мишени определяла ширину функции разрешения ΔE_p [87]:

$$\Delta E_p = 0{,}24\frac{Z}{E_p}\left(\ln\frac{E_p}{Z} + 5{,}08 + 0{,}004Z\right)\cdot 12{,}57\,,$$

где E_p – энергия протонов в МэВ, Z – атомный номер материала мишени, в котором происходит замедление (в данном случае Ti = 22).

Описанные выше формулы получены без учета релятивистских поправок, поскольку они малы. Ядро-мишень рассматривалось в состоянии покоя, пренебрегая эффектом Доплера. Замедление нейтронов, рожденных в мишени, на титане не учитывалось.

Определение спектра нейтронного источника

Для вычисления расчетной формы функций пропускания по библиотекам ОЯД и её сравнения с экспериментом необходимо задаваться формой спектра нейтронов на интервале ΔE, использованного в эксперименте. Стандартно использовался источник с постоянным спектром для заданного интервала. В работе сделано предположение, что выход нейтронов пропорционален сечению реакции ^{3}H(p,n). Это сечение бралось из графиков при известной энергии протонов и рабочего угла установки из работы [88]. Примеси в составе мишени не учитывались.

Описание детекторов

Регистрация нейтронов в обеих установках производилась с помощью батарей счетчиков типа СНМО-5, заполненных BF_3 с 2% аргона. Обогащение по ^{10}B составляло 80%. Блоки счетчиков и коллиматоры со всех сторон были окружены защитным слоем из карбида бора.

Описание образцов-фильтров.

Между мишенью и входным отверстием коллиматора устанавливались образцы-фильтры из исследуемого материала.

Все образцы были сделаны из химически чистых материалов (что было указано в паспортах на материал). Доля примесей не превышала 1%. Стенки цилиндрических контейнеров насыпных образцов были также пренебрежимо малы по сравнению с толщиной образцов. Вклады тонкостенных контейнеров в пропускание не учитывались.

Образцы имели форму цилиндров диаметром D=4,50±0,01 см. Масса образцов M определялась путем взвешивания. Толщина образцов в единицах ядер/см^2 (ядер/барн) определялась из измеренных веса и диаметра:

$$t = \frac{4 \cdot N_A \cdot m}{A \cdot \pi \cdot D^2},$$

где N_A-число Авогадро, m – масса образца, A – атомный вес. Данных по весу образцов практически не сохранилось.

1.1.2.2 Оценка погрешностей результатов измерений

При проведении экспериментов у экспериментаторов всегда появляются некоторые неопределенности результатов – например, влияние вклада других составляющих, не исследуемых в данной работе, на результаты измерений. В данном случае в качестве экспериментальных данных имеется функция пропускания, зависящая от толщины образцов и энергетического интервала, а, следовательно, необходимо определить погрешности каждой из этих составляющих:

1) Погрешность измеряемой величины. Сюда входит статистическая погрешность, неопределенность знания нуклидного состава примесей образцов и их оболочки.
2) Неопределенность знания энергетического интервала. Сюда входит неопределенность состояния тритиевой мишени, энергии налетающих протонов и угла вылетающих нейтронов.
3) Погрешность толщины образцов. Погрешность приборов измерения и влияние возможного поворота образца.

При проведении оценки экспериментальных данных были выполнены расчеты всех составляющих погрешностей и неопределенностей, вносимых в итоговую величину пропускания, энергию и спектр нейтронов, ширину интервала и т.д. Погрешность вносимая оболочкой образцов на больших толщинах не превышает 1 %, на малых – не более 10 %. Неопределенность знания энергетического интервала для толстых мишеней (толщиной 2,6 мг/см^2) может приводить к смещению границы интервала до 30 кэВ, для тонких мишеней (толщиной до 1,0 мг/см^2) может приводить к смещению до 10 кэВ. Достоверным определением границ интервала является совпадение (в пределах погрешности) измеренного и расчетного (из файлов ОЯД) среднего полного сечения. Погрешность толщины образцов составляет 1%. Более подробно это описано в работе [76].

1.1.2.3 Расчетная модель

Проверка полученных экспериментальных данных проводилась расчетным путем, по прецизионной программе MCNP, использующей метод Монте-Карло. В качестве нейтронно-физических констант использовались современные библиотеки: РОСФОНД, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0, JEFF-3.2 и TENDL-2014. Схема расчетного задания изображена на рис. 1.4.

В программе в качестве материала указываются все природные изотопы образца-фильтра с соответствующими концентрациями и плотностью. Статистическая погрешность расчетов по MCNP для самых больших толщин

при низких энергиях не превышала 1%. Для высоких энергий и для меньших толщин образцов погрешность была еще менее существенной.

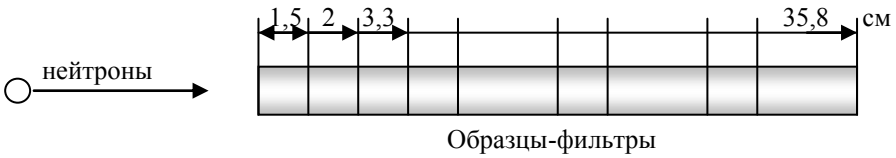


Рисунок 1.4 – Схема расчетного задания

При определении энергии нейтронов существует, как было сказано выше, неопределенность в границах интервала и спектре нейтронов из-за:

1) образования слоя масляного нагара на передней поверхности мишени, т.к. на эту сторону подключалась вакуумированная трубка ускорителя, которая содержит следы масла, используемого при откачке воздуха. В результате энергетический интервал смещался вниз по энергии;
2) выгорания трития в результате нагрева и испарения с передней поверхности мишени, в результате чего изменялся спектр нейтронов: происходило сужение энергетического интервала из-за уменьшения толщины мишени. Считалось, что слой титана оставался неизменным.

Для подтверждения или опровержения изложенных выше гипотез были проведены 5 расчетов с различными интервалами и спектрами:

а) стандартный расчет без изменений;
б) сдвиг интервала вниз без изменения ширины спектра нейтронов;
в) изменение спектра нейтронов в верхней области до минимума;
г) изменение спектра нейтронов в верхней области до минимума и сдвиг только верхней границы интервала;
д) изменение спектра нейтронов в верхней области до минимума и сдвиг всего интервала вниз.

Помимо описанного выше варьирования спектра и энергетического интервала усреднения, смещающегося вниз, рассматривалось и возможность смещения интервала вверх по энергии, сдвига частоты стабилизации поворотного магнита в процессе определения порога реакции ^{3}H(p,n). Частота установки известна достаточно точно, а частота, на которой происходит

регистрация пороговой реакции может уменьшиться и тогда это приводит к завышению энергетического интервала. При некоторых частотах (при несовпадении средних измеренных и расчетных сечений) были дополнительно рассчитаны средние полные сечения, смещенных вверх по энергии интервалов для свежей мишени со стандартным спектром нейтронов.

1.2 Эксперименты в сферической геометрии

Прежде чем переходить к расчетам защитных сфер, были получены результаты расчетов с детальным слежением за энергией частиц в экспериментальном групповом разбиении для спектра нейтронов с источника (рис. 1.5). Из рисунка видно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных, что говорит о корректном задании источника нейтронов в расчете. Ожидаемое совпадение результатов расчетов с использованием различных библиотек связано с малой толщиной оболочек источника самого по себе.

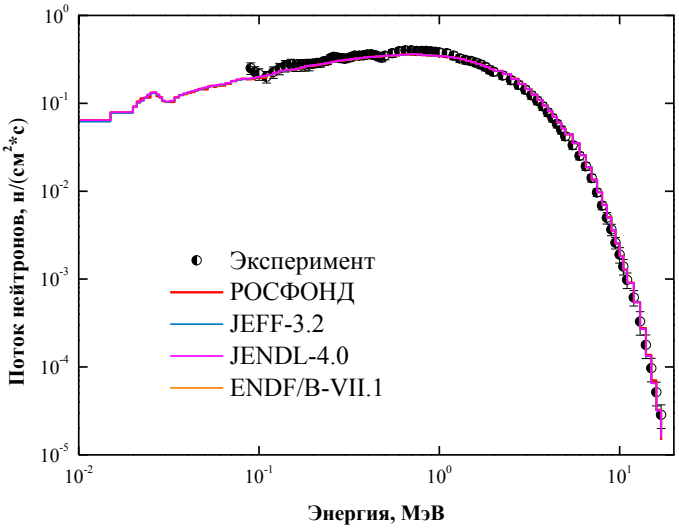


Рисунок 1.5 – Сравнение потока нейтронов с источника без защитных сфер экспериментальных данных и расчетов, полученных по разным библиотекам ОЯД

Переходя к расчетам с защитой из материалов свинца и железа необходимо решить две расчетные задачи, как описано в ICSBEP с нейтронным и фотонным источниками в центре защитных сфер.

В расчете с нейтронным калифорниевым источником фиксируются нейтроны и образованные в результате нейтронных реакций гамма-кванты (источником вторичных гамма-квантов будут являться нейтронные взаимодействия с ядрами свинцовой и железной защиты). Отсюда важно

совпадение расчетного и экспериментального потоков нейтронов. В расчете с фотонным источником фиксируются только гамма-кванты и затем получается суммарный спектр гамма-квантов.

Особенностью таких экспериментов с увеличением толщины защитного материала при исследовании фотонного излучения является то, что с ростом радиуса сфер увеличивается вклад вторичных гамма-квантов в итоговый спектр. Это происходит как за счет поглощения первичных частиц источника, так и за счет увеличения количества взаимодействий нейтронов с ядрами среды.

1.2.1 Железные сферы

Большинство защитных конструкций выполняется из сталей, в которых содержится большое количество железа, поэтому исследование прохождения нейтронов, гамма-квантов и образования вторичных гамма-квантов является весьма актуальной задачей. Сравнения расчетов, выполненных по последним версиям библиотек, позволяет увидеть разброс оценок и выбрать наилучшую из них.

В результате сравнения экспериментальных данных с расчетами нейтронного (рис. 1.6 *а*, *в* и *д*) и фотонного (рис. 1.6 *б*, *г* и *е*) потоков с использованием различных библиотек ОЯД с поверхности железных сфер различного радиуса (15, 25 и 35 см) видно хорошее согласие в нейтронных данных.

При сравнении фотонных данных наблюдается тенденция к увеличению расчетно-экспериментальных расхождений с увеличением радиуса сфер, что говорит о недостаточно корректном знании взаимодействия фотонов с веществом. Образование гамма-квантов на железе в библиотеке JEFF-3.2 значительно отличается от других библиотек.

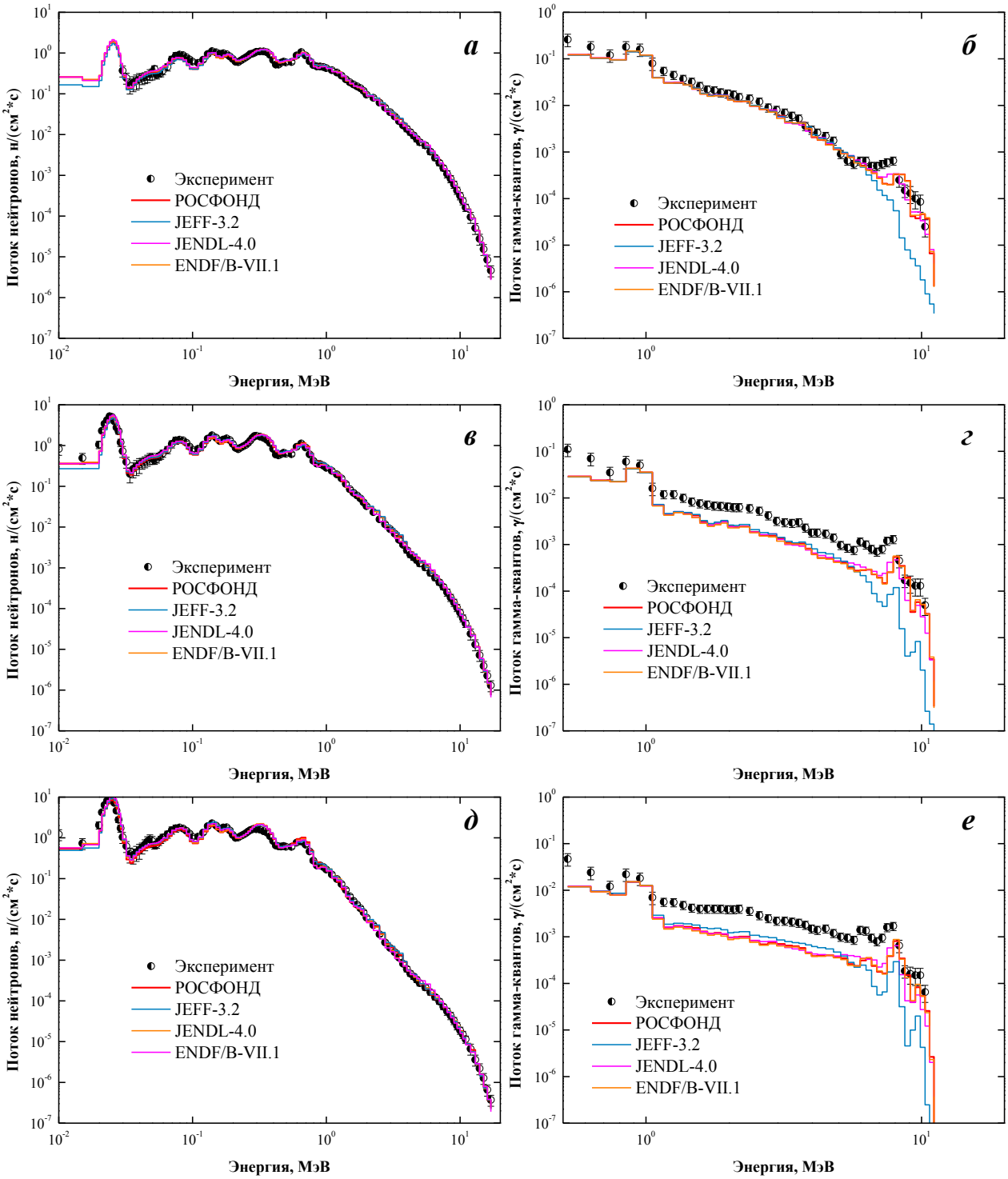


Рисунок 1.6 – Сравнение спектра нейтронов (*а*, *в* и *д*) и фотонов (*б*, *г* и *е*) с поверхности железных сфер экспериментальных данных и расчетов с детальным слежением за энергией частиц, с использованием различных библиотек ОЯД

1.2.2 Свинцовые сферы

Сравнение утечек нейтронных (рис. 1.7 *а* и *в*) и фотонных (рис. 1.7 *б* и *г*) спектров с поверхности свинцовых сфер показывает тенденцию, аналогичную железным сферам: нейтронные данные представляются достаточно надежными,

а фотонные необходимо пересматривать (основываясь на данных бенчмарк-моделях).

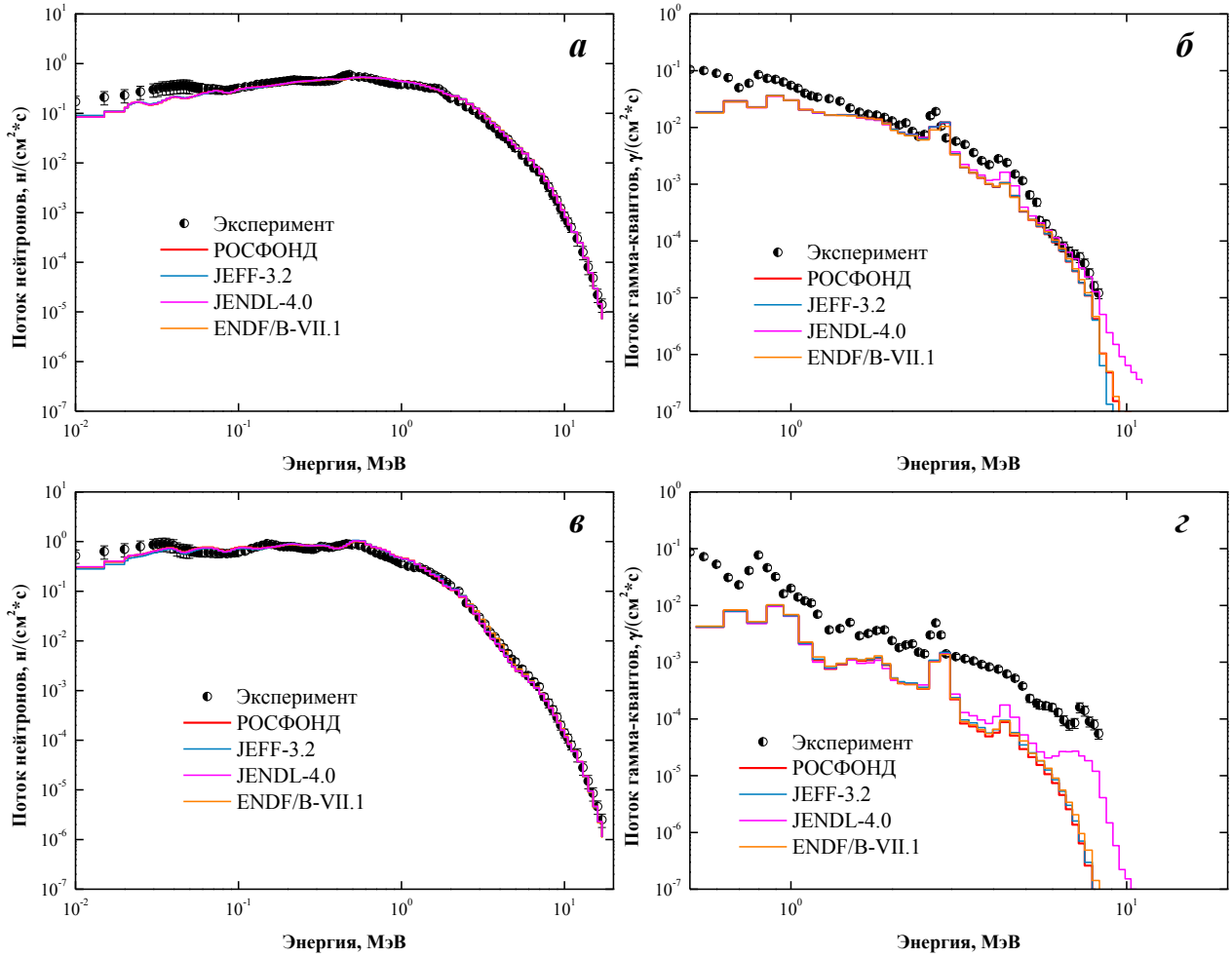


Рисунок 1.7 – Сравнение спектра нейтронов (*а* и *в*) и фотонов (*б* и *г*) с поверхности свинцовых сфер экспериментальных данных и расчетов с детальным слежением за энергией частиц с использованием различных библиотек ОЯД

Анализ прохождения ИИ через свинцовые и железные сферы показал достаточно хорошее согласие в нейтронном спектре и сильные расхождения в фотонных спектрах [89]. Для окончательной рекомендации по корректировке выходов вторичных гамма-квантов необходимо привлечение дополнительных экспериментальных данных.

1.3 Эксперименты в плоской геометрии

Пропускания в плоской геометрии позволяют выявлять долю нейтронов, проходящих сквозь слои материала без взаимодействия. Эта особенность хороша для исследования защитных свойств материалов и определения резонансной структуры. Экспериментальные исследования по измерению

пропускания нейтронов в плоской геометрии были выполнены в области энергий 1 – 3000 кэВ. Эта информация позволяет оценить надежность современных ОЯД в части описания полного сечения и его резонансной структуры в отдельных интервалах [90].

1.3.1 Измерения функций пропускания нейтронов для железа

В работе проанализированы экспериментальные данные по пропусканию нейтронов для железа в области энергий от 80 до 400 кэВ. Анализ экспериментов затронул только часть опубликованных данных, для узких интервалов. В ходе анализа энергетические интервалы были немного подправлены.

На рисунке 1.8 приведены средние сечения, полученные путем экстраполяции на нулевую толщину измеренных значений наблюдаемого сечения, и непрерывная зависимость полного сечения кремния.

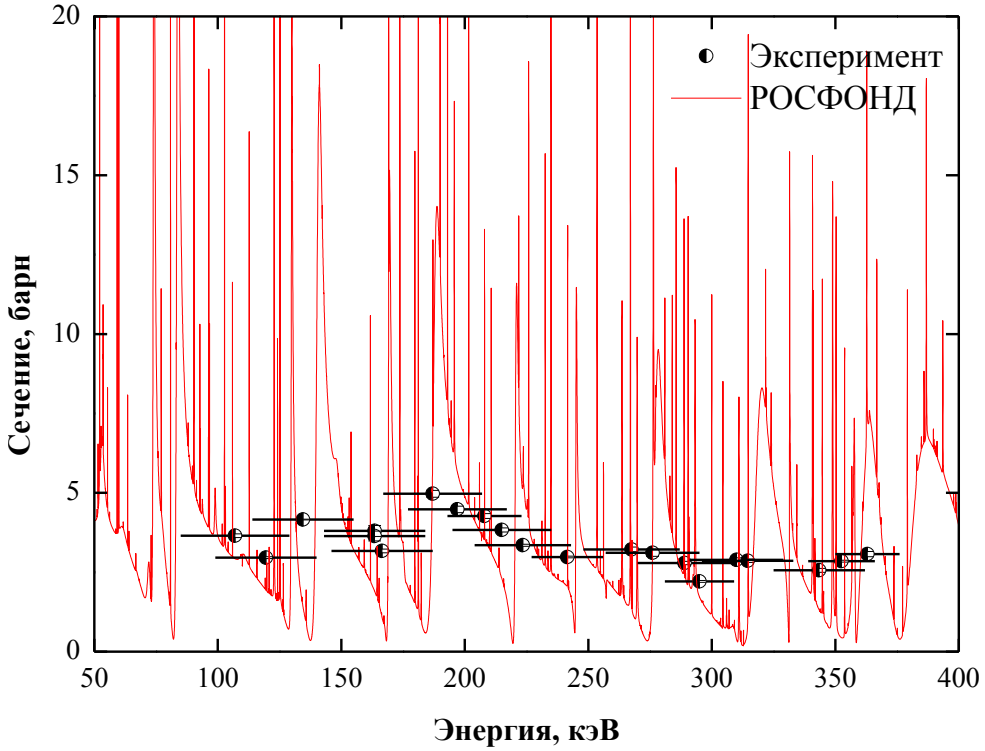


Рисунок 1.8 – Сравнение непрерывного и оцененного среднего полного сечения железа в области энергий 50 – 400 кэВ

Экспериментальные и расчетные средние сечения совпадают в пределах погрешности (5%) в оцененных энергетических интервалах.

1.3.1.1 Расчеты по современным библиотекам ОЯД

На рис. 1.9 для интервала энергий 146 – 187 кэВ изображены наблюдаемое сечение и расчетный вариант с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД. На этом интервале результаты расчета с использованием библиотек ОЯД достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

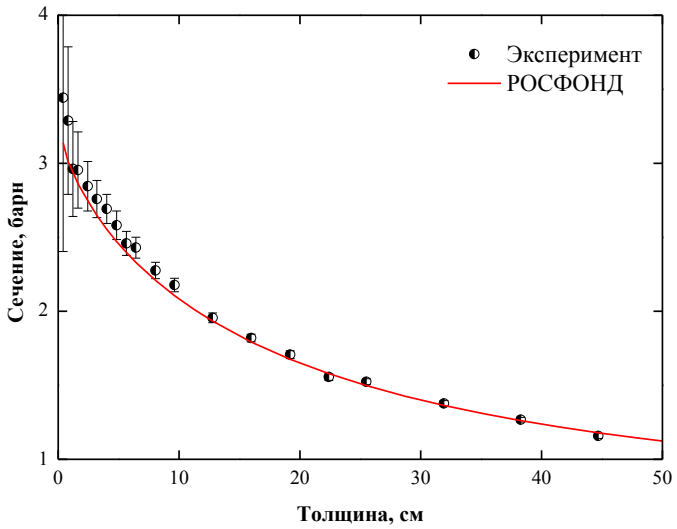


Рисунок 1.9 – Сравнение изменения полного сечения кремния с толщиной в интервале 146 – 187 кэВ, полученных экспериментально и расчетным путем

На рис. 1.10 для интервала энергий 339 – 366 кэВ изображены наблюдаемое сечение и его расчет с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД.

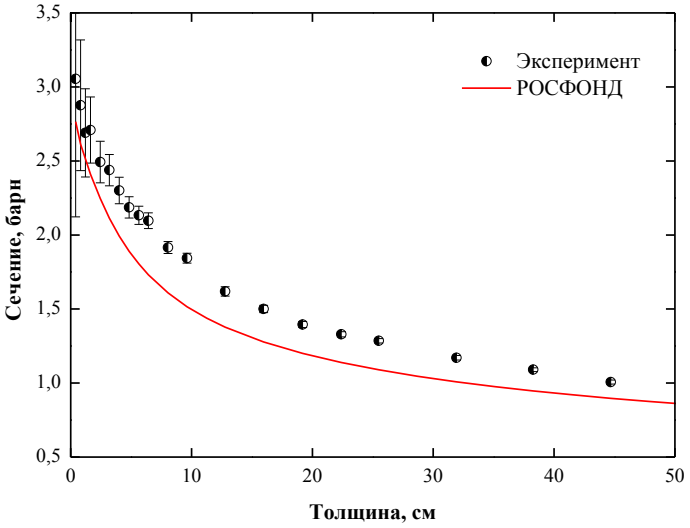


Рисунок 1.10 – Сравнение изменения полного сечения кремния с толщиной в интервале 339 – 366 кэВ, полученных экспериментально и расчетным путем

На этом интервале результаты расчета с использованием библиотек ОЯД также находятся в разумном согласии.

Для других энергетических интервалов оцененные экспериментальные и расчетные кремниевые данные с использованием различных библиотек ОЯД приведены в приложении Б.

Исходя из оцененной экспериментальной информации, описание резонансной структуры полного сечения железа в файлах библиотек ОЯД является достаточно корректной в интервале 10 – 400 кэВ.

1.3.2 Измерения функций пропускания нейтронов для кремния

В работе оценены экспериментальные данные по пропусканию нейтронов для кремния в области энергий от 300 до 3000 кэВ [91].

На рисунке 1.11 приведены средние сечения, полученные путем экстраполяции на нулевую толщину измеренных значений наблюдаемого сечения, и непрерывная зависимость полного сечения кремния.

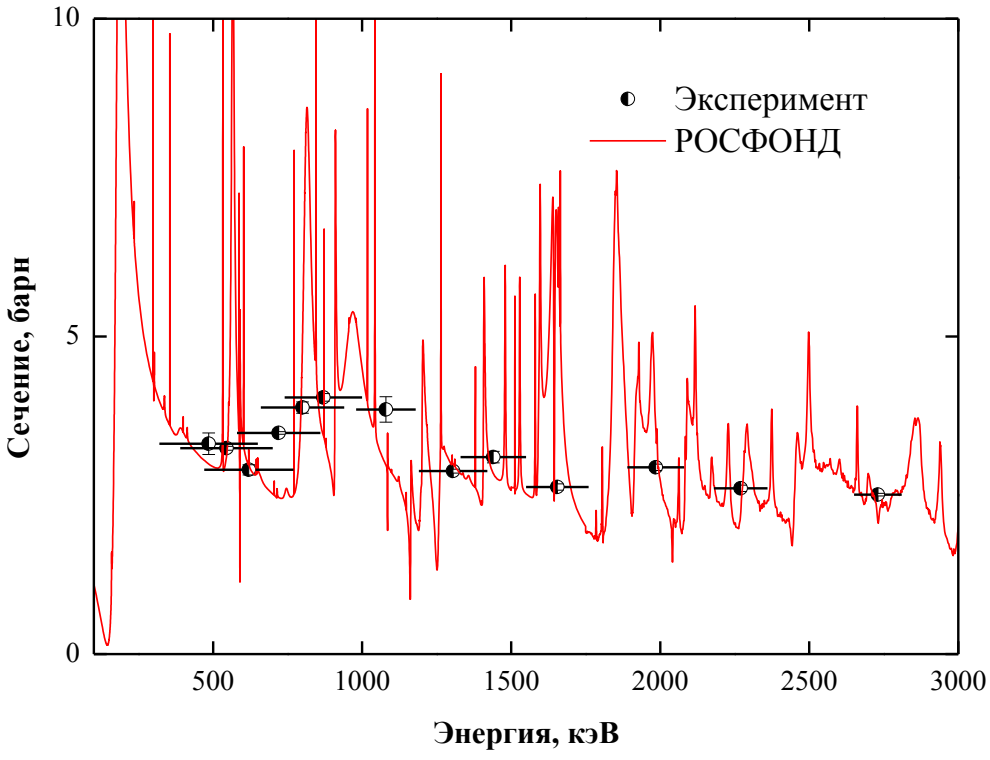


Рисунок 1.11 – Сравнение непрерывного и оцененного среднего полного сечения кремния в области энергий 300 – 3000 кэВ

Экспериментальные и расчетные средние сечения совпадают в пределах погрешности (5%) в оцененных энергетических интервалах.

1.3.2.1 Расчеты по современным библиотекам ОЯД

На рис. 1.12 для интервала энергий 390 – 700 кэВ изображены наблюдаемое сечение и расчетный вариант с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД. На этом интервале ярко выражено недостаточное описание энергетических изменений полного сечения кремния в файлах ОЯД с увеличением толщины образцов-фильтров. При больших толщинах (последние точки на рис. 1.9) расчетная величина наблюдаемого сечения превышает экспериментальную в полтора раза.

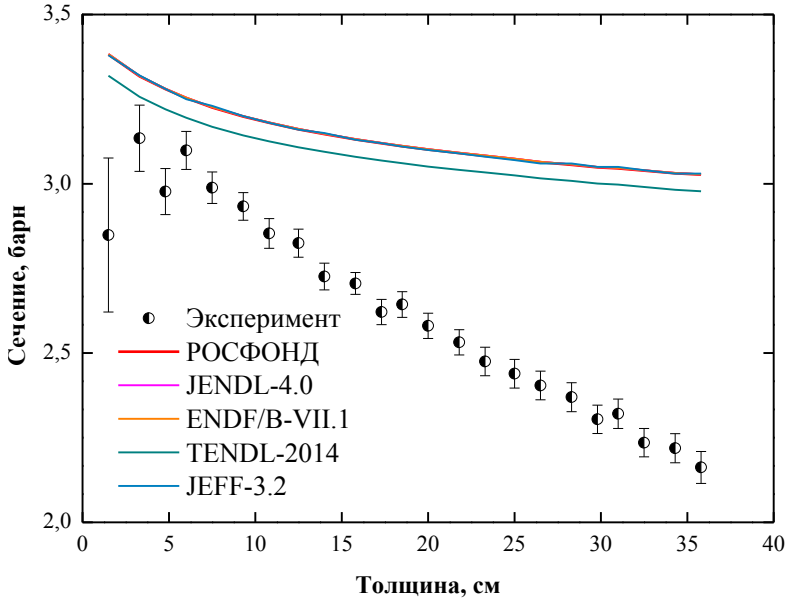


Рисунок 1.12 – Сравнение изменения полного сечения кремния с толщиной в интервале 390 – 700 кэВ, полученных экспериментально и расчетным путем

На рис. 1.13 для интервала энергий 580 – 860 кэВ изображены наблюдаемое сечение и его расчет с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД. Здесь резонансная самоэкранировка в файле проявляется лучше, чем в интервале 390 – 700, но все же недостаточна для корректного описания.

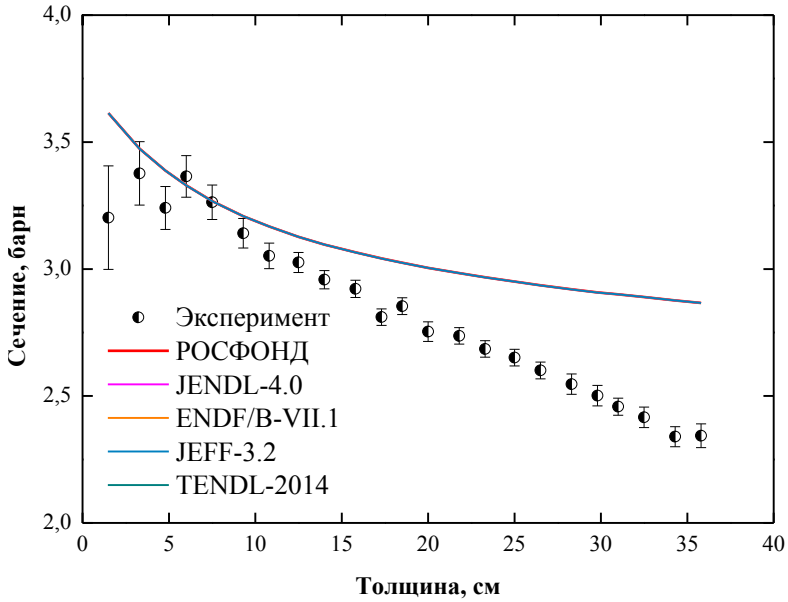


Рисунок 1.13 – Сравнение изменения полного сечения кремния с толщиной в интервале 580 – 860 кэВ, полученных экспериментально и расчетным путем

На рис. 1.14 для интервала 740 – 1000 кэВ сопоставлены изменения наблюдаемого сечения с толщиной и его расчетный вариант с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД. Здесь результаты расчета с использованием библиотек ОЯД достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами.

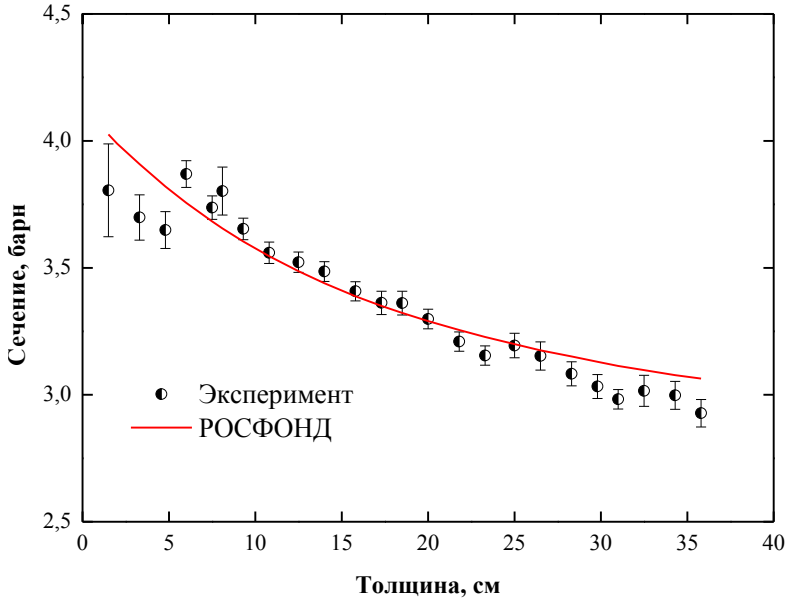


Рисунок 1.14 – Сравнение изменения полного сечения кремния с толщиной в интервале 740 – 1000 кэВ, полученных экспериментально и расчетным путем

Далее по энергии в библиотеках содержится непротиворечивая информация: с увеличением энергии расчетно-экспериментальных серьезных расхождений не наблюдается.

На всех графиках и во всех обработанных экспериментальных данных первые значения для 2-3-х толщин систематически выбиваются от правильного хода кривой сечения, но лежат в пределах погрешности. Видимо, имелся какой-то дефект у первых двух образцов-фильтров кремния.

Для других энергетических интервалов оцененные экспериментальные и расчетные кремниевые данные с использованием различных библиотек ОЯД приведены в приложении В.

Исходя из оцененной экспериментальной информации, описание резонансной структуры полного сечения кремния в файлах библиотек ОЯД является недостаточно корректной в интервале 300 – 800 кэВ.

1.3.3 Измерения функций пропускания нейтронов для ниобия

В работе оценены экспериментальные данные по пропусканию нейтронов для ниобия в области энергий от 7 до 3000 кэВ [92].

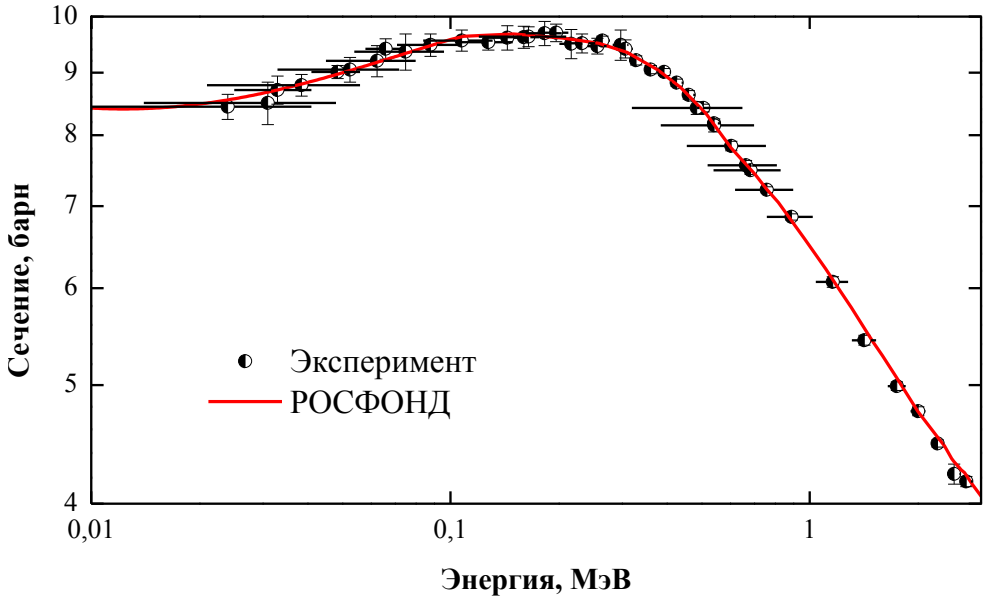


Рисунок 1.15 – Сравнение непрерывного и оцененного среднего полного сечения ниобия в области энергий 0,01 – 3,0 МэВ

На рисунке 1.15 изображены экспериментальные данные для оцененных энергетических интервалов. Линией изображен непрерывный ход полного сечения, полученный по библиотеке ОЯД РОСФОНД.

Сравнение среднего полного сечения полученного из эксперимента и из файлов показало корректность выбора энергетических интервалов, а малое отличие (до 5%) расчета от эксперимента говорит о надежной информации о полном сечении в библиотеках ОЯД.

1.3.3.1 Расчеты по современным библиотекам ОЯД

Несмотря на сходство полного сечения файлов библиотек ОЯД, существуют различия в описании резонансной структуры полного сечения. На рисунке 1.16 изображены экспериментальные значения наблюдаемого сечения и расчетные величины, полученные по программе MCNP с использованием современных библиотек ОЯД для области энергий 0,32 – 0,65 МэВ.

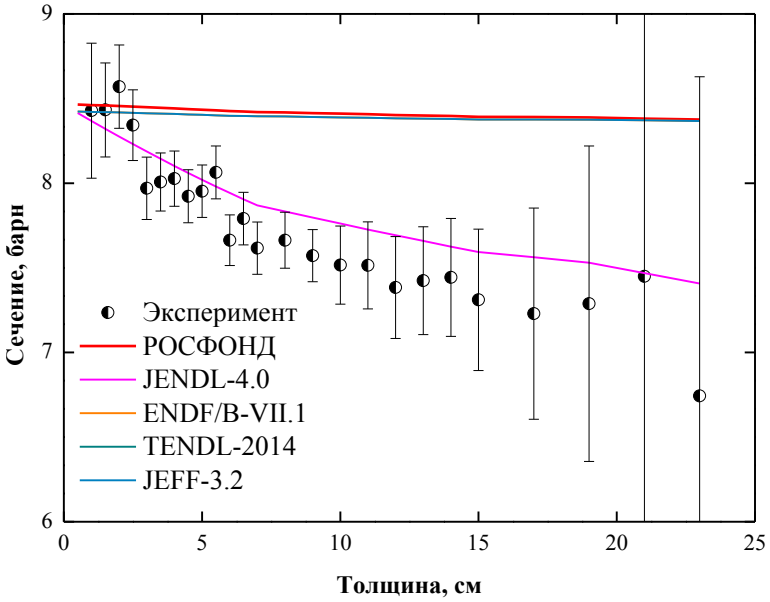


Рисунок 1.16 – Сравнение наблюдаемого сечения ниобия с расчетами по различным оцененным библиотекам в области 0,32 – 0,65 МэВ

Приведенный выше рисунок показывает, что для корректного описания изменения хода полного сечения с увеличением толщины необходимо уточнить данные ниобия в указанной области энергий, как это сделано в JENDL-4.0.

Для других энергетических интервалов экспериментальные и расчетные ниобиевые данные с использованием различных библиотек ОЯД приведены в приложении Г.

Из полученной расчетной информации можно сделать вывод о степени надежности современных ОЯД ниобия в области энергий от 7 до 3000 кэВ.

Сравнение изменения полного сечения с увеличением толщины, полученного экспериментально с расчетами по современным библиотекам показало следующее:

- В области энергий выше 600 кэВ все результаты по современным библиотекам ОЯД хорошо согласуются между собой и совпадают с результатами измерений, оцененных в настоящей работе.
- В области энергий от 100 до 600 кэВ хорошее согласие с экспериментальными данными показала только одна библиотека – JENDL-4.0.
- В области энергий от 7 до 100 кэВ библиотеки ОЯД показали различные результаты. Эту область необходимо пересматривать [93].

1.4 Выводы к Главе 1

В главе 1 выполнен анализ экспериментов, по прохождению ИИ сквозь различные толщины вещества, направленных на исследование свойств конструкционных материалов (железо, свинец, кремний и ниобий).

Показано хорошее согласие экспериментальных и расчетных величин, выполненных с использованием последних версий библиотек ОЯД при сравнении нейтронного спектра утечки с поверхности железных и свинцовых сфер с калифорниевым источником в центре.

При сравнении спектров утечки гамма-квантов с поверхности железных и свинцовых сфер с калифорниевым источником в центре показано, увеличивающееся с толщиной защитных сфер, расчетно-экспериментальное расхождение, обусловленное недостаточным выходом гамма-квантов в файлах ОЯД. Необходимо привлечение дополнительных экспериментов, направленных

на исследование образования вторичных гамма-квантов для окончательного вывода о целесообразности корректировки данных.

Выполнена оценка экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов для кремния и ниобия в области энергий 0,3 – 3,0 МэВ и 0,07 – 3,0 МэВ соответственно. Пересмотрена оцененная экспериментальная информация для железа в области энергий 80 – 400 кэВ в части определения границ энергетических интервалов.

Проанализированы экспериментальные данные и оценены погрешности, связанные со статистической погрешностью измерений, величиной фона, энергией, шириной и формой спектра нейтронов источника, изменением титан-тритиевой мишени, наблюдаемого и среднего сечений.

Получен набор расчетных заданий, который рекомендуется использовать для валидации информации в библиотеках ОЯД для кремния и ниобия в указанных выше энергетических областях.

Эксперименты по измерению функции пропускания нейтронов для кремния свидетельствуют о том, что необходим пересмотр данных в области энергий 0,3 – 0,8 МэВ. В области энергий 0,8 – 3,0 МэВ в ОЯД кремния хранится достаточно надежная информация.

Оцененный эксперимент по измерению функций пропускания нейтронов для ниобия подтверждает необходимость внесения изменений в библиотеку ОЯД РОСФОНД для ниобия, как это было сделано в библиотеке JENDL-4.0.

Приводимые данные по конструкционным элементам являются примером возможности проверки надежности информации широко используемых файлов ОЯД в важной для быстрых реакторов области энергий.

ГЛАВА 2. Повышение точности определения нейтронно-физических констант на основе анализа дифференциальных экспериментов

На оцененных выше экспериментальных данных по измерению функции пропускания нейтронов для кремния и ниобия можно проводить валидацию информации, хранимой в ОЯД. Из предыдущей главы видно, что необходимо модифицировать данные библиотеки РОСФОНД для кремния и ниобия, чему и посвящена настоящая глава.

Современные ОЯД основываются на дифференциальных экспериментах, выполненных в основном времяпролетным способом измерения. Одним из крупнейших центров по исследованию нейтронно-ядерных свойств реакторных материалов находится в США (ORNL) [94]. Измеренные функции пропускания через тонкие образцы и с высокой энергетической точностью преобразуются в эффективные сечения и зачем по полуэмпирической формуле получают средние сечения [95]. Если измерения проводятся в резонансной области, то с помощью модельных кодов (SAMMY, TALYS) формируют нейтронные резонансные параметры. Такой вид записи позволяет сократить объемы хранения ядерных данных без потери точности в описании энергетического хода сечения взаимодействия частиц с ядрами вещества. Непрерывный ход сечения восстанавливается процессинговыми кодами (NJOY [96], ГРУКОН [97], AMPX [98]) используя одноуровневый формализм Брейта-Вигнера для области неразрешенных резонансов или указанный в оценке формализм для разрешенной области.

Несмотря на существующий единый подход к формированию и оценке ядерных данных существует множество оценок, как для отдельного нуклида, так и определенной энергетической области и сечения взаимодействия. Национальные библиотеки ОЯД содержат порой не однозначную информацию, что может быть связано с датой пересмотра оцененной информации (более поздние версии библиотек не содержат обновленной информации) или

приверженность специалистов определенных стран к своим экспериментальным измерениям и методам.

2.1 Обзор современного состояния библиотек ОЯД

Общепризнанными современными библиотеками ОЯД для реакторных приложений являются РОСФОНД, ENDF/B-VII.0, JENDL4.0, JEFF-3.2 и TENDL-2014. Последняя, благодаря разработанной инструментальной базе, каждый год обновляется. Уточняются отдельные реакции определенных нуклидов на существующем наборе экспериментальных данных, круг экспериментов постоянно расширяется, создаются проблемно-ориентированные библиотеки Оценки в других библиотеках строятся на использовании новых, уточненных экспериментах и методах получения сечений и сопряжены, как правильно, с большими интеллектуальными, финансовыми и денежными затратами, в результате чего не так часто обновляются. Годы создания библиотек: РОСФОНД (2005, последняя правка выполнена в 2010), ENDF/B-VII.0 (2006), JENDL-4.0 (2012) и JEFF-3.2 (2014).

2.1.1 Краткое описание формата представления ОЯД (ENDF-6 формат)

Основными файлами (разделами) формата ENDF-6 при описании взаимодействий нейтронов с ядром, важные для описания экспериментов по измерению полного пропускания нейтронов, являются: общая информация (MF=1), резонансные параметры (MF=2) и сечения реакций (MF=3). В файле с общей информацией отображается наличие для расчета сечений (LRP=1 и LRP=2) или отсутствие (LRP=-1 и LRP=0) резонансных параметров и другая информация, характеризующая оценку данного нуклида в целом.

Резонансные параметры записываются в файле MF=2 секции MT=151 и содержат идентификатор модели расчета сечений (LRF) для: R-матричной модели, Рейха-Мура, одно- или многоуровневого формализма Брейта-Вигнера. Область разрешенных параметров обозначается идентификатором LRU = 1, а неразрешенных LRU = 2. Первую, восстанавливают по одному из формализмов

указанных выше, вторую, только по одноуровневому формализму Брейта-Вигнера. При LRP=2 восстановление сечений по резонансным параметрам не выполняется, указывая на то, что сечения уже восстановлены. При параметре LRP=1 происходит расчет сечений, при этом энергетическая область разрешенных резонансов в файле MF=3 пропускается. Для расчета сечений в неразрешенной области резонансов существует два подхода: LSSF=0 и LSSF=1. В первом случае имеющая подложка из сечений секции MF=3 MT=1 добавляется к рассчитанным сечениям, во втором случае резонансные параметры используется только для расчета факторов самоэкранировки сечений и в секции MF=3 MT=1 сечения для данной энергетической области должны быть пропущены.

В файле MF=3 MT=1 записываются полные сечения для заданных энергий нейтронов, учитывая описанные выше особенности учета резонансных параметров.

2.1.2 Характеристики ядер кремния и ниобия в библиотеках ОЯД

В таблице 2.1 приведены основные характеристики резонансных областей (MF=2, MT=151) исследуемых реакторных материалов. В таблице области разрешенных и неразрешенных резонансов обозначены RR и URR соответственно, L обозначает число угловых моментов, ВГ – энергия верхней границы области, $N_{рез}$ – число резонансов в данной области и также указан закон, по которому выполняется восстановление сечений.

Таблица 2.1 – Основные свойства резонансных параметров ядер ^{28}Si и Nb современных в библиотеках ОЯД

Библиотека ОЯД	^{28}Si				Nb					
	RR				RR				URR	
	ВГ, МэВ	L	$N_{рез}$	закон	ВГ, кэВ	L	$N_{рез}$	закон	ВГ, кэВ	L
ENDF/B-VII.I	1,75	3	58	RM	7,35	2	194	SBW	-	-
JEFF-3.2	1,75	3	58	RM	7,35	2	194	SBW	-	-
JENDL-4.0	1,75	3	58	RM	7,0	2	201	MBW	600,0	3
РОСФОНД	1,75	3	58	RM	7,0	2	199	MBW	100,0	3
TENDL-2014	1,75	4	79	MBW	10,02	3	297	MBW	30,46	3

Из таблицы видно, что практически все данные по кремнию основываются на упомянутой выше работе [99]. Альтернативная оценка области разрешенных резонансов предложена в библиотеке TENDL-2014, но и эти данные не позволяют описать обнаруженные расчетно-экспериментальные расхождения в области энергий 300 – 800 кэВ. Ниобиевые данные в библиотеках различаются гораздо сильней – разное число резонансов и энергия верхней границы разрешенной и неразрешенной областей.

Исходя из обзора ОЯД видно, что для кремния необходимо пересмотреть область энергий разрешенных резонансов 300 – 800 кэВ на наличие пропущенного (неучтенного) резонанса. Для ниобия, из-за совпадения расчетных величин с использованием библиотеки JENDL-4.0 с экспериментальными данными, необходимо расширить область неразрешенных резонансов вплоть до 600 кэВ.

2.2 Область разрешенных резонансов

При корректировке нейтронно-физических констант кремния по измерениям функций пропускания нейтронов через образцы природного кремния целесообразной становится задача уточнения резонансных параметров ^{28}Si, т.к. в природной смеси его содержание составляет 92,23 %.

2.2.1 Метод корректировки резонансных параметров ^{28}Si

В рамках работы была выполнен подбор резонансных параметров ^{28}Si методом стохастической оптимизации [100] для национальной библиотеки ОЯД РОСФОНД так, чтобы расчетные значения зависимостей функций пропускания наиболее лучшим образом описывали экспериментальные кривые с точки зрения минимизации расчетно-экспериментальных расхождений (рис. 2.1). Схема алгоритма состоит из следующих этапов [101]:

1) В области разрешенных резонансов файла ОЯД формата ENDF/B (MF=2, MT=151, LRU=1) методом Монте-Карло оптимизации подбираются параметры фиктивного (не учтённого) набора (в простейшем случае

одного) резонансных параметров, согласно их теоретико-статистическим распределениям.

2) Из сформированных на предыдущем этапе наборов оставляют для дальнейшего рассмотрения только те, для которых отсутствуют существенные расхождения с дифференциальными экспериментами (непосредственное измерение детального хода сечений в данной энергетической области): расчетная величина не должна выходить за рамки погрешностей измерений.

3) Выбор наиболее приемлемого (компромиссного) варианта нейтронных констант осуществляется по результатам комплексного сопоставления расчетно-экспериментальных расхождений для выбранной совокупности дифференциальных (экспериментов по измерению функций пропускания) и интегральных экспериментов (экспериментов на критических стендах или исследовательских реакторах), которой предложенная оценка нейтронных констант не должна противоречить.

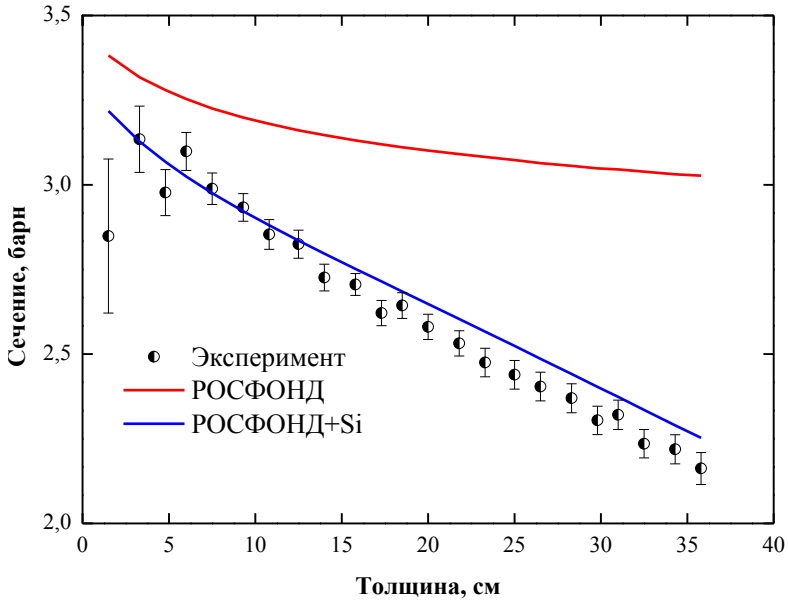


Рисунок 2.1 – Расчетно-экспериментальные зависимости функции пропускания нейтронов от толщины образцов кремния, усредненные по энергетическому интервалу 390-700 кэВ

С помощью описанного алгоритма было установлено, что приемлемое описание экспериментальных зависимостей дифференциальных экспериментов достигается путем внесения пропущенного (фиктивного) *s*-резонанса с энергией

700 кэВ, спином 0,5, нейтронной и радиационной ширинами 10^4 и 1, соответственно:

7.000000+5 5.000000-1 1.000000+4 1.000000+0 0.000000+0 0.000000+0

Свидетельства о наблюдениях резонанса при этой энергии (но малым по величине) есть в измерениях детального полного сечения на 80-ти метровой пролетной базе ORELA [102] (ORNL, США) выполненные под руководством D.C. Larson [99]. Также в ранних версиях библиотеки ОЯД JEFF-2.2 в оценках полного сечения естественной смеси кремния данный резонанс присутствует, впоследствии в более поздних версиях оценок он был пропущен (рис. 2.2).

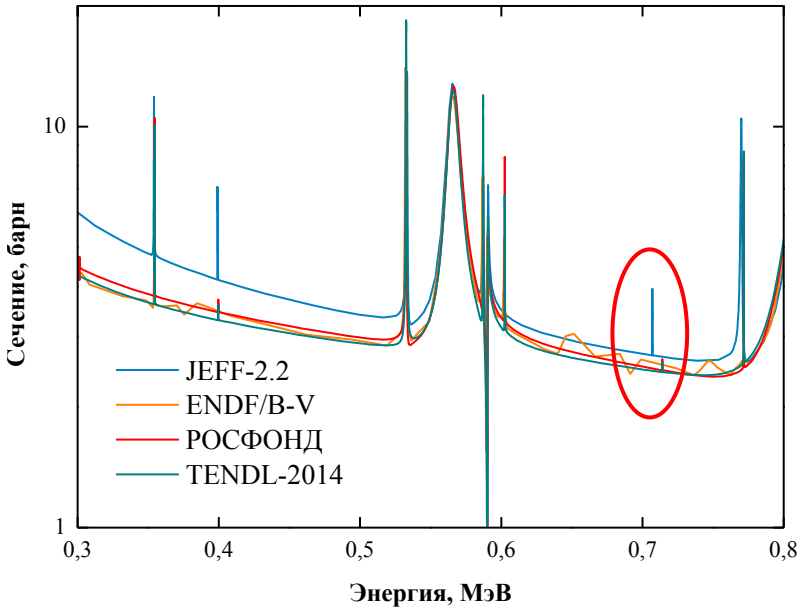


Рисунок 2.2 – Сравнение полного сечения кремния в библиотеках ОЯД в области энергий 300-800 кэВ

2.2.2 Тестирование модифицированных данных кремния

Откорректированные данные кремния в первую очередь были проверены на «чистых» экспериментах, состоящих практически из одного элемента – OKTAVIAN [103]. Данная серия экспериментов была выполнена в Японии в 1980-х годах для изучения свойств материалов Al, Si, Ti, Cr, Mn, Co, Cu, Zr, Nb, Mo и других. В центре сферы, заполненной порошком или стружкой исследуемых элементов, находился источник нейтронов – тритиевая мишень, на которую был направлен пучок дейтронов. Радиус кремниевой сферы был равен 60 см. На рис. 2.3 изображены результаты расчетов описанной выше модели с

использованием исходных (зеленым цветом) и модифицированных (красным цветом) данных библиотеки РОСФОНД в сравнении с экспериментом.

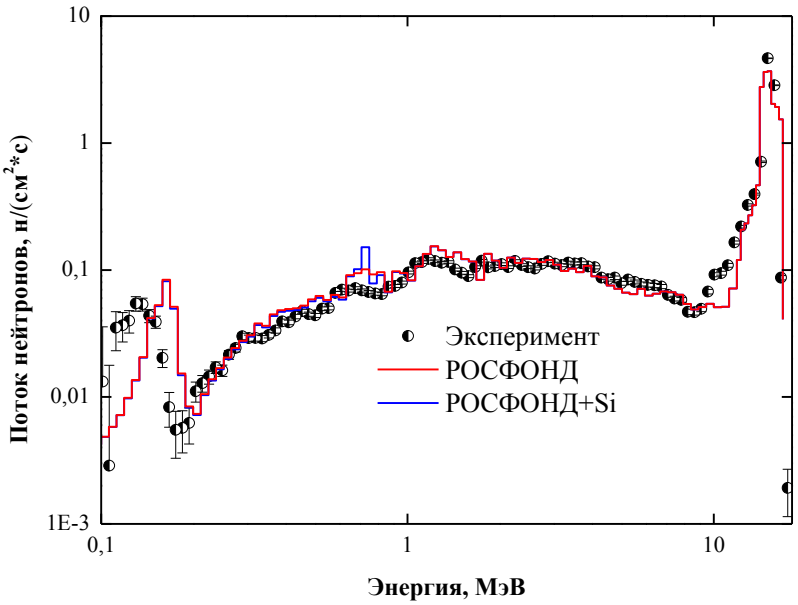


Рисунок 2.3 – Сравнение расчетов исходных и модифицированных данных библиотеки РОСФОНД2010 с экспериментом OKTAVIAN

Из рисунка видно, что внесенный фиктивный резонанс изменяет результаты расчета нейтронного спектра. Нейтроны проходят по минимуму резонанса и в итоге расчетно-экспериментальные расхождения незначительно увеличиваются в области энергий немного ниже и улучшаются немного выше 700 кэВ.

Основными реперными экспериментами в международном справочник ICSBEP, пригодными для проверки нейтронно-физических свойств кремния являются эксперименты, выполненные на физическом стенде ГНЦ РФ–ФЭИ БФС-1 [104] в сотрудничестве с Национальной лабораторией Айдахо (INL, США). Экспериментальная программа состояла из двух серий исследований по изучению вопросов безопасного хранения остеклованных радиоактивных отходов, в частности, в хранилище Юкка-Маунтин (штат Невада, США).

Первая серия исследований была выполнена на критической сборке БФС-79 (HEU-MET-MIXED-005 [105]), активная зона которой была составлена из алюминиевых труб (внешний диаметр 5.0 см, толщина стенок 0.1 см, высота около 200 см) в гексагональной решётке, заполненных таблетками высокообогащенного металлического урана (обогащение по $^{235}U \approx 90$ %,

внешний диаметр 4.6 см, высота 0.5 см, вес 148 г), в алюминиевой оболочке (толщина 0.03 см) и таблетками двуокиси кремния (высота 2 см). Вторая серия экспериментов на сборке БФС-81 (PU-MET-MIXED-001 [106]) была полностью аналогична первой, за исключением того, что вместо высокообогащенного урана активная зона заполнялась таблетками плутония (обогащение по ^{239}Pu ≈ 95 %).

Варианты откорректированных констант были протестированы в расчетах функционалов измеряемых на сборках БФС-79 и БФС-81. Сравнение результатов расчетно-экспериментальных расхождений реакторных функционалов для предложенных данных по ^{28}Si приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Сравнение расчетно-экспериментальных расхождений реакторных функционалов для критических сборок БФС и предложенных откорректированных данных для ^{28}Si.

Индекс	Эксперимент	ОЯД	Расчет/Эксперимент–1, %
БФС-79-5			
$\sigma_f(^{238}\mathrm{U})/\ \sigma_f(^{235}\mathrm{U})$	0.0150 ± 0.005	РОСФОНД	6.7 ± 3.8
		РОСФОНД + Si	5.3 ± 3.8
$\sigma_c(^{197}\mathrm{Au})/\ \sigma_f(^{235}\mathrm{U})$	1.15 ± 0.05	РОСФОНД	-21.7 ± 4.9
		РОСФОНД + Si	-2.6 ± 4.7
БФС-81-1			
$\sigma_f(^{238}\mathrm{U})/\ \sigma_f(^{235}\mathrm{U})$	0.0168 ± 0.0005	РОСФОНД	3.5 ± 3.2
		РОСФОНД + Si	2.0 ± 3.1
$\sigma_c(^{197}\mathrm{Au})/\ \sigma_f(^{235}\mathrm{U})$	1.11 ± 0.05	РОСФОНД	2.5 ± 4.2
		РОСФОНД + Si	-0.2 ± 4.0

Результаты расчетов спектральных характеристик урановой сборки (БФС-79-5) показывают уменьшение расчетно-экспериментального расхождения [107], для плутониевой системы (БФС-81-1) вносимые данные не привели к ухудшению расчетно-экспериментального расхождения, учитывая большую погрешность расчетов.

На графиках (рис. 2.3) приведены расчетные значения эффективного коэффициента размножения нейтронов ($K_{эф}$), полученные по разным библиотекам ОЯД в зависимости от типа конфигурации в порядке возрастания

значения числа делений в тепловой области энергий (характеристика среднего спектра нейтронов по активной зоне).

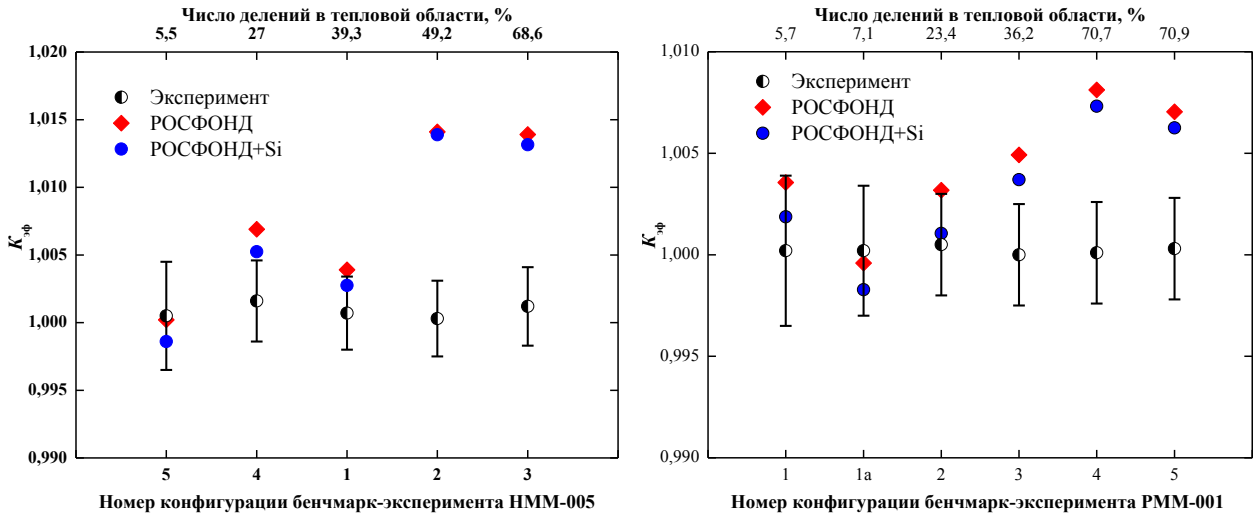


Рисунок 2.3 – Сравнение результатов расчета критичности с использованием оригинальными и модифицированными нейтронно-физическими константами кремния с экспериментом

Из представленных результатов расчетов видно, что использование откорректированных данных, позволяет сократить расчетно-экспериментальные расхождения даже в $K_{эф}$ для систем с быстрым и промежуточным спектрами нейтронов. Для систем с тепловым спектром нейтронов внесенные коррективы нейтронных данных не приводят к сокращению расчетно-экспериментальных расхождений, как и следовало ожидать, поскольку изменения вносились только в резонансную область энергии. Предложенные объяснения обнаруженных расхождений, вероятно, не единственно возможные.

Очевидно, что переоценка всей резонансной области ^{28}Si на основании новых экспериментальных данных по дифференциальным и интегральным экспериментам позволит в будущем избежать выявленных противоречий в описании обнаруженных экспериментальных эффектов. Тем не менее, выявленные расхождения, по мнению авторов, представляют интерес и свидетельствуют о необходимости совершенствования знаний о резонансных эффектах сечений элементов в области энергий быстрых и промежуточных нейтронов, для которой поиск приемлемой оценки будет представлять непростую задачу. Целью данной работы не являлось получение новой оценки резонансной области ^{28}Si, которая бы обеспечила безупречное согласование

расчетных и экспериментальных данных. Важно было выработать понимание потребностей в корректировке данных для рассматриваемых материалов и подобрать нейтронные параметры, удовлетворительно описывающие обнаруженные в экспериментах эффекты резонансной самоэкранировки.

2.3 Область неразрешенных резонансов

Библиотека РОСФОНД является копилкой ОЯД, отобранных в основном для корректного описания интегральных экспериментов. В таком ключе устранение расчетно-экспериментальных расхождений возможно заимствованием файла ниобия из другой библиотеки, описывающей эксперимент, например JENDL-4.0. Но наиболее правильным будет отработать методы формирования средних резонансных параметров, используя имеющиеся коды для сохранения компетенций в данной области.

2.3.1 Метод корректировки резонансных параметров ниобия

Оценка средних резонансных параметров в области энергий неразрешенных резонансов для ^{93}Nb была выполнена в рамках двух подходов: стохастического (метод Монте-Карло оптимизации, программа TUNEX [100]) и детерминистического (метод оценки чувствительностей по программе EVPAR [108]). В программе EVPAR реализована возможность учета экспериментальной информации при формировании оценки средних резонансных параметров в области неразрешенных резонансов, такой как, например, средние полные и парциальные сечения, функции пропускания, в том числе измеренные методом самоиндикации. При этом полные и парциальные зависимости функций пропускания рассчитываются с учетом межрезонансной интерференции, доплеровского уширения и статистических флуктуаций ширин резонансов.

В обоих этих методах осуществляется подгонка значений средних резонансных параметров под экспериментальные данные наблюдаемого полного сечения полученного обработкой измеряемых зависимостей функций полного пропускания через образцы различных толщин. Наблюдаемое в

эксперименте полное сечение, усредненное по энергетическому интервалу g, есть сумма средних парциальных сечений, согласно одноуровневому формализму Брейт-Вигнера [85, с. 311] (по которому рассчитываются средние сечения в области неразрешенных резонансов) пропорционально следующему соотношению резонансных параметров:

$$\langle \sigma_{\alpha\beta} \rangle_g^{эксп.} = \left\langle \frac{\Gamma_\alpha \cdot \Gamma_\beta}{\Gamma} \right\rangle_g . \tag{2.1}$$

В рамках статистической теории ядерных реакций согласно формуле Хаузера-Фешбаха-Молдауэра [109] среднее парциальное сечение может быть переписано через средние резонансные параметры следующим образом.

$$\langle \sigma_{\alpha\beta} \rangle_g^{ХФМ} = \frac{\langle \Gamma_\alpha \rangle \cdot \langle \Gamma_\beta \rangle}{\langle \Gamma \rangle} \cdot R_{\alpha\beta}\left(\frac{\langle \Gamma_\alpha \rangle}{\langle \Gamma_\beta \rangle} \right), \tag{2.2}$$

где $R_{\alpha\beta}$ – корреляционная функция, значения которой изменяются в интервале от 0,5 до 1. По смыслу функция $R_{\alpha\beta}$ является поправкой учитывающей флуктуацию ширин резонансов, относительные значения которых, как известно, флуктуируют согласно распределению Портер-Томаса [85, с. 326] с ν =1, 2, ... степенями свободы.

В качестве исходных параметров используются радиусы рассеяния и силовые функции с орбитальными моментами l = 0,1. В таблице 2.2 приведены входные параметры для оценки области неразрешенных резонансов ниобия в энергетическом интервале от 0,007 до 0,6 МэВ, полученные в результате усреднения параметров разрешённых резонансов: нейтронные S_n и радиационные силовые функции S_γ, расстояние между уровнями резонансов $\langle D \rangle$ и радиус рассеяния R. Дополнительно вводились: параметр плотностей уровней, энергия связи нейтрона, число уровней неупругого рассеяния в данной области и их энергия, а так же число спинов для каждого орбитального момента.

Таблица 2.3 – Входные параметры для программ EVPAR и TUNEX для оценки средних резонансных параметров в области неразрешенных резонансов.

l	S_n	S_γ	**<*D*>, эВ**	***R*, фм**
0	6.063E-05	2.572E-03	72.4	7.14
1	7.385E-04	2.932E-03	72.4	7.14

С помощью обоих подходов были получены оценки средних резонансных параметров в области неразрешенных резонансов от 7 до 600 кэВ, тем самым была перенесена верхняя граница данной области со 100 до 600 кэВ ниобия библиотеки ОЯД РОСФОНД. В результате внесения данных корректировок в оценку резонансной области, были устранены расхождения в расчетно-экспериментальных зависимостях полного сечения ниобия (рис. 2.4).

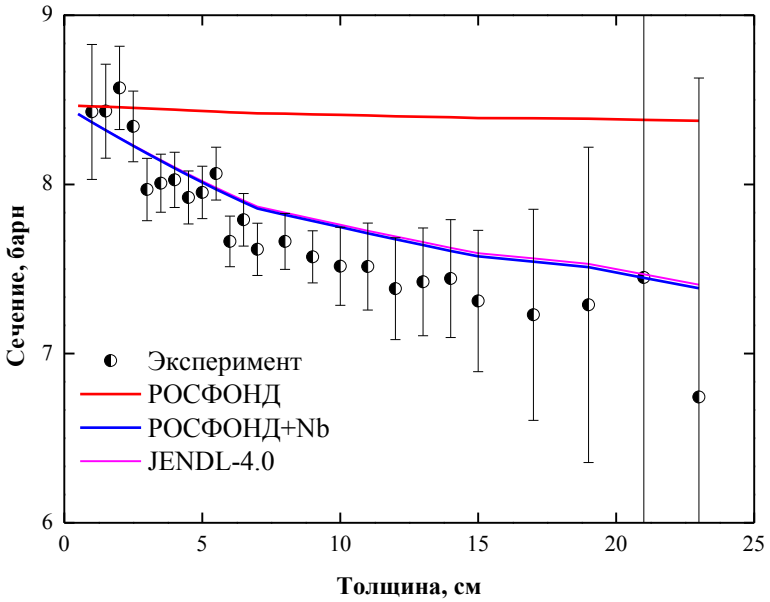


Рисунок 2.4 – Расчетно-экспериментальные зависимости полного сечения от толщины образцов ниобия, усредненные по энергетическому интервалу 320-650 кэВ

Как уже было упомянуто ранее в работе [66] опубликованы результаты корректировки ОЯД ниобия. В указанной работе остро стоял вопрос о валидации полученных нейтронно-физических констант, поэтому требовались эксперименты, подтверждающие необходимость и обоснованность внесения таких изменений. Настоящая работа содержит экспериментальные подтверждения необходимости расширения области неразрешенных резонансов от 100 кэВ до 600 кэВ (рис. 2.5).

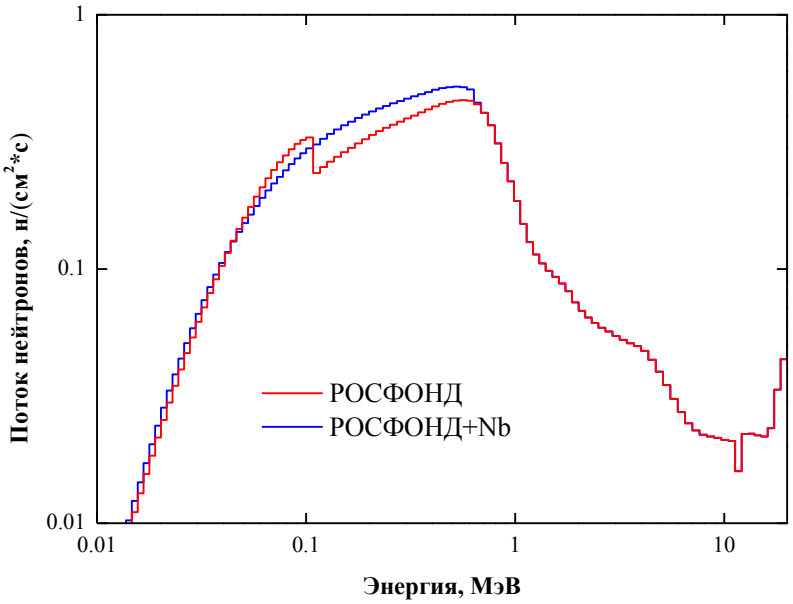


Рисунок 2.5 – Сравнение расчетных спектров утечки со сферы, радиусом 50 см с 20 МэВным источников в центре с использованием оригинального и модифицированного файла ниобия

2.3.2 Тестирование модифицированных данных ниобия

На данный момент существует очень мало экспериментов, имеющих достаточное содержание ниобия, чтобы оценить влияние вносимых авторами изменений.

Аналогично кремнию, ниобиевые данные в первую очередь были проверены на «чистых» экспериментах, состоящих практически из одного элемента – OKTAVIAN. Радиус ниобиевой сферы был равен 28 см. На рис. 2.6 изображены результаты расчетов указанной выше модели с использованием исходных (зеленым цветом) и модифицированных (красным цветом) данных библиотеки РОСФОНД в сравнении с экспериментом.

Измененные нейтронные данные не влияют на результаты расчета бенчмарк-модели, т.к. вклад в область энергий 100 – 600 кэВ вносят в основном рассеянные нейтроны, которые из-за малого радиуса ниобиевой сферы не позволяют оценить структуру нейтронных резонансов.

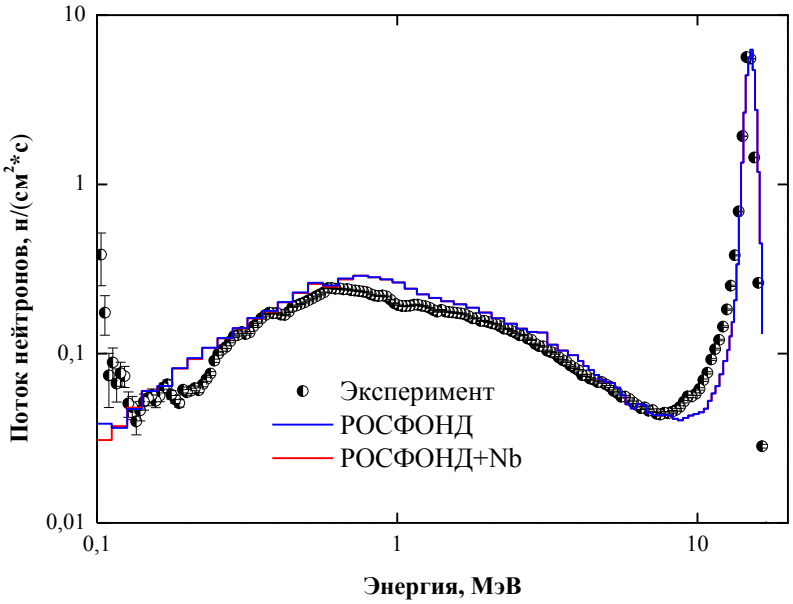


Рисунок 2.6 – Сравнение расчетов исходных и модифицированных данных библиотеки РОСФОНД с экспериментом OKTAVIAN

Единственным экспериментом из справочника ICSBEP является бенчмарк-модель HEU-MET-FAST-047 [110]. Эксперимент с большим содержанием ниобия в качестве конструкционного материала (99 % ниобия и 1 % циркония), высокообогащенного урана и полиэтилена в качестве замедлителя. Данный эксперимент был специально сконструирован и проведен для измерения чувствительности $K_{эф}$ к ниобию в смягченном спектре нейтронов, который может наблюдаться в случае, если космический ядерный реактор с быстрым спектром нейтронов заполнится водой.

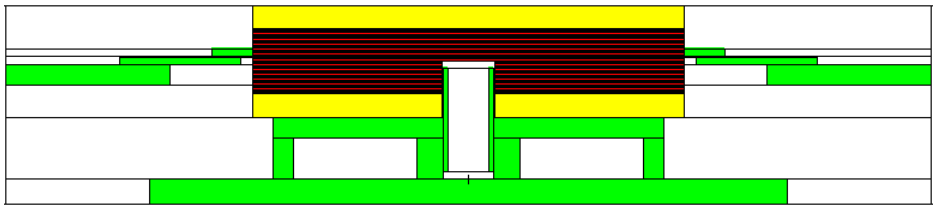


Рисунок 2.7 – Расчетная модель HMF047, центральное сечение по вертикали

На рис. 2.7 изображена расчетная модель. Активная зона состоит из чередующихся слоев ниобия-циркония, обогащенного урана, ниобия-циркония и полиэтилена с верхним и нижним полиэтиленовыми отражателями. Боковые отражатели отсутствуют.

В табл. 3 приведены результаты расчетов $K_{эф}$ сборки HMF047 по программе MCNP с использованием исходных (РОСФОНД) и

модифицированных (РОСФОНД+Nb) файлов, которые свидетельствуют об уменьшении расчетно-экспериментальных расхождений при использовании модифицированного файла ниобия [111].

Таблица 2.4 – Результаты расчетов $K_{эф}$ сборки HMF047

	Эксперимент	РОСФОНД	РОСФОНД+Nb
$K_{эф}$	1.0007±0.0037	1.00497±0.00025	1.00198±0.00026

2.4 Выводы к Главе 2

В главе выполнен обзор библиотек ОЯД и формата ENDF-6 представления сечений и резонансных параметров в разрешенной и неразрешенной областях.

Выполненный анализ имеющихся оценок показал, что для кремния нет данных, позволяющих корректно описать эксперименты по пропусканию нейтронов, а для ниобия только при использовании библиотеки JENDL-4.0 можно описать оцененные эксперименты. Следствием данного анализа является расширение энергетической области неразрешенных резонансов ниобия от 100 до 600 кэВ в файле библиотеки РОСФОНД.

Выполнен подбор резонансных параметров методом стохастической оптимизации для файла кремния библиотеки РОСФОНД, с помощью которых были корректно описаны эксперименты по измерению функции пропускания нейтронов. В результате такой оптимизации был добавлен резонанс в области энергий 700 кэВ.

Получены средние резонансные параметры стохастическим (TUNEX) и детерминистическим (EVPAR) методом в области энергий 7 – 600 кэВ для файла ниобия библиотеки РОСФОНД, позволяющие корректно описать исследуемые эксперименты. Настоящая работа содержит экспериментальные подтверждения необходимости расширения области неразрешенных резонансов от 100 кэВ до 600 кэВ.

Отработаны методы корректировки разрешенной и неразрешенной резонансных областей для легких и тяжелых ядер.

Выполнена валидация откорректированных данных кремния и ниобия на сферах из серии экспериментов OKTAVIAN, где показана не значительная чувствительность результатов расчета моделей указанных экспериментов к вносимым изменениям для кремния и отсутствие влияния для ниобия.

При тестировании модифицированных данных в расчетах бенчмарк-экспериментов из ICSBEP с большим содержанием указанных материалов было показаны следующие результаты. Добавление пропущенного резонанса улучшает критические и спектральные характеристики сборок HMM005 и PMM001 (F238/F235 - на 1,5 %; C197/F235 - на 20 %). Использование уточненных нейтронно-физических констант ниобия позволяет получить результаты расчета $K_{эф}$ в пределах экспериментальной погрешности бенчмарк-эксперимента HMF047, чего до внесения изменений не удавалось сделать.

ГЛАВА 3. Развитие системы групповых нейтронно-физических констант БНАБ для расчета характеристик радиационной защиты

Глава посвящена описанию современного состояния систем групповых констант в мире и совершенствованию национальной системы подготовки констант для расчетов радиационной защиты.

Совершенствование константного обеспечение невозможно без привлечения сторонних методик и систем подготовки групповых констант, т.н. верификацией.

В мире существуют несколько современных общепризнанных систем групповых констант для расчета радиационной защиты:

1. BUGLE/VITAMIN – мало- и многогрупповые библиотеки нейтронных и фотонных сечений, последние версии которых основаны на файлах ENDF/B-VII.0 для использования в расчетах характеристик радиационной защиты тепловых реакторов.
2. Система констант SCALE 6 – проблемно-ориентированные библиотеки групповых нейтронных и фотонных сечений разного группового разбиения.
3. Российская система константного обеспечения БНАБ – многогрупповая библиотека нейтронных и фотонных сечений для расчетов быстрых реакторов и защиты, последняя версия которой основана на библиотеке ОЯД РОСФОНД.

Первой библиотекой групповых констант, объединившей большое количество экспериментальных работ, была библиотека БНАБ-64. В указанной библиотеке помимо стандартных, в то время, средних сечений был предложен метод описания сечений от количественной зависимости содержания данного нуклида (элемента) в материальной смеси. Этот метод был впоследствии назван методом Бондаренко или самоэкранировкой сечения – уменьшение сечения в резонансной области с ростом его концентрации в рассчитываемом материале. Однако только с добавлением сечений образования и взаимодействий гамма-

квантов с материалом и созданием новой версии библиотеки БНАБ-78 появилась возможность рассчитывать не только реакторные функционалы, но и радиационную защиту. За рубежом данные записывались в табличный формат – ENDF, который впоследствии был адаптирован под первые ЭВМ и сейчас разрабатывается новая версия указанного формата [112].

С появлением персональных компьютеров появилась потребность электронного хранения нейтронно-физических констант – разрабатываются программы переработки файлов ОЯД в групповые сечения (NJOY, AMPX, ГРУКОН, CALENDF [113], PREPRO [114]).Создается библиотека БНАБ-93, в которой число нейтронных групп было увеличено с 28 до 299 для важных реакторных материалов. В Америке создаются многогрупповая и малогрупповая библиотеки нейтронных и фотонных сечений – VITAMIN-B6 и BUGLE-93, основанные на файлах ОЯД ENDF/B-VI [115]. В то же время создавались и первые версии библиотеки групповых констант SCALE, основанных на ENDF/B-V и ENDF/B-VI.8 [116].

Групповые библиотеки являются результатом переработки файлов библиотек ОЯД из формата ENDF-6, поэтому важно иметь надежную информацию, основанную на экспериментальных и/или теоретических исследованиях. Для валидации библиотек ОЯД используются дифференциальные эксперименты по исследованию свойств реакторных материалов. Библиотеки групповых констант обновляются с выходом новых версий библиотек ОЯД. Так в 2007 году на основании файлов РОСФОНД была создана библиотека БНАБ-РФ. Зарубежные библиотеки также были переработаны в групповой формат. Библиотеки групповых сечений напрямую зависят от состояния ОЯД.

3.1 Краткий обзор систем групповых констант БНАБ, BUGLE/VITAMIN и SCALE, испсользуемых для расчета радиационной защиты

Последние версии групповых констант являются результатом переработки самых современных ОЯД, однако библиотеки SCALE содержат сечения, полученные на основе более поздних версий ОЯД ENDF/B.

Указанные групповые библиотеки отличаются как форматом хранения данных, так и групповой структурой. Краткий обзор каждой из них позволит разобраться в достоинствах и недостатках каждой из них.

Традиционной групповой структурой библиотеки БНАБ является 26 (28) групп, которая была разбита еще на несколько энергетических интервалов (групп) при появлении персональных ЭВМ, позволяющих использовать мультигрупповые (299-ти) константы. 299-ти групповая структура БНАБ составлена таким образом, чтобы значение летаргии было одинаковым для каждой широкой группы БНАБ (28 групп). На сегодняшний день стандартной выдаче программы CONSYST являются данные в 26, 28 и 299 нейтронном и 15 и 127 фотонном групповых разбиениях. Возможно также использование и другие групповые структуры – для этого необходимо указать, какие мультигруппы необходимо объединить.

В зарубежных библиотеках BUGLE/VITAMIN также содержат данные в широких (47 нейтронных и 20 гамма) и узких (199 нейтронных и 42 гамма) группах. Однако в отличие от БНАБ это две независимые библиотеки.

В библиотеках SCALE для расчетов критичности рекомендуется использовать 238-ми групповую библиотеку [116] (в последней версии число групп увеличили до 252), а для расчетов защиты две библиотеки: с 200 нейтронных и 47 гамма структурой и с 27 нейтронной и 18 гамма структурой. Первая аналогична групповому разбиению VITAMIN с добавленной одной группой для расширения энергетической области до 20 МэВ.

3.1.1 Сравнение форматов представления микроконстант

На сегодняшний день существуют множество форматов представления групповых сечений, но основные из них это AMPX и MATXS [117].

В этих форматах содержится полная информация из GENDF файла (внутреннего файла программы NJOY) и зависит от входных параметров, заданных на каждом этапе (модуле NJOY) переработки ОЯД. С выходом AMPX-2000 [98] запись в формат AMPX стала осуществляться самостоятельными средствами нового комплекса, без привлечения кода NJOY.

В библиотеке групповых констант БНАБ используется свой традиционный формат [118]. В отличие от мировых аналогов, информация, которая содержится в микроконстантах БНАБ, отбирается экспертно и объединяется для уменьшения объемов занимаемой памяти и увеличения скорости подготовки макроконстант.

3.1.2 Сравнение групповой структуры

Главным конструкционным материалом всех ядерных объектов является железо, основным изотопом которого является ^{56}Fe (91,754 %). На примере указанного изотопа предлагается рассмотреть групповую структуру библиотек групповых сечений. На рис. 3.1 изображен большой резонанс на ^{56}Fe в области энергий – 10 – 100 кэВ, в которой очень хорошо прослеживаются особенности каждой библиотеки. Красным на графике изображено сечение 299-ти групповой библиотеки БНАБ, синим 28-ми групповое, зеленым и светло-зеленым 238-ми и 252-х групповые сечения из библиотеки SCALE, оранжевым и розовым изображено сечение из библиотек VITAMIN и BUGLE с 199 и 47 групповой структурой соответственно.

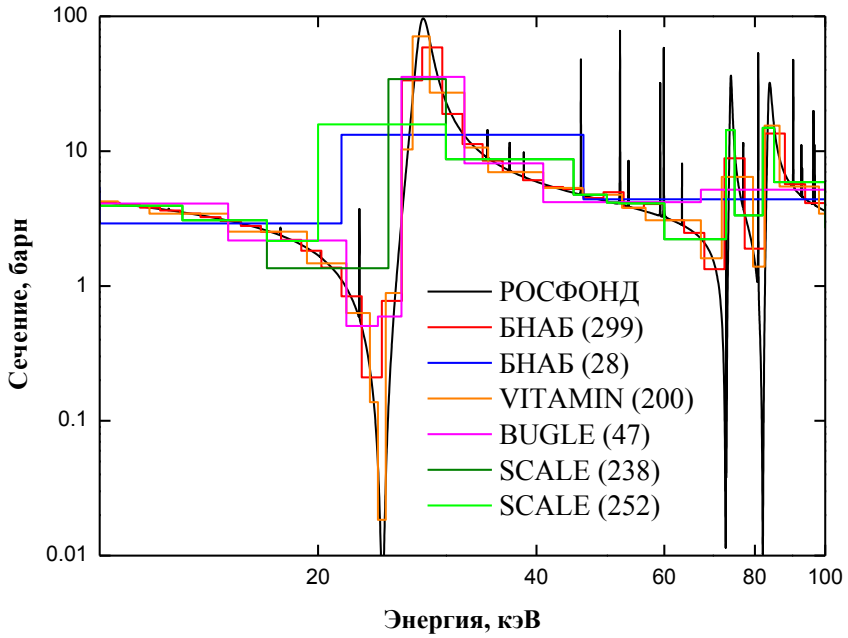


Рисунок 3.1 – Сравнение группового разбиения современных библиотек в области энергий 10 – 100 кэВ на примере полного сечения изотопа ^{56}Fe

При выборе группового разбиения BUGLE/VITAMIN был взят ориентир на описание основных резонансов всех главных конструкционных материалов, чтобы минимумы и максимумы резонансов не совпадали с границами групп.

Границы групп БНАБ попадают на экстремумы резонансов, но благодаря большому числу сечения разбавления (26) и её минимальной величине 10^{-3} позволяют корректно описывать самоэкранировку сечения.

3.2 Минимизация погрешности группового приближения при формировании библиотеки микроконстант БНАБ

Для тестирования методики подготовки групповых констант БНАБ необходимо иметь аналог, базирующийся на одной библиотеке ОЯД и имеющий аналогичную групповую структуру. Одним из наиболее доступных и простых в освоении аналогов является система TRANSX/MATXS. Важен еще тот факт, что программа переработки файлов ОЯД в групповые константы для систем CONSYST/БНАБ и TRANSX/MATXS единая – NJOY.

3.2.1 Получение микроскопических констант в формате MATXS

Пополнение библиотеки БНАБ групповыми константами в формате MATXS позволяет привлечь к верификации нейтронных данных расчетные программы, ориентированные на этот формат данных, что повышает надежность этапа верификации создаваемой библиотеки групповых констант и расширяет область применимости библиотеки констант БНАБ. В качестве подготовки макроскопических сечений из формата MATXS была использована программа TRANSX.

Для верификации групповых библиотек необходимо:

- переработать файлы библиотеки ОЯД РОСФОНД в формат MATXS;
- сформировать библиотеку микроконстант на базе переработанных данных;
- отобрать быстрые бенчмарк-модели из международного справочника ICSBEP;
- сравнить полученные расчеты критичности и спектральные характеристики.

Получение микроконстант

Система переработки ОЯД NJOY представляет собой набор относительно независимых между собой программных модулей для получения поточечных и многогрупповых нейтронно-физических констант и связанных с ними величин в стандартном формате ENDF. При этом возможно получение полного набора данных о нейтронах и гамма квантах достаточного для решения реакторных задач и задач защиты от излучений, как детерминистическими методами, так и методом Монте-Карло.

Основные этапы переработки библиотеки ОЯД в групповые микроконстанты показаны на рис. 3.2.

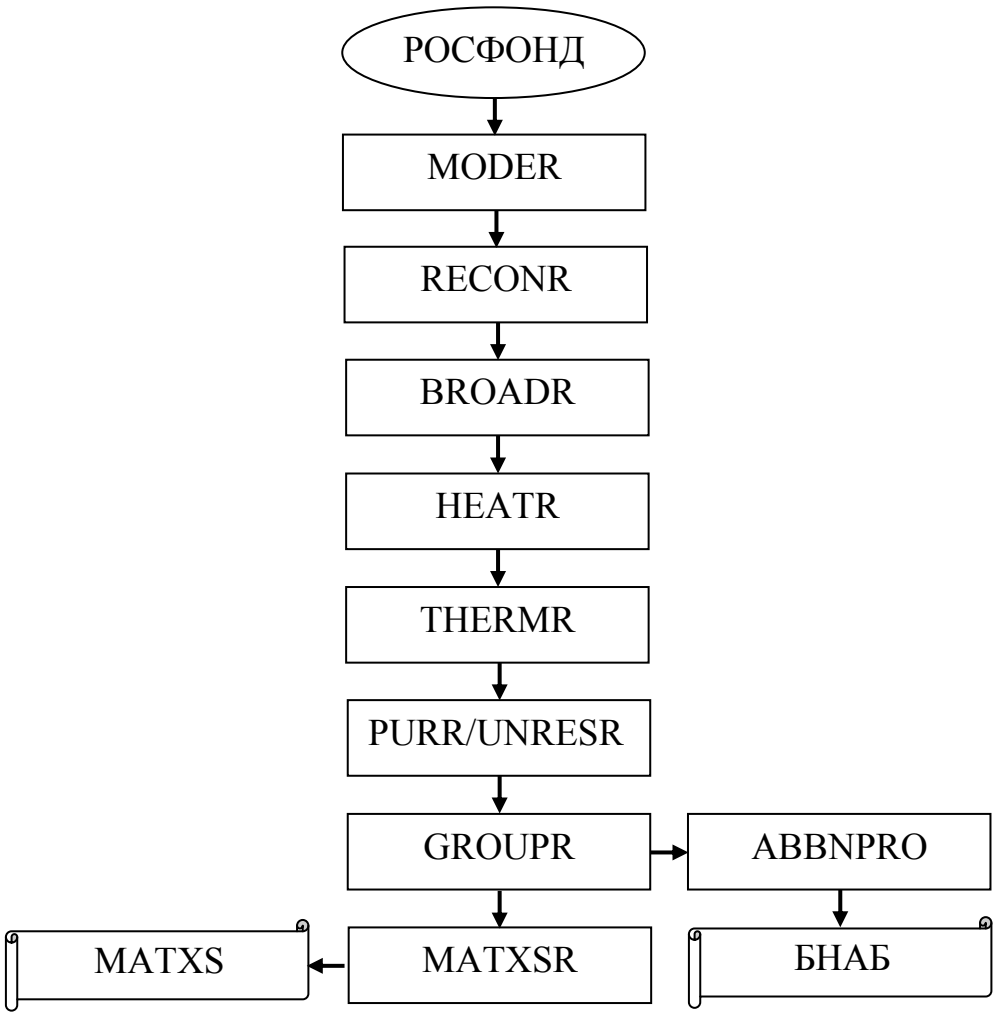


Рисунок 3.2 – Схема получения микроконстант

В результате были переработаны 385 элементов библиотеки ОЯД РОСФОНД, имеющих необходимый набор нейтронных данных для учета переноса нейтронов [119].

Ниже перечислены модули и краткое описание их функций, необходимые для получения библиотек многогрупповых нейтронных данных, использование которых позволяет проводить расчеты по широко известным S_n программам, как ANISN [120], ONEDANT и РОЗ (одномерные), DORT [121], TWODANT и КАСКАД (двумерные), TORT, THREEDANT и КАТРИН (трехмерные).

Модуль MODER

MODER преобразует файлы в формате ENDF из текстового представления в бинарный и обратно, а так же объединению нескольких файлов в один.

Модуль RECONR

Модуль RECONR используется для получения поточечных (непрерывно зависящих от энергии) сечений по резонансным параметрам, задаваемым в файле с MF=2 и секции с MT=151. Резонансные параметры задаются для сечения упругого рассеяния, деления и радиационного захвата. Кроме того, в секции с MT=1 конструируется полное сечение, как сумма всех парциальных сечений. Приведем расчетные формулы трех наиболее часто используемых подходов для восстановления резонансной структуры сечений: одноуровневого подхода Брейта-Вигнера, многоуровневого подхода Брейта-Вигнера и так называемого R-матричного формализма Рейха-Мура.

Одноуровневый подход Брейта-Вигнера является наиболее простым. Для расчета сечений используются следующие формулы:

для сечения упругого рассеяния

$$\sigma_n = \sigma_p + \sum_l \sum_r \sigma_{mr} \left\{ \left[\cos 2\phi_l - \left(1 - \frac{\Gamma_{nr}}{\Gamma_r} \right) \right] \frac{1}{1+x^2} + \sin 2\phi_l \frac{x}{1+x^2} \right\},$$

для сечения деления

$$\sigma_\gamma = \sum_l \sum_r \sigma_{mr} \frac{\Gamma_{\gamma r}}{\Gamma_r} \frac{1}{1+x^2},$$

для сечения потенциального рассеяния

$$\sigma_p = \sum_l \frac{4\pi}{k^2} (2l+1) \sin^2 \phi_l,$$

где суммирование производится по всем значениям l (s-, p-, d- и т.д. нейтроны) и по всем возможным для этого l резонансам (индекс r).

Каждый резонанс характеризуется полной, нейтронной, делительной и радиационной шириной (Γ, Γ_n, Γ_f, Γ_γ), спином резонанса - J, максимальным значением σ_{mr}/Γ_r, где

$$\sigma_{mr} = \frac{4\pi}{k^2} g_J \frac{\Gamma_{nr}}{\Gamma_r},$$

спиновый фактор

$$g_J = \frac{2J+1}{4I+2},$$

I - полный спин системы нейтрон + ядро-мишень,

$$k = (2.196771*10^{-3})\frac{A}{A+1}\sqrt{E}.$$

A – отношение массы изотопа к массе нейтрона.

$$x = \frac{2(E-E_r)}{\Gamma_r},$$

E – текущее значение энергии, E_r – энергия максимума резонанса.

Для $l = 0$ $\phi_l = ka$, где $a = 0.123A^{2/3}+0.08$ – т.н. радиус канала.

Эта модель учитывает только сумму резонансных членов и не учитывает интерференцию между соседними резонансами и может быть использована только в случае резонансов, лежащих далеко друг от друга. Полное сечение определяется, как сумма резонансных и нерезонансных парциальных сечений.

В ряде случаев для расчета сечения упругого рассеяния применяется так называемая многоуровневая формула Брейта-Вигнера:

$$\sigma_n = \frac{\pi}{k^2}\sum_l\left[\sum_J g_J\left\{\left(1-\cos 2\phi_l - \sum_r \frac{\Gamma_{nr}}{\Gamma_r}\frac{2}{1+x^2}\right)^2 + \left(\sin 2\phi_l + \sum_r \frac{\Gamma_{nr}}{\Gamma_r}\frac{2x}{1+x^2}\right)^2\right\} + 2D_l\left(1-\cos 2\phi_l\right)\right],$$

$$x = \frac{2(E-E)_r}{\Gamma_r},$$

$$D_l = \sum_{s=\left|I-\frac{1}{2}\right|}^{I+\frac{1}{2}}\sum_{J=|l-s|}^{l+s} g_J - \sum_{J=\left|\left|I-l\right|-\frac{1}{2}\right|}^{I+l+\frac{1}{2}} g_J = (2l+1) - \sum_{J=\left|\left|I-l\right|-\frac{1}{2}\right|}^{I+l+\frac{1}{2}} g_J,$$

Остальные сечения рассчитываются так же, как в одноуровневом подходе Брейта-Вигнера.

В настоящее время для большинства структурных и делящихся материалов используется многоуровневое представление Рейха-Мура с двумя каналами деления. Сечения определяются следующими формулами:

$$\sigma_t = \frac{2\pi}{k^2}\sum_l\sum_J g_J\left\{\left(1-\mathrm{Re}\,U_{nm}^{lJ}\right)+2d_{lJ}\left[1-\cos\left(2\phi_l\right)\right]\right\},$$

$$\sigma_n = \frac{\pi}{k^2}\sum_l\sum_J g_J\left\{\left|1-U_{nn}^{lJ}\right|^2 + 2d_{lJ}\left[1-\cos(2\phi_l)\right]\right\},$$

$$\sigma_f = \frac{4\pi}{k^2}\sum_l\sum_J g_J\sum_c\left|\mathrm{I}_{nc}^{lJ}\right|^2,$$

$$\sigma_\gamma = \sigma_t - \sigma_n - \sigma_f,$$

Здесь I_{nc} есть элемент матрицы обратной R – матрице:

$$R_{nc}^{lJ} = \delta_{nc} - \frac{i}{2}\sum_r \frac{\Gamma_{nr}^{1/2}\Gamma_{cr}^{1/2}}{E_r - E - \frac{i}{2}\Gamma_{\gamma r}},$$

$$U_{nc}^{lJ} = e^{2i\phi_l}\left[2\mathrm{I}_{nc} - \delta_{nc}\right].$$

Суммирование по r здесь также означает суммирование по всем резонансам, существующим для заданного набора *(l, J)*, индекс "*c*", соответствует одному из двух возможных каналов деления. Рассмотрим суммирование по *J*. Введем понятие спина канала *s*. Возможные значения *s* от $|I-1/2|$ до $|I+1/2|$. Тогда *J* меняется от $|l-s|$ до $|l+s|$. Например, для *l=1* и *I=1* *J=1/2*, *3/2* и 5/2 для *s=3/2* и *J=3/2* и *1/2* для *s=1/2*. Суммирование по *J* означает суммирование по *s* от $|I-1/2|$ до $|I+1/2|$ и по *J* от $|l-s|$ до $|l+s|$ или сразу по *J* в интервале от $||I-l|-1/2|$ до *I+l+1/2*.

Модуль BROADR

BROADR конструирует непрерывно зависящие от энергии сечения для заданных температур с учетом температурного уширения резонансов.

Распределение скоростей ядер – мишеней может быть описано т.н. распределением Максвелла – Больцмана.

Модуль UNRESR

UNRESR рассчитывает блокированные сечения в области перекрывающихся резонансов (область неразрешенных резонансов) для заданного набора разбавлений.

Известно, что в области перекрывающихся резонансов невозможно получить точные значения сечений для конкретной энергии, так как в этой области существуют лишь средние по некоторому энергетическому интервалу резонансные параметры. Однако известны функции распределения, которым подчиняются ширины и расстояния между резонансами. В модуле реализована специальная схема получения средних по определенным энергетическим интервалам нейтронные сечения для набора сечений разбавления, что позволяет в дальнейшем получать с помощью схем интерполяции конкретные блокированные микро- и макросечения для различных расчетных вариантов.

Модуль PURR

С помощью модуля PURR получаются т.н. таблицы вероятности, описывающие резонансную структуру сечений в области неразрешенных резонансов. PURR формирует резонансные серии, которые подчиняются распределению хи-квадрат для широких резонансов и распределению Вигнера для разбивки, которая задана в ENDF формате. Сечения выбираются из серии случайно выбранных энергий и собираются в таблицы вероятности и моменты Бондаренко. Этот процесс повторяется до получения необходимой статистики. Таблицы вероятности записываются в файл для использования в MCNP, и интегралы Бондаренко выводятся на печать для сравнения с результатами других методов, таких как в UNRESR.

Модуль HEATR

HEATR вычисляет тепловой керма фактор (кинетическую энергию высвобожденную в материале) и радиационное повреждение энергетическими продуктами.

Модуль THERMR

THERMR конструирует сечения и индикатрисы рассеяния в области термализации для отдельных атомов и атомов в молекулах и кристаллах.

Твердые кристаллические вещества содержат так называемые когерентные рассеиватели, например, для графита имеет место интерференция рассеяния от различных плоскостей атомов, образующих кристалл.

В случае использования новых оценок, на специальной ленте в файле с MF=7 и в секции с MT=2 содержится величина $E\sigma^{coh}(E)$, как функция налетающей энергии (потери энергии нет) и температуры.

Для более старых оценок E_i и f_i рассчитываются в THERMR по специальным формулам.

Модуль GROUPR

GROUPR генерирует блокированные групповые сечения и матрицы переходов с использованием поточечного представления и индикатрис рассеяния в формате GENDF (groupwise ENDF).

Групповые константы обычно используются компьютерными программами для расчета распределений нейтронов и/или гамма-квантов по пространству и энергии, а также получения их функционалов, таких как коэффициент размножения, скорости реакций и т.д.

Номера энергетических групп в модуле GROUPR задаются в порядке возрастания энергии, т.е. группа 1 соответствует наименьшей энергии.

Проблема учета эффекта блокировки (уменьшения резонансного эффекта за счет присутствия различных материалов) в модуле GROUPR может быть решена двумя методами: с использованием т.н. модели Бондаренко и решением простейшего уравнения замедления (т.н. flux calculator). В модели Бондаренко используются т.н. приближение узкого резонанса (NR-approximation) или B_N-приближение [85, с. 157-159].

В области неразрешенных резонансов явная зависимость сечений от энергии неизвестна. Усредненное получается с помощью модуля UNRESR для целого набора энергетических точек и используется модулем GROUPR для расчета интегралов сечений в области неразрешенных резонансов.

Для расчетов с использованием большинства реакторных программ, таких как ANISN, DORT и т.д. необходимо задать т.н. спектр деления. В общем случае модуль GROUPR позволяет рассчитать точную групповую матрицу для сечения деления по соответствующим формулам, которая в свою очередь позволяет с помощью модуля TRANSX получить точный многогрупповой спектр нейтронов деления для конкретной реакторной задачи. Однако, за исключением области относительно высоких энергий, спектр нейтронов деления слабо зависит от начальной энергии, что позволяет уже в рамках модуля GROUPR получить приближенные значения спектра.

Модуль MATXSR

MATXSR на основе файлов GENDF создает библиотеку многогрупповых констант в формате MATXS, причем после обработки этой библиотеки модулем TRANSX можно получить блокированные многогрупповые константы для конкретного расчетного варианта, используемого в большинстве широко-известных нейтронно-физических кодов (рис. 3.3).

3.2.2 Уточнение матрицы неупругого рассеяния

Полученный набор микроскопических констант необходимо проверить на корректность. Для этого необходимо провести сравнение с детальным расчетом.

Для верификации были отобраны 4 урановых (SCHERZO-5.56 [122], GODIVA [123], FLATTOP-25 [124] и BIG TEN [125]) и 2 плутониевых (JEZEBEL [126] и FLATTOP-PU [127]) сборки, включающие в себя основные топливные нуклиды [128]. Описание этих бенчмарк-моделей, кроме SCHERZO-5.56, можно найти в международном справочнике ISCBEP.

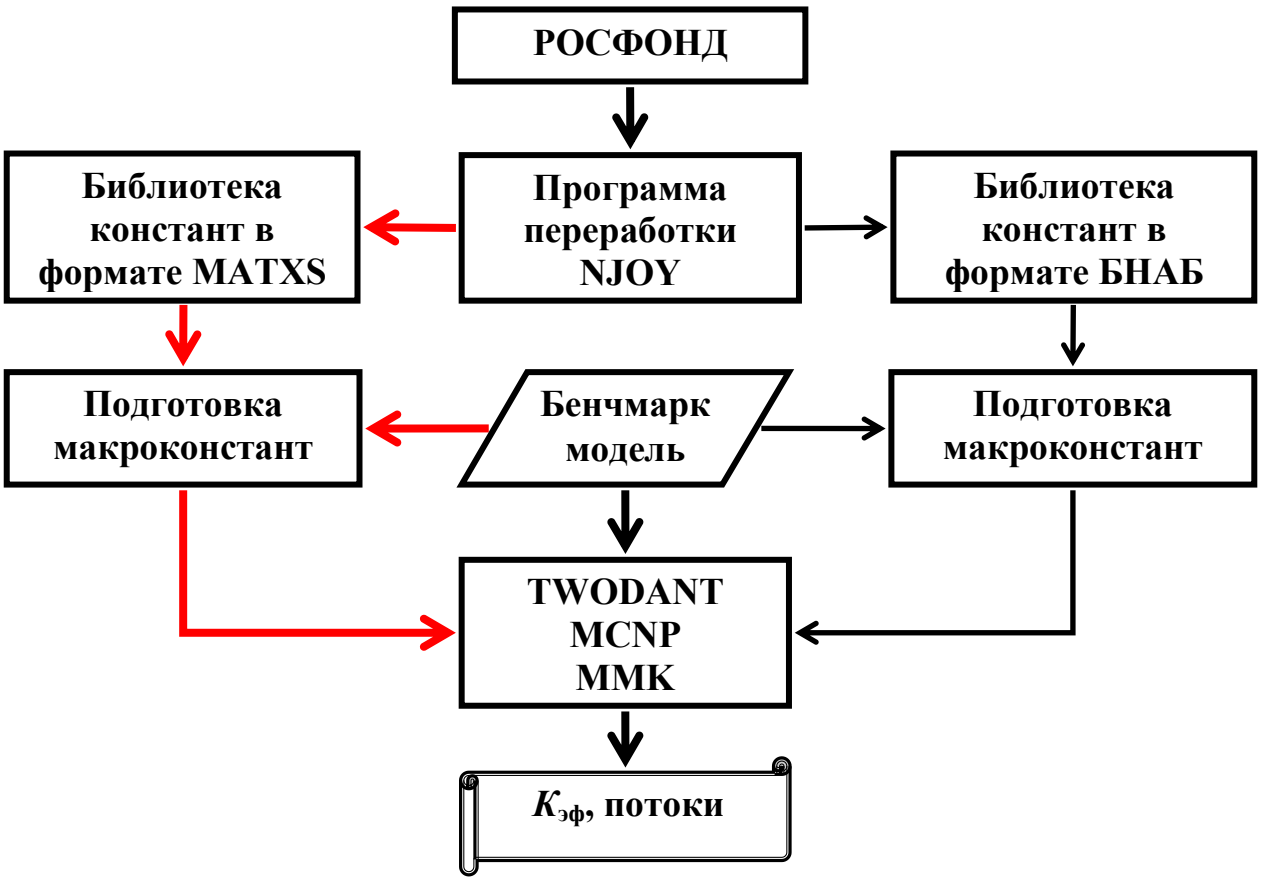


Рисунок 3.3 – Схема выполнения верификации по различным расчетным программам и системам подготовки констант CONSYST и TRANSX (красная).

В ходе верификации был проведен расчет $K_{эф}$ и нейтронные спектров моделей. Значения критичности этих сборок приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что максимальное отклонение в значениях критичности, используя разные программы подготовки макроконстант, не превышает 0,1 %.

Таблица 3.1 – Результаты расчетов $K_{эф}$ отобранных сборок

	MCNP дет.	CONSYST/ TWODANT	TRANSX/ TWODANT
SCHERZO-5.56	0,9977	0,9973 (-0,04)	0,9971 (-0,06)
GODIVA	0,9995	0,9999 (+0,04)	0,9997 (+0,02)
BIG TEN	0,9978	0,9976 (-0,02)	0,9971 (-0,07)
FLATTOP-25	1,0018	1,0020 (+0,02)	1,0030 (+0,12)
JEZEBEL	0,9991	0,9991 (0,00)	0,9992 (+0,01)
FLATTOP-PU	1,0007	1,0001 (-0,06)	0,9999 (-0,08)

* В скобках приведено отклонение в процентах от MCNP дет.

Ниже показаны различия между потоками нейтронов, полученных групповым методом (с использованием различных программ для подготовки

макроконстант) и методом Монте-Карло с детальным слежением за энергией нейтронов. На рисунке 3.4 показано отклонение в процентах групповых расчетов от MCNP детального, для каждой мультигруппы. На графиках показана область с наибольшим нейтронным потоком.

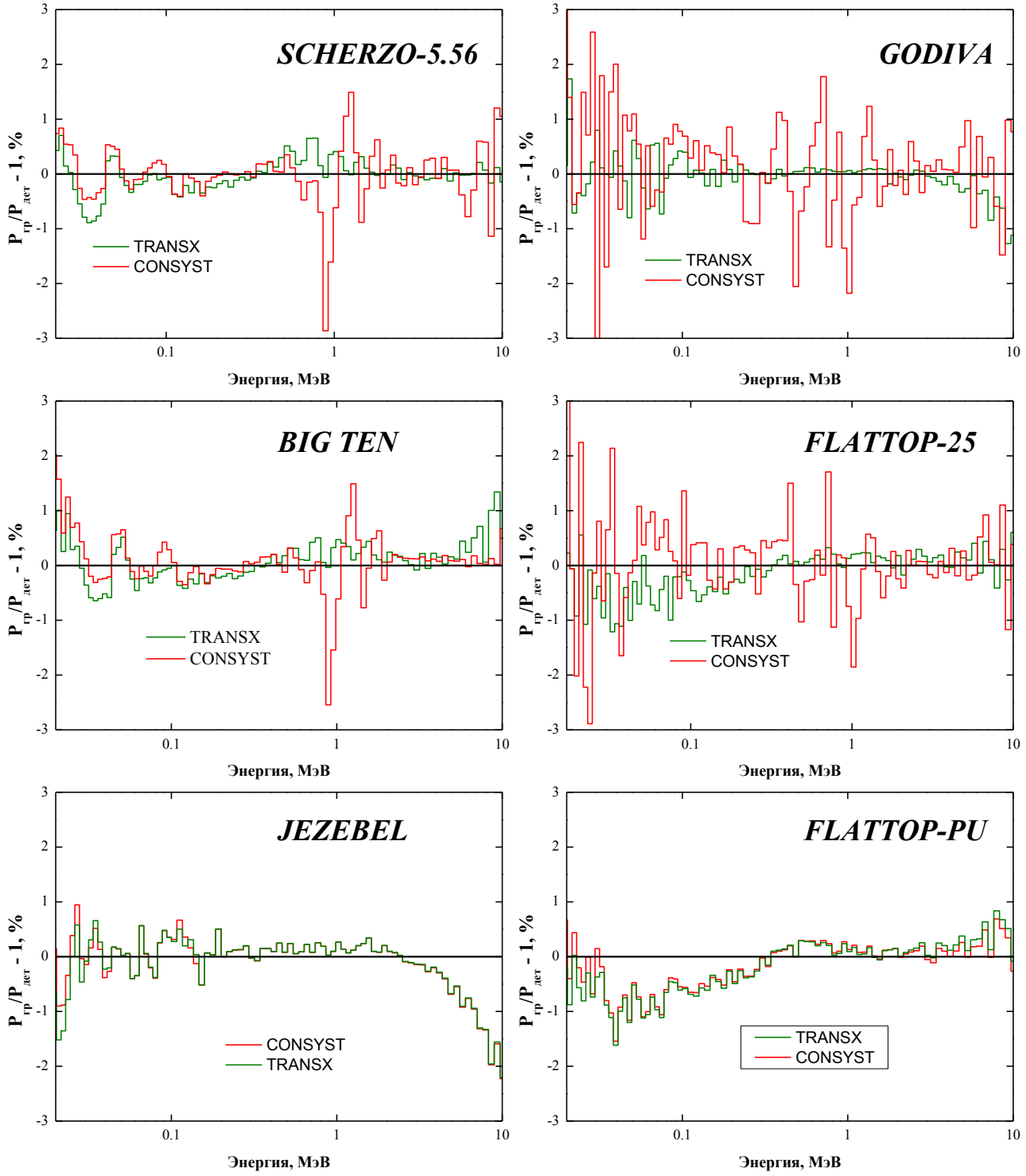


Рисунок 3.4 – Отклонение потоков нейтронов в различных сборках, полученных по программам подготовки макроконстант CONSYST и TRANSX от поточечного расчета по MCNP

Из рисунка 3.4 видно, что в плутониевых сборках хорошее согласие полученных потоков. В спектре нейтронов, полученного по программе CONSYST, в урановых сборках видно сильное отклонение в районе 1 МэВ для низкообогащенных по моделей и от 1 МэВ и ниже для высокообогащенных по ^{235}U сборок. В TRANSX такой тенденции не наблюдается, следовательно, следует сравнить макроскопические сечения, полученные после программ TRANSX и CONSYST, найти и устранить источник расхождения.

Было проведено сравнение основных макросечений для сборки GODIVA для области энергий, где были замечены наибольшие расхождения. На рисунке 3.5 показано отклонение основных макроскопических сечений (ST – полное сечение, SA – сечение поглощения, NUF – сечение деления, умноженное на среднее число вторичных нейтронов рожденных на один акт деления, SCAT – сечение рассеяния и SS – рассеяние само в себя), полученных с помощью TRANSX к сечениям, полученным с помощью CONSYST.

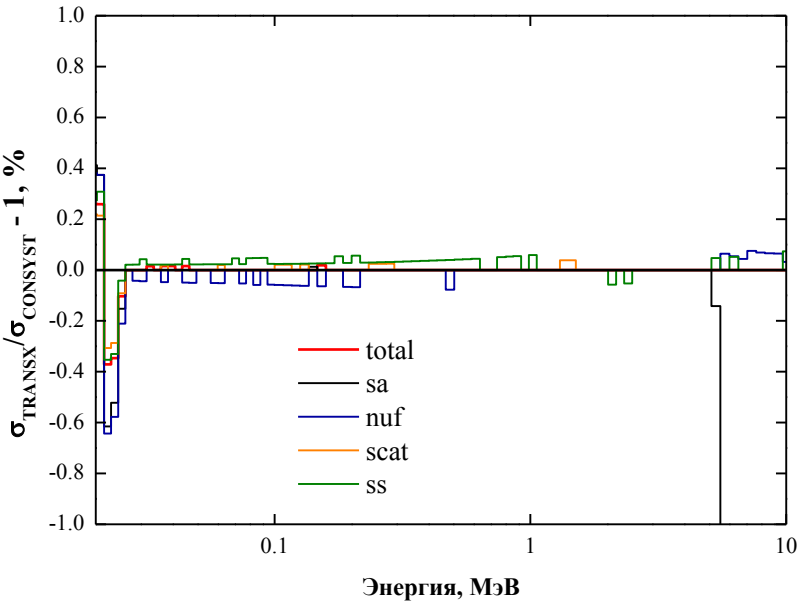


Рисунок 3.5 – Отклонение значений макроскопических сечений сборки GODIVA, полученных с помощью программ TRANSX и CONSYST

Из графиков видно, что максимальное различие макросечений в 0,1 % не может дать различие потоков в 1,5 %. По-видимому, расхождение находится в матрице рассеяния. При дальнейшем рассмотрении была обнаружена разница матриц, находящихся в библиотеке БНАБ и в микроскопических данных в формате MATXS. Т.к. в формате MATXS матрица неупругого рассеяния

записывается по уровням, было решено сравнить получаемые матрицы дискретных уровней неупругого рассеяния. Матрицы уровней оказались одинаковыми, кроме матриц континуума (6 91), в n2n (6 16), n3n (6 17) и n4n (6 18). После проведенного исследования оказалось, что разные версии программы NJOY по-разному интерполировали матрицу рассеяния. Дело в том, что в файлах ОЯД присутствует признак интерполяции значений матриц рассеяния и, с давних времен, использовалась интерполяционная схема для гистограммы. В новых версиях MCNP стали использовать линейно-линейную схему интерполяции.

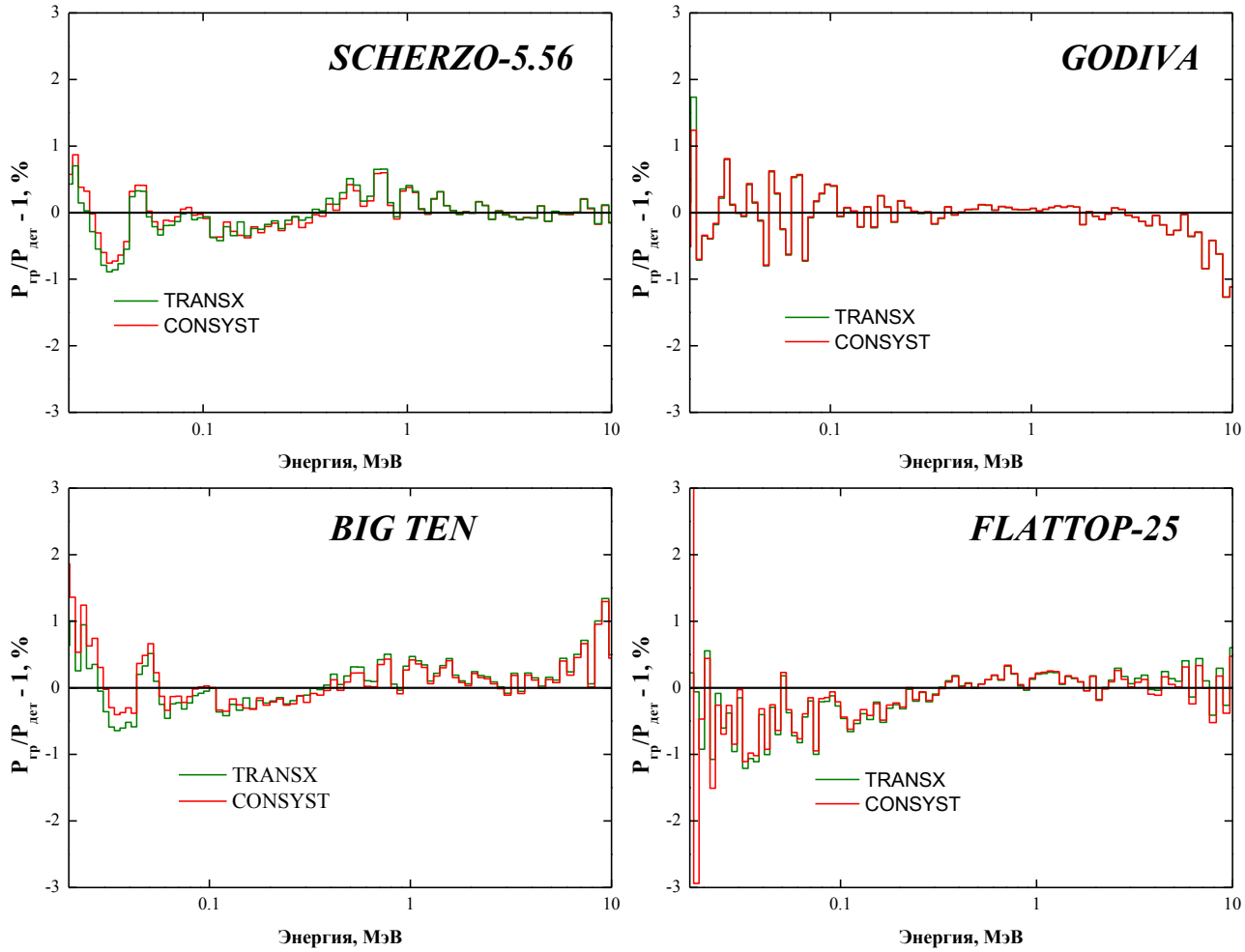


Рисунок 3.6 – Отклонение потоков нейтронов в различных сборках, полученных по программам подготовки макроконстант CONSYST и TRANSX от поточечного расчета по MCNP

Разработчики NJOY последовали за этими тенденциями, однако проблема кроется в файлах и с изменением схемы интерполяции в оценках этот достаток будет устранен. Данные библиотеки БНАБ были повторно переработаны новой

версией NJOY и получены новые матрицы неупругого рассеяния для всех материалов (более 400 нуклидов) последней версии групповой библиотеки БНАБ.

На рис. 3.6 приведены результаты расчета потоков нейтронов для урановых сборок с новыми матрицами рассеяния. Из графиков видно, что неточность была устранена.

После получения новых данных по матрицам рассеяния была выполнена полномасштабная верификация системы групповых констант БНАБ в расчетах критичности [129, 130].

3.2.3 Уточнение матриц образования вторичных гамма-квантов

При нормальных режимах эксплуатации реакторных установок, как энергетических, так и исследовательских незначимой величиной, дающей вклад в дозу облучения персонала, является гамма-излучение. Комплекс мер предусматривает защиту от всех видов излучения. В таких системах зачастую образуются вторичные гамма-кванты в результате реакций (n, γ).

В случаях остановки реактора большая часть нейтронного излучения поглощается и начинает преобладать гамма-изучение. При транспортировке отработанного ядерного топлива, его хранении и переработки основной вклад в радиоактивную обстановку вносит поток гамма-квантов.

Тестирование константной системы заключалось в проверке констант по образованию (в результате реакции (n, γ)) и взаимодействию гамма-квантов с веществом, путем расчета бенчмарк-моделей железных и свинцовых сфер различного радиуса с калифорниевым источником в центре.

В ходе тестирования было выявлено расхождение в расчетных результатах спектра гамма-квантов при использовании разных систем подготовки констант CONSYST/БНАБ и TRANSX/MATXS (рис. 3.7*а*).

Причинами могут быть несколько факторов: некорректное описание источника гамма-квантов, некорректные сечения образования вторичных гамма-квантов и некорректный расчет нейтронного спектра, в результате этого и

образованные гамма-кванты. Последний получен с хорошей точностью и совпадает, как с детальным расчетом, так и по разным групповым системам. Первый фактор при увеличении радиуса сфер уменьшается в итоговом функционале, поэтому остается второй фактор, который был детально исследован.

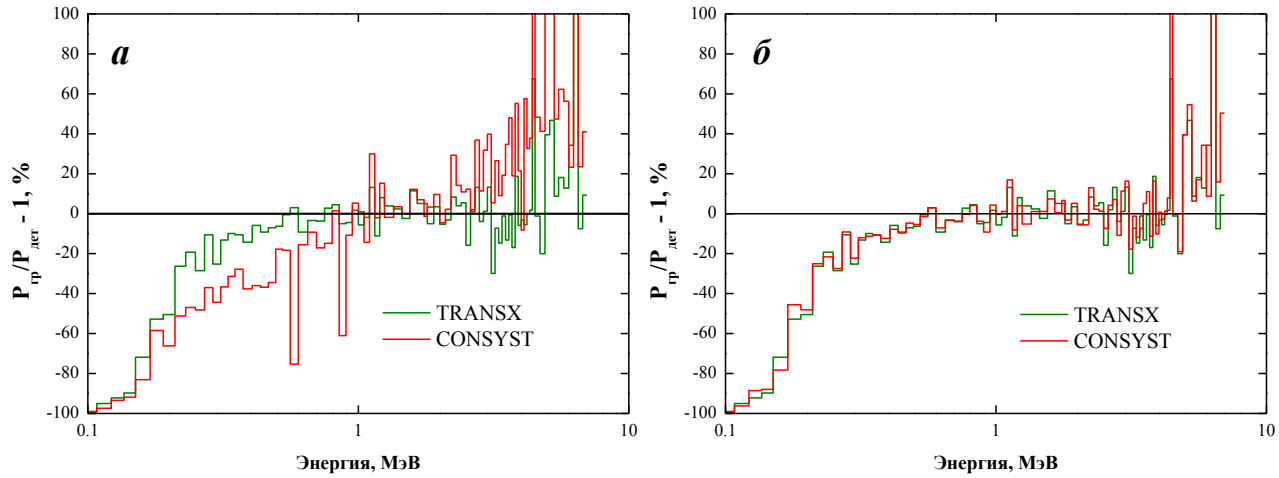


Рисунок 3.7 – Различия потоков гамма-квантов утекающих со свинцовой сферы, радиусом 30 см, полученных по программам подготовки макроконстант CONSYST и TRANSX от поточечного расчета по MCNP

Для корректного описания образования гамма-излучений для свинца и железа были составлены прецизионные модели для проверки отдельных мультигрупп (рис. 3.8*а*).

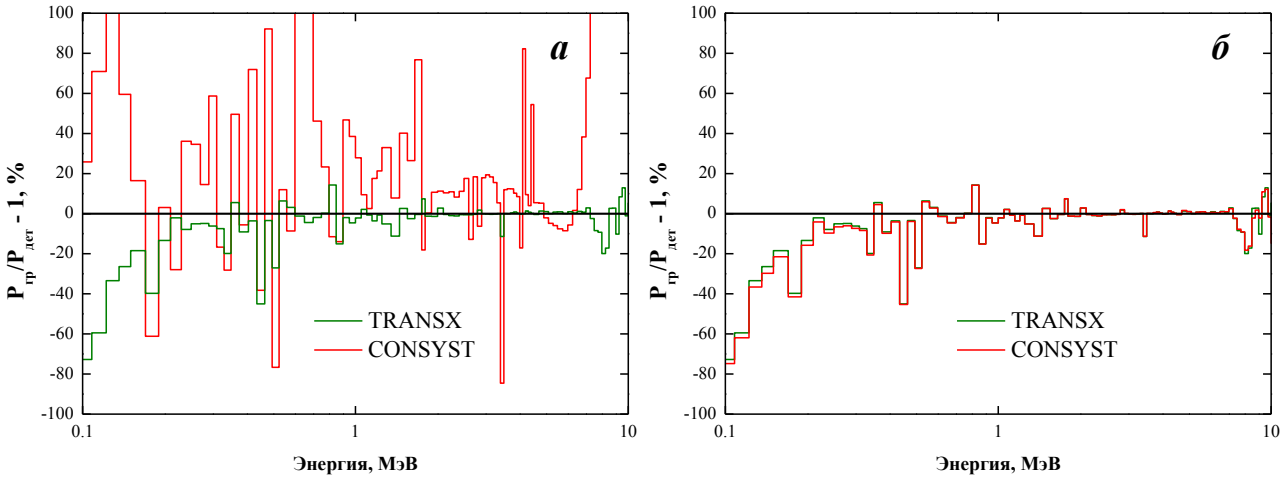


Рисунок 3.8 – Различия спектров вторичных гамма-квантов образованных первой нейтронной группой в ^{208}Pb, полученных с использованием групповых систем подготовки констант относительно поточечного представления данных: до (*а*) и после корректировки (*б*)

Анализ выявленных расхождений позволил выявить ошибку в алгоритме подготовке матриц образования вторичных гамма-квантов для последней

версии системы групповых констант БНАБ. С помощью откорректированных алгоритмов получены новые матриц образования вторичных гамма-квантов для всех материалов (больше 100 нуклидов) библиотеки групповых констант БНАБ (рис. 3.7*б* и 3.8*б*).

3.3 Развитие программы подготовки макроконстант CONSYST

Подготовка макроконстант является ответственным этапом переработки данных для использования в задачах расчета переноса излучения, требующим умения учесть геометрические и физические особенности рассчитываемой системы. Это умение базируется на знании физики процесса переноса излучения и методов учета различных эффектов в рамках используемой математической модели. Обычно эти модели закладываются в алгоритмы программ расчета макроконстант, которые оставляют пользователю выбор той или иной опции и заданием соответствующих параметров.

3.3.1 Краткое описание программы CONSYST

Программа CONSYST обеспечивает расчет гомогенизированных констант среды с учетом резонансной блокировки сечений отдельных изотопов и гетерогенности среды, если таковая существенна. В программе CONSYST предусмотрена подготовка констант среды для проведения нейтронно-физических расчетов в 26-ти, 28-ми, 299-ти (стандартные режимы), но также при любом ином числе энергетических групп, меньшем 299. При любом выборе числа групп для расчета групповые константы каждого нуклида будут выбраны из 299-ти групповой библиотеки.

Резонансная блокировка сечений изотопов учитывается с помощью факторов резонансной самоэкранировки (или *f*-факторы Бондаренко), которые представлены в константах БНАБ в зависимости от энергии нейтронов, температуры среды и сечения разбавления другими материалами.

Для учета гетерогенности при расчете гомогенизированных констант среды предусмотрено несколько возможностей:

1) учет влияния гетерогенности в приближении теоремы эквивалентности путем введения так называемого «дельта-рассеивателя» в некоторой подходящей концентрации (материал с именем "D-SC");

2) путем задания информации о реальной ячеечной структуре среды и тогда на основе теоремы эквивалентности системой будет произведен пересчет сечений разбавления резонансных изотопов с учетом геометрии ячейки, после чего применяются стандартные алгоритмы учета самоэкранировки сечений с помощью *f*-факторов Бондаренко;

3) расчет гомогенизированных констант с помощью специально разработанной для этих целей программы FFCP, в которой свертка констант по ячейке осуществляется с учетом гетерогенных групповых спектров нейтронов, рассчитанных методом ВПС; при этом резонансная структура сечений отдельных изотопов учитывается с помощью подгрупповых параметров, данные по которым также содержатся в БНАБ.

В программе CONSYST предусмотрена возможность подготовки констант для расчетов переноса нейтронного и гамма излучений в различных приближениях:

- в диффузионном приближении;
- в P_1-приближении;
- в транспортном приближении (без учета анизотропии рассеяния);
- с учетом анизотропии упругого рассеяния вплоть до P_5-приближения и анизотропии неупругого рассеяния в P_1-приближении.

Во всех случаях анизотропия полного сечения, обусловленная резонансной самоэкранировкой сечений, учитывается в транспортном приближении.

В программе CONSYST предусмотрена возможность подготовки данных для расчета источников фотонов, порождаемых в результате нейтронных реакций. Могут быть подготовлены также константы для расчета фотонных полей. В этом случае всегда предполагается учет анизотропии рассеяния. При этом число фотонных групп может быть выбрано 15 или 127 (при наличии данных в библиотеке БНАБ). В процессе подготовки констант готовятся

блокированные микроскопические групповые константы нуклидов, входящих в состав рассчитываемого реактора или защиты, необходимые для расчета большинства важнейших функционалов этих полей, тех, которые определяются скоростями нейтронных реакций. Кроме того, во многих случаях для расчета функционалов нейтронных и фотонных полей необходимые константы не требуют никакой алгоритмической обработки перед их использованием в расчетах, поэтому в системе есть возможность обращаться к ним непосредственно из программы пользователя с помощью специальных функций доступа.

Подготовленные с помощью программы CONSYST 299-ти групповые микроконстанты для всех нуклидов и всех расчетных сред записываются в специализированный выходной формат GMF. Далее с помощью внутренней программы FORAN константы могут быть представлены в формате ANISN – в текстовой форме как для программы TWODANT, КАСКАД или в бинарной как для программ DORT, TORT и MMKKENO. С помощью отдельной программы FORMCNP [131] константы могут быть переведены в специализированный формат ACE для расчетов по групповой версии программы MCNP. При этом константы могут быть свёрнуты в любое меньшее число групп от 26-ти и 299-ти с весом рассчитанных в B^2-приближении или введенных извне нейтронных спектров потока и тока. Макроскопические константы среды, используемые для решения уравнения переноса нейтронов или фотонов, рассчитываются путем простой свертки микроконстант из файла GMF с весом концентраций входящих в состав среды нуклидов.

Программа CONSYST позволяет также готовить константы для расчетов энерговыделения и образования фотонов в нейтронных реакциях, и расчета распространения фотонов. Для расчетов активной зоны реактора и нейтронного источника используется диффузионная программа TRIGEX [132].

Стандартно, нейтронные константы готовятся для 26, 28 и 299 энергетических групп – от 10^{-5} эВ до 20 МэВ, но также могут быть свёрнуты в

любое число групп между 28 и 299. Фотонные константы могут быть подготовлены для 15 или 127 групп – от 0,5 до 20 МэВ.

3.3.2 Добавление выходных форматов GNDLMIC и GNDLMAC.

Схема взаимодействия программы CONSYST с расчетными кодами приведена на рисунке 3.9.

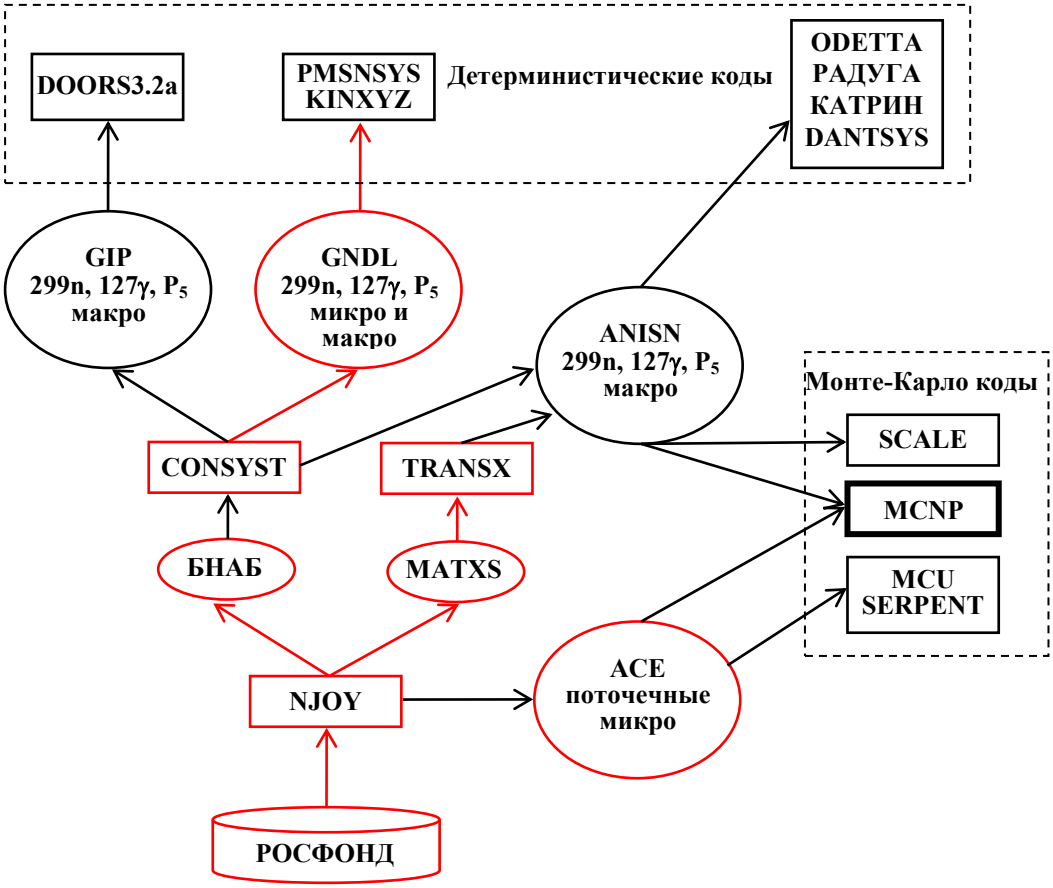


Рисунок 3.9 – Схема взаимодействия программы CONSYST с расчетными кодами

Развитие возможностей ЭВМ и активное внедрение суперкомпьютеров в практику проектирования реакторных установок позволили в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» выполнить переход к использованию в расчетном обосновании нейтронно-физических характеристик проектируемых РУ СВБР-100, СВБР-10 и др. кодов, реализующих высокоточные методы решения уравнения переноса, не только для расчетов радиационной защиты, но и для расчетов активных зон.

В настоящее время для расчета активных зон в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» используется код собственной разработки PMSNSYS, а для расчетов

радиационной защиты преимущественно код KINXYZ (в составе комплекса РЕАКТОР-ГП [133, 134], совместная разработка ИПМ РАН им. М.В. Келдыша и ОКБ «ГИДРОПРЕСС»).

Расчетное обоснование требует наличия согласованного программного обеспечения для генерации групповых констант в воспринимаемом формате. Представление групповых констант внутри комплекса РЕАКТОР-ГП осуществляется в специальном внутреннем формате программы GNDL [135]. Особенности кода PMSNSYS обеспечивают возможность непосредственного считывания групповых констант для расчета из файлов в стандартных форматах FIDO, ANISN или MACRXS.

Для настройки кода PMSNSYS на внутренний формат комплекса РЕАКТОР-ГП были специально разработаны спецификации форматов файлов предоставления групповых макро- (GNDLMAC) и микросечений (GNDLMIC) (приложение Г).

Спецификации разработаны на основе сведений о структурах групповых макро- и микросечений практически в полном соответствии с [135] по аналогии с признанными форматами типа ANISN, MACRXS, GOXS, и вместе с тем, имеют отличительные особенности, которые призваны обеспечить б*о*льшую гибкость в применении. В частности, указанные (и некоторые другие) форматы хранения групповых констант содержат только одну матрицу рассеяния, что накладывает некоторые ограничения по применению данных форматов в анализе свойств гомогенных сред (например, для изучения доли неупругой составляющей в матрице рассеяния). Также, некоторые стандарты (в частности ANISN, FIDO) предусматривают обязательное присутствие принципиальных сечений (principal cross sections), что, в ряде случаев (например, когда пользователя для списка материалов интересует единственный набор сечений, скажем σ_{n2n}), избыточно с точки зрения пользователя.

Разработка форматов GNDLMAC и GNDLMIC позволили создать требуемый интерфейс между результатами работы программы GNDL и PMSNSYS. Более того, указанные форматы GNDLMAC и GNDLMIC открывают

возможность подключения внешних программ подготовки групповых констант, например системы подготовки констант CONSYST/БНАБ, к выполнению расчетов и постобработке результатов. Реализация возможности подготовки констант в программе CONSYST и, одновременно, их предоставление в указанных форматах, открывает возможность использования системы CONSYST/БНАБ для обеспечения программ PMSNSYS и KINXYZ константами для выполнения расчетов:

- полей нейтронов и гамма-квантов;
- условий работы элементов РУ (повреждающие дозы, энерговыделение с учетом переноса гамма-квантов, газообразование, и пр.);
- параметров точечной кинетики;
- изотопной кинетики.

3.3.3 Описание изменений во входном задании

Выходные форматы в программе CONSYST определяются параметром NOUT. Этот параметр был дополнен значением 50 для записи констант в форматах GNDLMAC и GNDLMIC.

Для использования специальных данных из секций MF=9 и MF=13 необходимо в конфигурационном файле указать к ним пути с приставкой *BNABREA:*.

Для выбора желаемых сечений потребовалось ввести дополнительные параметры, которые без NOUT=50 не будут использоваться программой. Однако, при выборе NOUT=50 и без дополнительных опций CONSYST напишет предупреждение о том, что не выбраны ни макро-, ни микросечения и продолжит работу записав рассчитанные макроконстанты в формат ANISN в текстовом виде. Список сечений приведен в приложении Д.

Для «заказа» макросечений введен параметр MACRO=, после которого должна стоять опция печати в групповом или по-материальном представлении данных и число требуемых сечений. Далее должны быть перечислены макросечения. Имена макро- и микроконстант немного отличаются друг от

друга, но приводить список из ста имен в данной работе авторы сочли неуместным.

Для «заказа» микросечений введен параметр MICRO=, после которого должна стоять опция печати по материалам и число сечений. Далее должен быть приведен список сечений с количеством необходимых нуклидов для каждого типа данных. После этого следует массив с именами нуклидов для всех сечений. Например,

MICRO = 1 3 SHI 3 SHEAT 1 SSIGPQ 2 U235 U238 PU39 FE U235 PU39,

здесь выбрано 3 типа данных: спектр деления для ^{235}U, ^{238}U, ^{39}Pu, энерговыделение для Fe и матрица межгрупповых переходов для ^{235}U и ^{39}Pu.

Имена должны совпадать с именами в массиве NAME или NUCLIDES. Использование других имен возможно, но для этого нужно воспользоваться параметром NAMEX. Имена должны совпадать с данными в библиотеке БНАБ. Новый формат осуществляет доступ к секции MF=9, в которой отсутствуют данные о взаимодействиях нейтрона с элементом, поэтому элементы разбиваются на изотопы с весом в природной смеси и вычисляется кумулятивное сечение. При отсутствии взаимодействие записывается ноль. Если нет взаимодействий (отсутствуют данные в дополнительных секциях) для всего элемента, то программа напишет предупреждение, но запись констант продолжится.

Так как форматы GNDLMAC и GNDLMIC бинарный, то предусмотрена отладочная печать. Для этого необходимо ввести отрицательную опцию печати. Спецификацией форматов предусматривается текстовый вид файлов GNDLMAC и GNDLMIC, и в этом случае форматы называются GNDLMACT и GNDLMICT, соответственно. При выводе файлов в форматах GNDLMACT и GNDLMICT данные выводятся аналогично GNDLMAC и GNDLMIC, но только в текстовом виде, при этом в каждой строке содержится только одно число.

3.3.4 Расчеты тестовой задачи

В качестве практического примера ниже рассмотрены некоторые результаты расчета тестовой задачи БН-600 с гибридной активной зоной [136] (рис. 3.10*а*). Расчеты выполнены по PMSNSYS в S_nP_m приближении с 28-ю группами нейтронов и 15-ю группами гамма-квантов с константами CONSYST/БНАБ-93 с использованием форматов GNDLMAC (расчет $K_{эф}$ и нормировка на мощность) и GNDLMIC (расчеты изотопной кинетики).

При расчетах изменения изотопного состава топлива рассматривалась изотопная кинетика для изотопов ^{234}U, ^{235}U, ^{236}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{239}Np, ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, ^{241}Am, ^{242m}Am, ^{243}Am, ^{242}Cm, ^{243}Cm, ^{244}Cm и двух обобщенных осколков урана и плутония в более чем 13 тысячах «горящих» зон. При расчетах изменения изотопного состава поглотителя рассматривалась (n, α)-реакция на ^{10}B (число горящих зон 1842).

В таблице 3.2 представлен результат расчета падения реактивности за 140 эффективных суток работы на номинальной мощности 1470 МВт.

Таблица 3.2 – Падение реактивности за равновесный цикл 140 эффективных суток

Нормировка	200 МэВ		*kerma*		200 МэВ [136]	
Приближение	S_8P_1	$S_{16}P_3$	S_8P_1	$S_{16}P_3$	диффузия	транспортное
$K_{эф}$ BOC	1,0185	1,0189	1,0185	1,0189	1,0043±0,0073	1,0101±0,0101
$K_{эф}$ EOC	0,9932	0,9936	0,9933	0,9937	0,9790±0,0084	0,9909±0,0055
Падение реактивности	0,0250	0,0251	0,0249	0,0249	0,0254±0,0014	0,0251±0,0010

На рисунке 3.10*б* представлено распределение поля энерговыделения в конце кампании при нормировке на мощность по второму способу (см. ниже). Нормировка на мощность выполнялась двумя способами:

- 200 МэВ на деление;
- на полное энерговыделение (при упругом рассеянии, радиационном захвате, неупругом рассеянии и делении), включая энергию, уносимую гамма-квантами (с расчетом транспорта гамма-квантов), в таблице обозначено как *kerma*.

Видно, что полученные результаты по значению $K_{эф}$ в начале и в конце равновесного цикла находятся в пределах, а величина падения реактивности полностью соответствует среднему значению представленных в [136] величин. Следует отметить, что результаты расчета с использованием двух различных вариантов нормировки дают практически совпадающие результаты. В целом представленные значения слабо зависят от приближения S_nP_m.

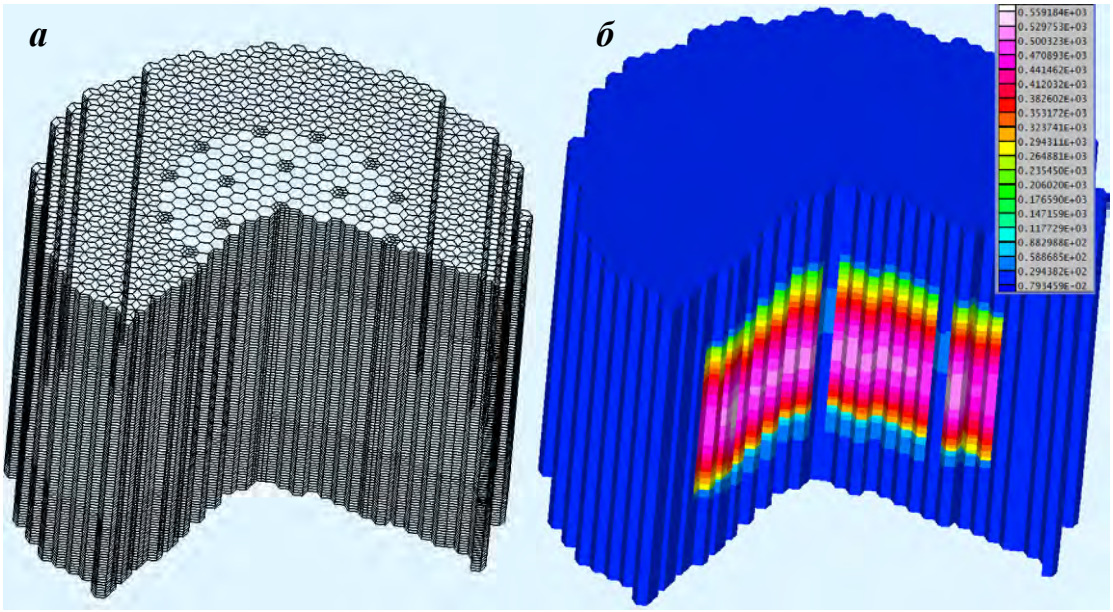


Рисунок 3.10 – БН-600 – расчетная сетка (*а*) и поле энерговыделения Вт/см^3 (*б*)

Для решения широкого класса динамических задач с использованием модели точечной кинетики необходимо иметь возможность рассчитывать параметры точечной кинетики, в частности эффективную долю запаздывающих нейтронов ($\beta_{эфф}$), как правило, с использованием решений прямой и сопряженной задачи. В работе [137] предложено три метода расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов по двум прямым расчетам, но с особыми требованиями к системе подготовке констант, в частности, с возможностью предоставления дополнительных данных по спектрам запаздывающих нейтронов. Тогда $\beta_{эфф}$ может быть аппроксимирована физической долей запаздывающих нейтронов β_0 в виде $\beta_{эфф} = \beta_0 * K_{del} / K_{tot}$, где K_{del} и K_{tot} – эффективные коэффициенты размножения нейтронов, рассчитанные со спектром запаздывающих нейтронов и с полным спектром деления,

соответственно. Результаты, представленные в таблице 3, показывают, что различие в эффективной доле запаздывающих нейтронов, полученной в точном расчете и по указанной выше формуле, отличаются не более чем на 0,7 отн. %, а непосредственно значение $\beta_{эфф}$ укладывается в средний интервал значений, полученный участниками теста [138].

Таблица 3.3 – Расчеты эффективной доли запаздывающих нейтронов

$K_{эф}$		1,0185
$K_{эф}$ (с использованием спектра запаздывающих нейтронов)		0,9209
Физическая доля запаздывающих нейтронов		6,50E-03
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, оценка по методу [137]		5,88E-03
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, точный расчет		5,83E-03
Относительная погрешность результата, %		-0,7
Эффективная доля запаздывающих нейтронов, [136]	транспортное приближение, R-Z геометрия	5,83E-03
	диффузионное приближение	5,90E-03±0,09E-03

3.4 Выводы к главе 3

В главе выполнен обзор популярных библиотек групповых нейтронных и фотонных констант, рассмотрены различные форматы представления микроконстант и макроконстант, программы их подготовки и особенности группового разбиения нейтронно-физических констант.

Получена библиотека микроскопических сечений в формате MATXS для 385 нуклидов путем переработки ОЯД РОСФОНД. При сравнении результатов расчетов нейтронно-физических функционалов с использованием разного константного обеспечения были выявлены расхождения, которые были устранены путем корректировки матриц упругого рассеяния и образования гамма-квантов в результате нейтронных реакций.

Программа подготовки констант CONSYST дополнена новыми функциональными возможностями (формат GNDL) для обеспечения, в частности, расчетных кодов ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Модернизированная версия позволяет рассчитывать блокированные микро- и макроконстанты для выбранных пользователем нуклидов с расширенным набором сечений (50 ранее не обрабатываемых сечений). Проведена верификация новых рассчитываемых сечений и показана приемлемость получаемых результатов.

ГЛАВА 4. Определение погрешности группового приближения при расчете пространственно-энергетического распределения реакторных частиц

Глава посвящена описанию расчетных методов и программ, экспериментов по радиационной защите и верификации константного обеспечения.

Во всех зарубежных отчетах по верификации и валидации системы констант для расчетов защиты используется бенчмарк-эксперименты по измерению нейтронных и фотонных спектров утечки с железных и свинцовых сфер, которые присутствует в справочнике ICSBEP. На указанных экспериментах можно тестировать характеристики взаимодействия нейтронов и гамма-квантов с железом и свинцом, а благодаря простой одномерной геометрии, результаты экспериментов имеют высокую точность. Указанные эксперименты обладают еще одним важным свойством – позволяют оценивать образование вторичных гамма-квантов в результате нейтронных реакций. На отдалении от активной зоны такая характеристика ядерных свойств защитных материалов является определяющей при расчете пагубного воздействия ИИ на персонал и внереакторное оборудование.

Эксперименты по исследованию свойств реакторных материалов радиационной защиты ядерных объектов собраны отдельно в базе данных SINBAD. В настоящей главе будет рассмотрен эксперимент JASPER, выполненный по японско-американской программе для изучения характеристик материалов радиально защиты быстрого реактора с натриевым теплоносителем. Измерения энергетических распределений нейтронов было выполнено как вблизи активной зоны, так и на удалении от неё в промежуточном теплообменнике.

4.1 Краткий обзор методов и программ расчета радиационной защиты

Основные расчетные коды радиационной защиты используют метод дискретных ординат или метод Монте-Карло. У каждого из указанных расчетных методов есть свои достоинства и недостатки. Например, в методе

Монте-Карло для расчетов протяженных сред с большим ослаблением потока частиц, где прямые расчеты оказываются времязатратными и малоэффективными используют методы понижения дисперсии для повышения точности исследуемых функционалов. В детерминистических расчетных кодах такой проблемы нет, но сами по себе они используют ряд упрощений, которые в целом снижают точность, полученных расчетных предсказаний.

4.1.1 Детерминистические методы

Особенностью указанных методов является ряд приближений: угловое распределение потока нейтронов оценивается в различных дискретных направлениях и определенных пользователем точках, упрощение геометрии рассматриваемой задачи (XYZ, RΘZ и др.) и использование многогрупповых дискретных энергетических зависимостей сечений взаимодействия. Использование в расчетах радиационной защиты программ, основанных на данном методе, позволяет без дополнительных инструментов получать исследуемые функционалы с приемлемой точностью.

Современные коды используют различные алгоритмы и аппроксимации решения уравнения переноса для ускорения сходимости поставленной задачи, развиваются методы решения разреженных сред и ведутся работы по распараллеливанию расчетных программ. Однако последнее достигает своего предела при фиксированной модели и дальнейшее ускорение возможно за счет использование твердотельных накопителей с большой скоростью обмена информации.

В нашей стране зарекомендовали себя такие расчетные коды как РОЗ/КАСКАД/КАТРИН и РАДУГА. Разрабатываются и совершенствуются новые коды ODETTA и PMSNSYS. За рубежом основными комплексами расчета радиационной защиты являются DANTSYS и DOORS3.2a.

4.1.2 Стохастические методы

Данный метод по праву называют прецизионным из-за возможностей детально описывать любую геометрию и использовать в расчетах непрерывные сечения взаимодействия частиц. Однако для расчетов радиационной защите в большинстве случаев при получении функционалов указанным методом используют групповые библиотеки констант для уменьшения скорости счета.

Большой выигрыш по времени счета программ, использующих метод Монте-Карло, достигается за счет распараллеливания. Причем здесь нет такого ограничения как у детерминистических кодов, хотя рост производительности не линеен и, при достижении определенного предела (большего, чем у детерминистических кодов), увеличение скорости счета становится не значительным.

В нашей стране для расчета радиационной защиты используются программы MCU и TDMCC. За рубежом общепризнанными комплексами расчета радиационной защиты являются MCNP, SCALE и SERPENT.

4.1.3 Методы понижения дисперсии

Для увеличения точности расчетных функционалов в методах Монте-Карло существуют способы понижения дисперсии, позволяющие существенно сокращать время счета. Их применение может привести к смещенной оценке, поэтому для получения приемлемых результатов расчетчик должен иметь определенный опыт.

В программах расчета методом Монте-Карло, таких как MCNP, существуют встроенные инструменты для использования указанных методов. Основными являются геометрическое расщепление и рулетка, энергетическое расщепление и рулетка и метод весовых окон.

В процедуре русской рулетки при движении частиц от более ценной (указанной расчетчиком, обычно ближе к детектору) геометрической области к менее ценной подвергаются процедуре отбора. В результате часть частиц погибает, а у оставшихся изменяется вес, чтобы была обеспечена несмещенная

оценка. При геометрическом расщеплении частицы в более ценной области разбиваются на n частиц с весом $1/n$ от начального веса. Такое решение остается несмещенным, т.к. суммарный вес частиц сохраняется.

При энергетическом расщеплении происходит разбиение частиц в важной энергетической области аналогично геометрическому расщеплению. Рулетка в таком случае отбрасывает некоторые частицы, которые выходят за пределы энергетической области.

Метод весовых окон является одним из мощных инструментов получения расчетных функционалов с минимальными дисперсиями. Весовые окна могут быть использованы для разных геометрических или энергетических (временных) областей, так и в совокупности. Пользователю необходимо каждой ячейке расчетной модели или дополнительно построенной сетке задать определенный вес. Вошедшая в эту ячейку частица будет разбита на несколько с указанным пользователем весом. В программе MCNP предусмотрена возможность автоматической генерации весовых окон. Разработаны дополнительные коды для построения весовых окон в программе MCNP, использующие гибридные методы, совмещая решение сопряженного или прямого уравнения Больцмана или итерационным способом [139].

4.2 Расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов

Отобранные в работе эксперименты позволяют протестировать данные по полному сечению нейтронов, гамма-квантов и кумулятивному образованию гамма-квантов в результате нейтронных реакций. Исследуются данные, описывающие взаимодействие реакторных частиц с железом и свинцом. Описание бенчмарк-экспериментов приведено в главе 1.

Погрешность расчетов методом Монте-Карло в каждой отдельно взятой энергетической группе для нейтронных спектров утечки с самых больших сфер не превышала 1 % в быстрой области энергий, в остальной энергетической области не превышала 5 %. Погрешность в гамма-квантах для каждой

отдельной группы с железной сферы, радиусом 35 см и свинцовой сферы, радиусом 30 см составляет не более 3 % и 1 %, соответственно, на всем энергетическом интервале.

4.2.1 Методика расчета с использованием группового и детального представления сечений

Библиотека групповых констант БНАБ хранит данные об образовании гамма-квантов за счет нейтронных реакций, образование за счет электронов в эти данные не входит. Такие низкоэнергетические гамма-кванты можно отнести к рентгеновскому излучению, возникающему в результате торможения электронов (позитронов). При сравнении группового и детального результатов расчетов прохождения гамма-квантов в программе MCNP предлагается использовать входной массив параметров PHYS, ограничивающий энергию и физику решаемой задачи. Этот массив можно задать для каждого типа частиц, но в данном случае (для сравнения с библиотекой групповых констант БНАБ) используется для фотонов (PHYS:P). В этом массиве параметру IDES для «отключения» рождения электронов, создаваемых гамма-квантами, необходимо присвоить 1. Отключение в массиве для электронов этого же параметра «отключит» рождение гамма-квантов за счет электронов.

4.2.2 Различия результатов расчета с использованием группового и детального представления сечений

На втором этапе было проведено сравнение результатов расчета нейтронных (рис. 4.1) [140] и фотонных (рис. 4.2) спектров утечки с поверхности железных (радиусом 10 - 50 см сверху) и свинцовых (радиусом 10 – 30 см снизу) сфер в групповом приближении с детальными расчетами (РОСФОНД). Групповые расчеты были выполнены с использованием системы констант БНАБ в 299 групповой структуре с микросечениями в форматах БНАБ

и MATXS, для которых макроскопические блокированные сечения были получены с помощью программ CONSYST и TRANSX, соответственно.

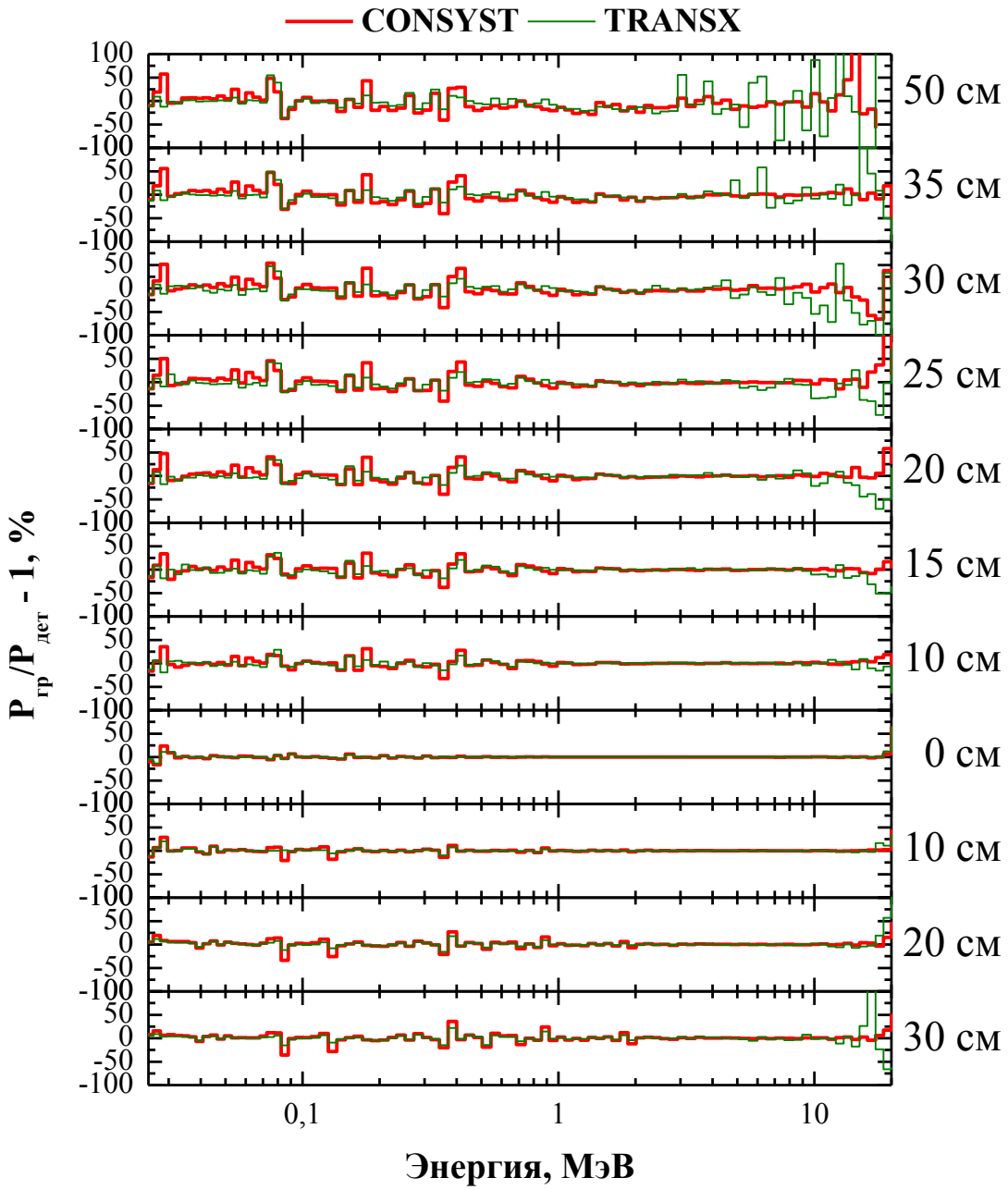


Рисунок 4.1 – Сравнение спектра нейтронов с поверхности железных (радиусом 10 - 50 см сверху) и свинцовых (радиусом 10 – 30 см снизу) сфер групповых (БНАБ) и поточечных расчетов с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД

Как уже было отмечено выше, с увеличением радиуса сфер увеличивается доля вторичных гамма-квантов, входящих в суммарный фотонный спектр. Отсюда следует, что новые матрицы образования вторичных гамма-квантов корректны.

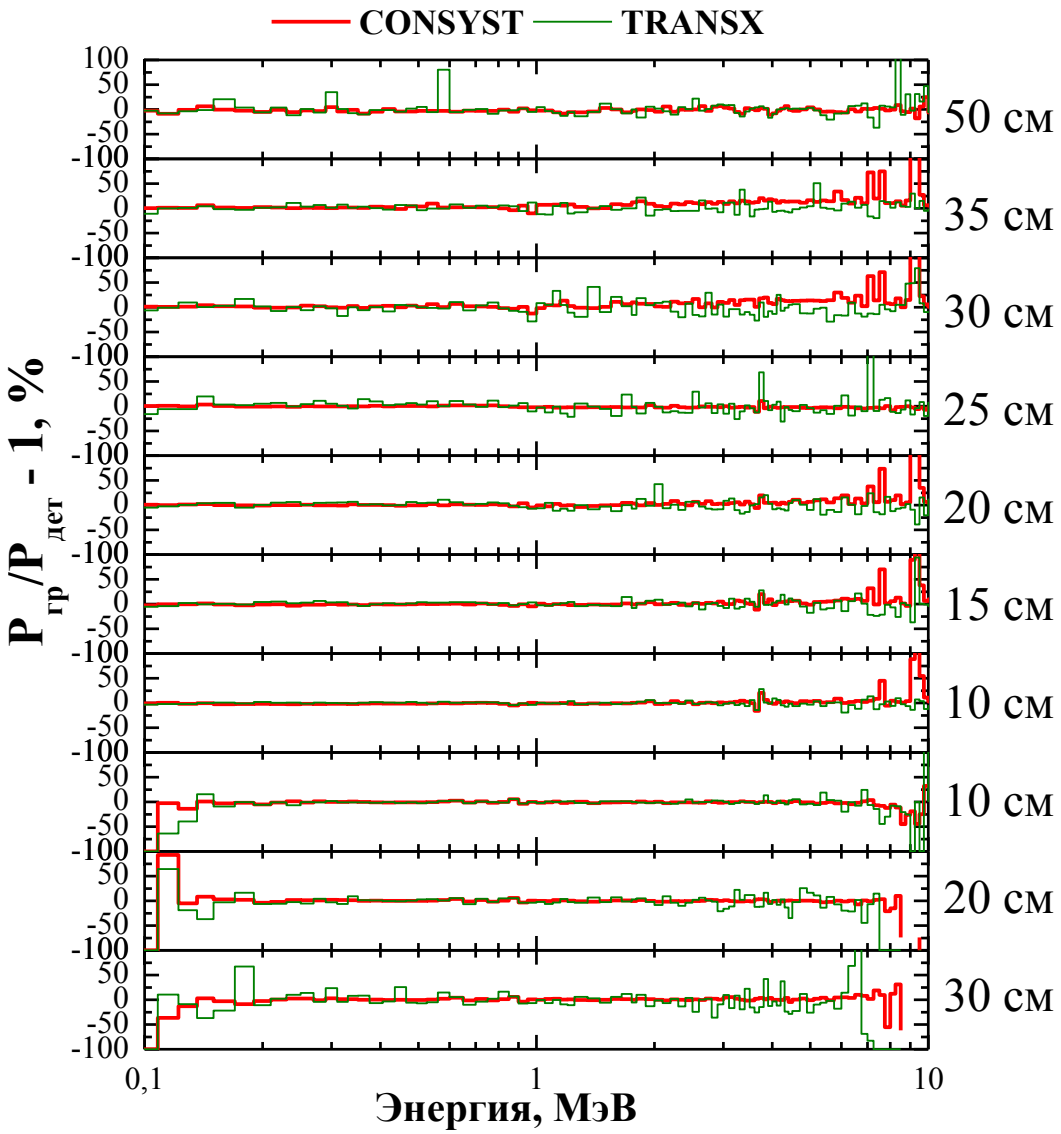


Рисунок 4.2 – Сравнение спектра гамма-квантов с поверхности железных (радиусом 10 – 50 см сверху) и свинцовых (радиусом 10 – 30 см снизу) сфер групповых (БНАБ) и поточечных расчетов с использованием библиотеки ОЯД РОСФОНД

Из графиков видно в основном хорошее согласие полученных результатов, как в нейтронных, так и в фотонных спектрах утечки с железных и свинцовых сфер, что говорит о переработке файлов ОЯД в групповые константы практически без потери точности расчетов. В нейтронных и фотонных спектрах при увеличении радиуса сфер в быстрой области энергий заметна флуктуация данных относительно детальных расчетов, которая связана со статистической погрешностью прецизионных расчетов, выполненных методом Монте-Карло, в областях энергий с малым спектром нейтронов [141].

4.3 Расчетное моделирование экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах

Верификация константного обеспечения на макроскопических экспериментах позволяет оценить изменение свойств реакторных материалов на реальных спектрах и композициях среды.

4.3.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка позволяет проводить верификацию константного обеспечения для важных защитных материалов быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями. В число таких материалов входят железо (основной элемент нержавеющей стали), натрий, графит и свинец. Широкий набор различных конфигураций данного эксперимента позволяет получать разнообразные спектры нейтронов.

Спектр выходящих из реактора нейтронов преобразовывался двумя модификаторами, моделирующими спектр вблизи активной зоны реактора и в районе промежуточного теплообменника.

В качестве детекторов использовались сферы Боннера разного радиуса, располагаемые на центральной оси на расстоянии 30 см от последнего защитного слоя. Сферы малого радиуса фиксировали нейтроны более низкой энергетической области, с увеличением радиуса сфер спектр становился более жестким.

Серия экспериментов JASPER [142] по исследованию прохождения нейтронного излучения через типичные материалы защиты реакторов с натриевым теплоносителем была выполнена на исследовательском реакторе TSR-II в ORNL. В эксперименте использовались два типа преобразователя спектра нейтронного потока из реактора TSR-II: один для моделирования спектра вблизи активной зоны реактора с натриевым теплоносителем (SM-1, рис. 4.3), и другой для получения спектра в районе промежуточного

теплообменника (SM-2, рис. 4.4). Выбор толщин защиты для тестирования в эксперименте был сделан на основе предварительного анализа в работе [143].

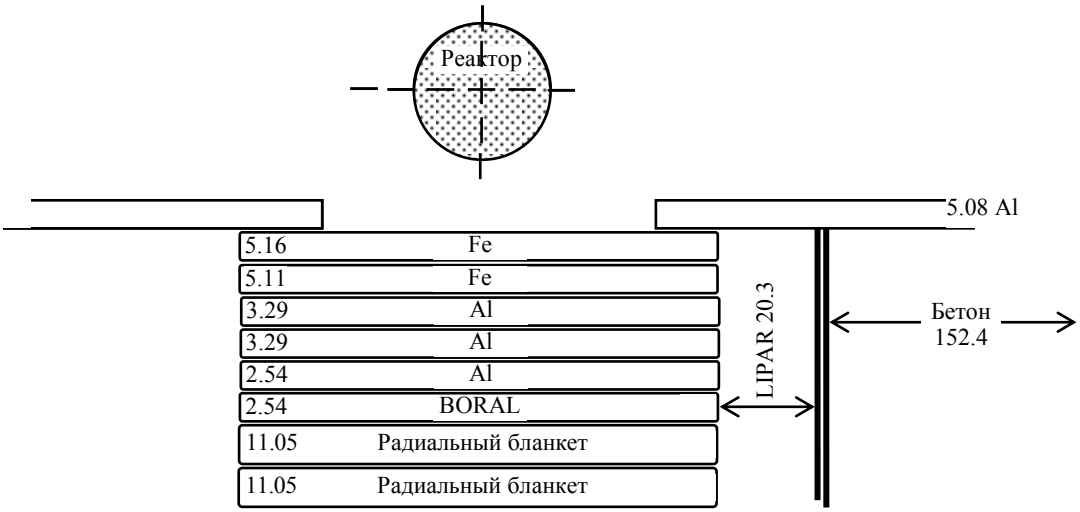


Рисунок 4.3 – Схема конвертора SM-1

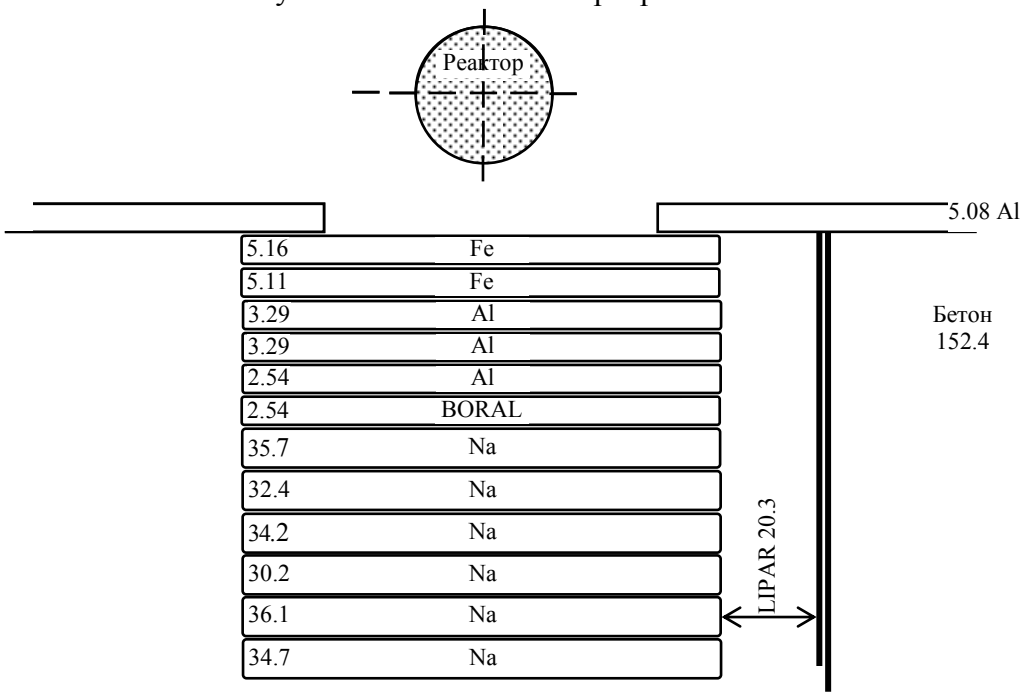


Рисунок 4.4 – Схема конвертора SM-2

Нейтронным источником [144] в экспериментах являлся реактор TSR-II. Для использования в расчетах измеренный групповой угловой поток трансформировался путем пересчета от полусферической к плоской поверхности.

Нейтронный поток, чувствительный к разной области энергии нейтронов, измерялся за защитными композициями с помощью полиэтиленовых сфер Боннера, диаметром 7.6, 12.7, 19.9 и 25.0 см. Функции отклика для сфер

Боннера в стогрупповом энергетическом разбиении приведены в описании эксперимента [142] (см. рис. 4.5).

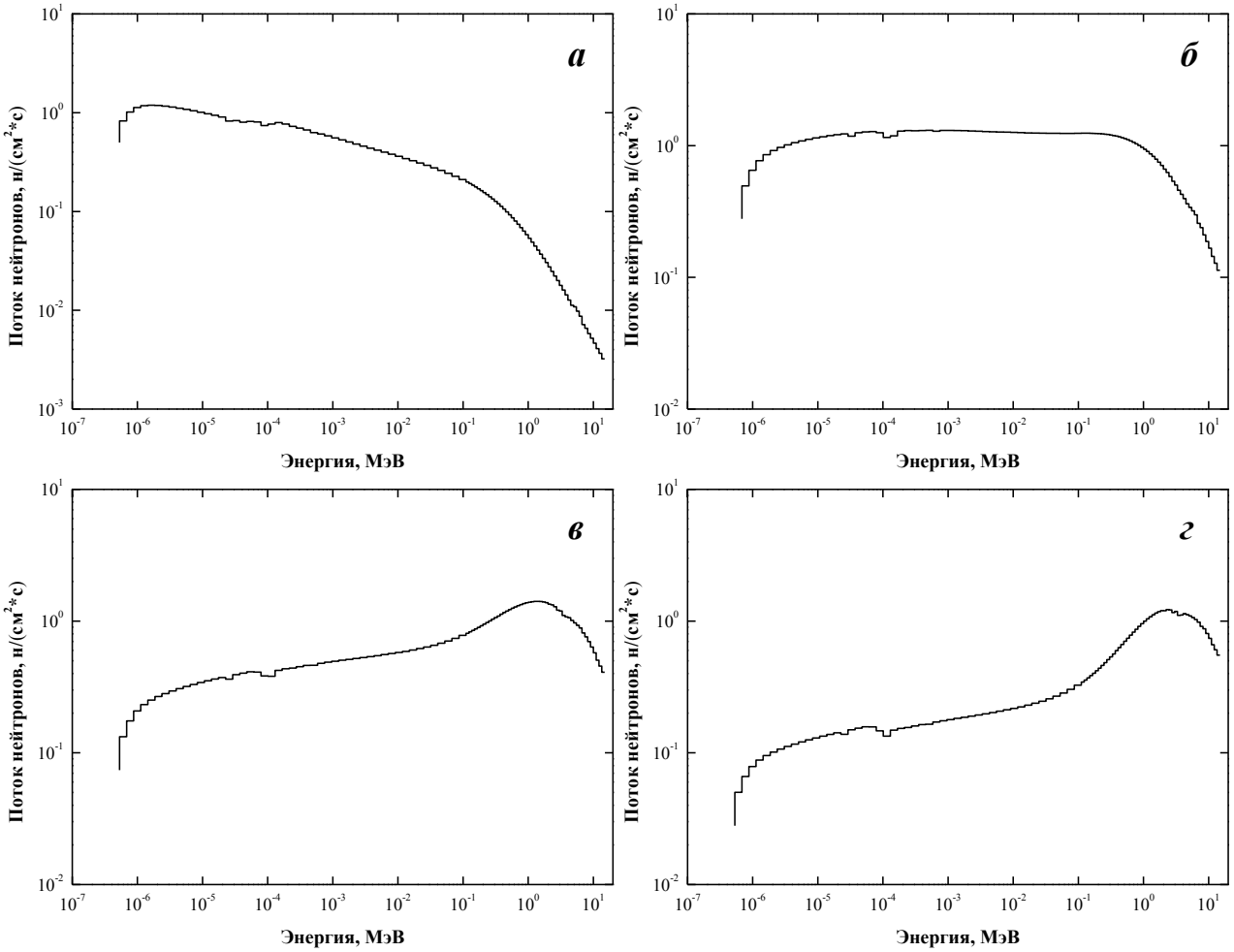


Рисунок 4.5 – Чувствительность сфер Боннера различного радиуса к нейтронному спектру. Сферы, радиусом 7,6 см (а), 12,7 см (б), 19,9 см (в) и 25,0 см (г)

В данном эксперименте исследовалось ослабление нейтронного излучения при прохождении его через различные композиции, моделирующие радиальную защиту реактора.

Конвертор и пластины с боковых сторон были окружены блоками из литиевого парафина толщиной 20.3 см и затем блоками из бетона толщиной 152.4 см для обеспечения границы для подсчета нейтронов, отраженных обратно к композиции, и создания достаточной защиты для минимизации эффекта вклада фоновой составляющей в результаты эксперимента.

Детекторы (сферы Боннера) в серии измерений размещались на центральной оси, а также на различных расстояниях от центральной оси в 30 см от заднего торца последней пластины композиции.

Измерения для каждого детектора нормировались на мощность реактора с использованием данных от двух камер деления, расположенных вдоль центральной оси реактора. Неопределенность в определении мощности реактора составляла ± 5 %. Погрешность измерений с помощью сфер Боннера находится в пределах ± 10 %.

4.3.2 Описание расчетных моделей

Модель экспериментальной установки начинается с бетонного коллиматора и заканчивается сферами Боннера, между которыми располагаются слои защиты. Источник нейтронов задавался на внешней (верхней) границе коллиматора в форме диска. Сферы Боннера моделировались в натуральную величину. Их функции отклика для детального расчета получены в необходимой групповой структуре интерполяцией.

Для верификации были отобраны несколько конфигураций:

1. Измерение потока нейтронов после уранового конвертера без защиты – конфигурация IA (рис. 4.6). Имитация защиты вблизи активной зоны реактора на быстрых нейтронах.

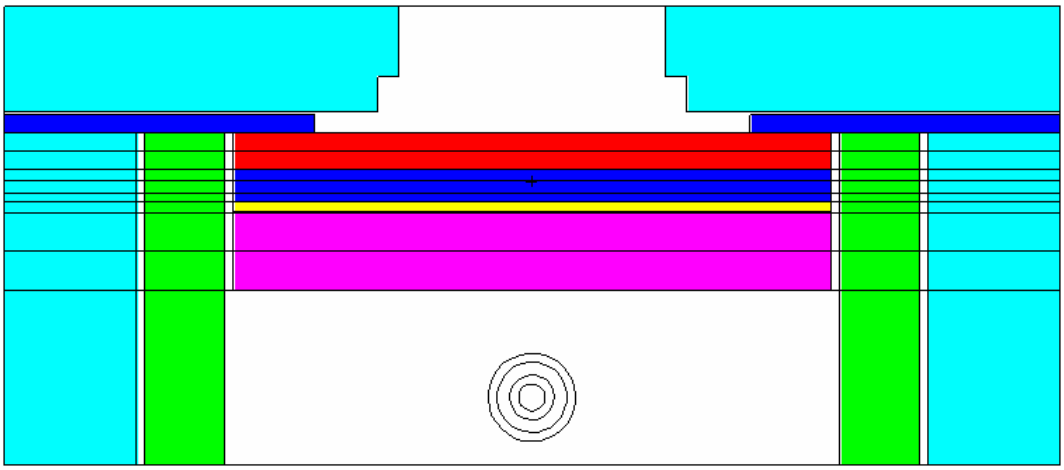


Рисунок 4.6 – Геометрия расчетной модели в программе MCNP для варианта IA

2. Измерение потока нейтронов после 10 см стальной и 6 см защитой карбида бора за урановым конвертером – конфигурация IIIB (рис. 4.7). Исследование ядерных свойств защитных материалов близи активной зоны реактора на быстрых нейтронах.

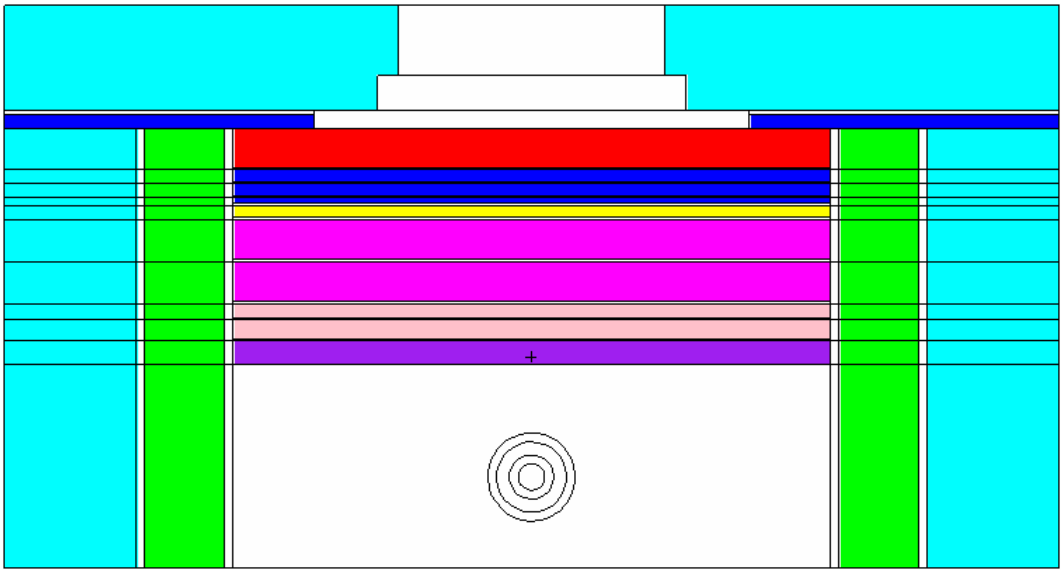


Рисунок 4.7 – Геометрия расчетной модели в программе MCNP для варианта IIIB

3. Измерение потока нейтронов после 2 м слоя натрия без уранового конвертера – конфигурация VC (рис. 4.8). Исследование спектральных характеристик нейтронного поля в промежуточном теплообменнике реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

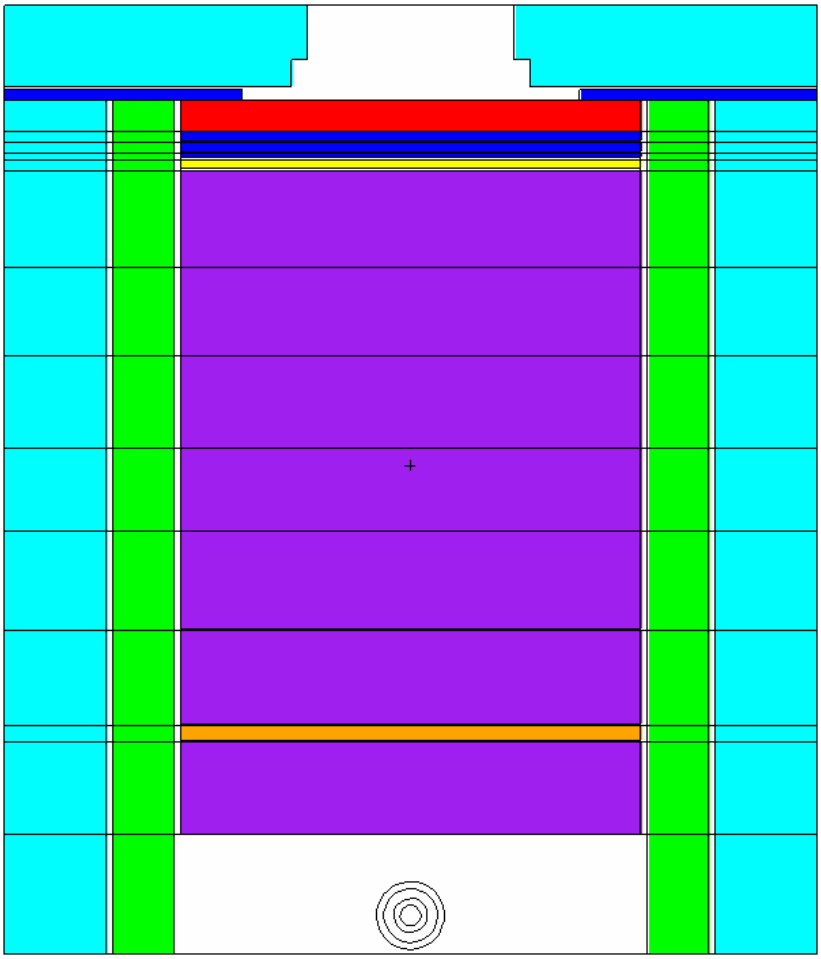


Рисунок 4.8 – Геометрия расчетной модели в программе MCNP для варианта VC

4.3.3 Результаты расчетов

Как уже было отмечено в актуальности работы – главным источником погрешностей рассчитываемых функционалов в детерминистических кодах является погрешность группового приближения. Особенностью программы MCNP является возможность использования в качестве констант, как групповое представление, так и поточечное представление нейтронно-физических констант. Такая особенность позволяет на одном расчетном задании выявить малейшие недостатки и различия группового приближения относительно детальных расчетов. Результаты сравнения расчетов, выполненных с использованием группового и поточечного представления нейтронно-физических констант для конфигураций IA, IIIB и VC приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Отношение группового и детального расчетов некоторых конфигураций эксперимента JASPER

Сфера Боннера, см	**Ослабление потока**	**БНАБ/РОСФОНД**			
		7,6	**12,7**	**19,9**	**25,0**
IA	10^2	0.993	0.998	0.997	0.995
IIIB	10^3	1.000	0.989	1.001	1.003
VC	10^4	0.989	0.978	0.970	0.967

Из таблицы 4.1 видно хорошее согласие расчетных результатов,выполненных с использованием поточечного (РОСФОНД) и группового (БНАБ) представления ядерных данных при ослаблениях нейтронного потока вплоть до 10^4 раз погрешность группового приближения – не более 5 %, при погрешности измерений с помощью сфер Боннера 10 %.

4.4 Выводы к главе 4

В главе приводится обзор методов и программ расчета радиационной защиты. Для стохастических методов рассмотрены варианты неаналогового моделирования, позволяющие повысить точность рассчитываемых функционалов.

При сравнении расчетов утечки нейтронов и гамма-квантов на моделях железных и свинцовых сфер получены приемлемые результаты с использованием групповых и поточечных библиотек. Расхождения в спектрах утечки нейтронов с железных и свинцовых сфер в среднем не превышают 15 и 10 %, соответственно. Расхождения в спектрах утечки гамма-квантов с железных и свинцовых сфер в среднем не превышают 5 %.

Обоснована и доказана приемлемость использования константного обеспечения CONSYST/БНАБ для расчетов характеристик радиационной защиты реакторов на быстрых нейтронах без потери точности – не более 5 % (по сравнению с расчетами, используемых поточечное представление сечений) при ослаблении нейтронного потока в 10^4 раз на примере прецизионной расчетной модели экспериментальной установки JASPER. Указанная приемлемость выполняется в расчетах теплового, резонансного и быстрого спектров нейтронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ экспериментальных данных и бенчмарк-экспериментов по исследованию свойств конструкционных элементов (железо, свинец, кремний и ниобий) в сферической и плоской геометриях.

Показано хорошее согласие экспериментальных и расчетных величин, выполненных с использованием последних версий библиотек ОЯД при сравнении нейтронного спектра утечки с поверхности железных и свинцовых сфер с калифорниевым источником в центре.

При сравнении спектров утечки гамма-квантов с поверхности железных и свинцовых сфер с калифорниевым источником в центре показано, увеличивающееся с толщиной защитных сфер, расчетно-экспериментальное расхождение, обусловленное недостаточным выходом гамма-квантов в файлах ОЯД. Для окончательной рекомендации по корректировке выходов вторичных гамма-квантов необходимо привлечение дополнительных экспериментальных данных.

Пересмотрена оцененная экспериментальная информация для железа в области энергий 80 – 400 кэВ в части определения границ энергетических интервалов. Выполнена оценка экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов для кремния и ниобия в области энергий 0,3 - 3,0 МэВ и 0,07 - 3,0 МэВ соответственно. В результате оценки получены следующие величины:

– Энергия налетающих на мишень протонов, из которой была получена энергия нейтронов.

– Ширина энергетического интервала и спектр нейтронов источника, полученных за счет торможения протонов в титан-тритиевой мишени и возможных изменений состояния мишени.

– Фоновая составляющая.

– Наблюдаемое (эффективное) и среднее полное сечение.

– Погрешности измеряемых величин.

Составлены согласованные расчетные задания на MCNP, которые рекомендуется использовать для валидации нейтронно-физических констант современных библиотек ОЯД.

2. Выявлены неточности в описании резонансной структуры полного сечения кремния в области энергий 0,3 - 0,8 МэВ для всех последних версий библиотек ОЯД. По результатам оценки ниобиевых экспериментов по пропусканию нейтронов выявлены расчетно-экспериментальные расхождения в области энергий 0,1 - 0,6 МэВ при использовании библиотеки РОСФОНД.

3. На основе оцененных экспериментов по измерению функций пропускания нейтронов получены новые оценки резонансных параметров полного сечения для кремния и ниобия, используя метод стохастической оптимизации и программу формирования средних резонансных параметров EVPAR. Отработаны методы корректировки разрешенной и неразрешенной резонансных областей для легких и тяжелых ядер.

Нейтронно-физические константы кремния были дополнены *s*-резонансом в энергетической области 700 кэВ, что нашло подтверждение в библиотеке JEFF-2.2 и позволило описать оцененные эксперименты по пропусканию нейтронов.

Сформированы средние резонансные параметры нейтронных резонансов ниобия для энергетического региона 7 – 600 кэВ (ранее неразрешенная область находилась при энергии 7 – 100 кэВ).

4. Выполнена валидация откорректированных данных кремния и ниобия на сферах из серии экспериментов OKTAVIAN, где показана незначительная чувствительность результатов расчета моделей указанных экспериментов к вносимым изменениям для кремния и отсутствие влияния для ниобия.

При тестировании модифицированных данных в расчетах бенчмарк-экспериментов из ICSBEP с большим содержанием указанных материалов было показаны следующие результаты. Добавление пропущенного резонанса улучшает критические и спектральные характеристики сборок HMM005 и PMM001 (F238/F235 - на 1,5 %; C197/F235 - на 20 %). Использование

уточненных нейтронно-физических констант ниобия позволяет получить результаты расчета эффективного коэффициента размножения в пределах экспериментальной погрешности бенчмарк-эксперимента HMF047, чего до внесения изменений не удавалось сделать.

5. Выполнено совершенствование системы групповых констант CONSYST/БНАБ. Проведена верификация методики подготовки и формирования групповых микро и макроконстант путем использования независимой системы TRANSX/MATXS и, созданной для этих целей, библиотеки микросечений с идентичным набором входных параметров для программы NJOY. Получены новые матрицы рассеяния и образования вторичных гамма-квантов для всех материалов библиотеки БНАБ на основе выявленных расхождений.

Программа подготовки констант CONSYST была расширена новыми гибкими функциональными возможностями, в которых добавлена запись микро- и макроконстант в адаптированном для детерминистических кодов представлении (формат GNDL). Появилась возможность выбирать необходимые пользователю сечения при расчете микроконстант для изотопов и при расчете макроконстант для материалов. Добавлено более 50 реакций, необходимых для выполнения расчетов с изменением нуклидного состава топлива.

6. Выполнено обоснование применимости константного обеспечения CONSYST/БНАБ для расчета радиационной защиты реакторов на быстрых нейтронах на примере экспериментов JASPER, а также свинцовых и железных сфер с калифорниевым источником в центре.

В расчете нейтронных и фотонных спектров утечки с железных и свинцовых сфер радиусом до 50 и 30 см, соответственно, показано, что поправка на групповое 299-ти нейтронное и 127-ми фотонное приближение не значительна.

В расчетах различных конфигураций экспериментальной установки JASPER с ослаблением потока нейтронов до 10^4 раз при использовании детекторов, чувствительных к тепловым, промежуточным и быстрым

нейтронам, было показано расхождение группового и детального расчетов не более 5 % при экспериментальной погрешности измеренных величин 10 %.

Результаты данной работы могут быть рекомендованы для использования при валидации и верификации нейтронно-физических кодов и констант для расчетов характеристик радиационной защиты.

В заключение автор выражает благодарность своему научному руководителю канд. физ.-мат. наук Мантурову Г.Н. за помощь и поддержку на всех этапах выполнения диссертации. Автор считает приятным долгом выразить благодарность д-ру физ.-мат. наук, профессору, Николаеву М.Н. за наставления и направления научного поиска. Особая признательность канд. физ.-мат. наук Филиппову В.В. за предоставленный экспериментальный материал, без которого данное исследование было бы неполным. Автор благодарен канд. физ.-мат. наук Цибуле А.М. за помощь в поиске ошибок при выполнении расчетов и исследований, а также конструктивной критике полученных результатов. Автор признателен канд. физ.-мат. наук Кощееву В.Н. за научное руководство на дипломной практике, получению новых матриц рассеяния и обучению программе NJOY. Автор благодарен Кислицыной Т.С. за доработку алгоритмов по получению матриц образования вторичных гамма-квантов и канд. техн. наук Андриановой О.Н. за подробное обсуждение работы. Автор признателен канд. техн. наук Николаеву А.А. и его коллег из АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» за совместную работу по расширению возможностей системы констант БНАБ. Хочется поблагодарить канд. физ.-мат. наук Грабежного В.А. за помощь в освоении нейтронно-физических кодов расчета защиты. Автор искренне признателен д-ру физ.-мат. наук, профессору Манохину В.Н. за поддержку и помощь в улучшении конечной работы, а также д-ру физ.-мат. наук, профессору Коробейникову В.В. за дискуссии, благодаря которым по-новому взглянул на свою работу. Особую благодарность хочется выразить канд. техн. наук Клинову Д.А. и д-ру физ.-мат. наук, профессору Гулевичу А.В. за то, что нашли время прочитать диссертацию и сделать важные

замечания и комментарии к работе. Автор хочет выразить огромную признательность д-ру техн. наук, профессору Ярыгину В.И. за помощь при формулировании результатов работ и окончательном оформлении диссертации. Автор выражает искреннюю благодарность руководству и всему коллективу константной лаборатории БНАБ, в тесном контакте с которыми выполнена настоящая работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.М. Фейнберг, С.Б. Шихов, В.Б. Троянский. Теория ядерных реакторов. Том 1. Элементарная теория реакторов. М. Атомиздат, 1978.
2. N. Metropolis and S. Ulam. The Monte-Carlo Method. Journal of The American Statistical Association, № 247, Vol. 44, September 1949. pp. 335-342.
3. Болятко В.В. Погрешности расчетов защиты от излучений / В.В. Болятко, М.Ю. Вырский, А.И. Илюшкин, Г.Н. Мантуров, В.П. Машкович, М.Н. Николаев, В.К. Сахаров, А.П. Суворов – М., Энергоатомиздат, 1983.
4. А.М. Волощенко, А.А. Дубинин, “РОЗ-6.3 - программа для решения уравнения переноса нейтронов и гамма-квантов в одномерных геометриях методом дискретных ординат” ВАНТ, Сер. Физ. и техн. яд. реакт., 1984, вып. 6(43), с. 30.
5. А.М. Волощенко, А.В. Швецов, “КАСКАД-1.5 - программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения в двумерных геометриях” Сборник тезисов докладов VII Российской научной конференции “Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, ” Обнинск, 22-25 сентября 1998 г.
6. A.M. Voloschenko, “KATRIN-1.0: Three-Dimensional Multigroup Discrete-Ordinates Transport Code,” Proc. Int. Conf. On the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing – PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002.
7. Л.П. Басс, О.В. Николаева. Радуга-6 - программа расчета стационарных и нестационарных нейтронных и гамма полей в 1D, 2D, 3D областях / Труды 7-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 17-20 мая 2011.
8. Воронков, А.В. Параллельная версия пакета РЕАКТОР-ГП / А.В. Воронков, А.С. Голубев, Е.П. Сычугова и др. // ВАНТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2009. – № 24. – С. 64-74.

9. Николаев, А.А. "PMSNSYS" - программа расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем с учетом эффектов пространственной гетерогенности. / А.В. Дедуль, А.А. Николаев // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 9. – С. 41-46.
10. Селезнев С.А., Сычугова Е.П., Селезнев Е.Ф., Дробышев Ю.Ю., Жуковский Р.А. Построение структурированных и неструктурированных тетраэдральных сеток на основе CAD моделей для ПС ODETTA. Сборник трудов «Нейтронка-2015», Обнинск, 2015.
11. DANTSYS 3.0: One-, Two-, and Three-Dimensional, Multigroup, Discrete Ordinate Transport Code System / R.E. Alcouffe, R.A. Baker, F.W. Brinkley, D.R. Mar, R.D. O'Dell, W.F. Walters // LA-12969-M. – Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA, 1995.
12. Y.Y. Azmy. Applications of the Discrete Ordinates of Oak Ridge System (DOORS) Package to Nuclear Engineering Problems. XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting, Mexico, July 11-14, 2004.
13. А.А. Блыскавка, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля. Программный комплекс MMKKENO для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло. ГНЦ РФ-ФЭИ. Обнинск, 2002.
14. Блыскавка А.А., Жемчугов Е.В., Раскач К.Ф. Пилотная версия программы ММК с непрерывным слежением за энергией нейтрона. Доклад на отраслевом семинаре «Нейтроника-2012». Обнинск, 2012.
15. Гомин Е.А. Статус MCU-4 // ВАНТ, сер: Физика ядерных реакторов.– М., – 2006.
16. Семенова Т.В. Возможности программы TDMCC для расчета кампаний реакторов / Т.В. Семенова, Е.А. Гусев, Е.В. Артемьева, и др. // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2012): программа и тезисы.– Обнинск, 2012. – С. 72.
17. MCNP - A General Monte Carlo Neutron-Particle Transport Code". Version 5. X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, April 2003.

18. Aufiero M., Cammi A., Fiorina C., Leppänen J., Luzzi L., and Ricotti M. "An extended version of the Serpent-2 code to investigate fuel burn-up and core material evolution of the molten salt fast reactor." J. Nucl. Mat., 441 (2013) 473-486.
19. S.M. Bowman, "SCALE 6: Comprehensive Nuclear Safety Analysis Code System" Nucl. Technol. 174(2), 126-148, May 2011.
20. В.В Коробейников. Разработка и применение алгоритмов нейтронно-физических расчетов систем сложной структуры. Автореферат на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Обнинск, 1992.
21. H.P. Smith, J.C. Wagner. A Case Study in Manual and Automated Monte Carlo Variance Reduction with a Deep Penetration Reactor Shielding Problem. – M&C 2003, Gatlinburg, Tennessee, April 6-11, 2003.
22. T.L. Becker, E.W. Larsen. The Application of Weight Windows to “Global” Monte Carlo Problems. – M&C 2009, Saratoga Springs, New York, May 3-7, 2009.
23. С.В. Чернов, А.В. Сонько, В.А. Хоромский. Расчет полей излучений методом итераций «весовых окон» в проекте АСММ 100 кВт. Сборник трудов 10-я Юбилейная Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Обнинск – Москва, 22-25 сентября 2015.
24. Гостев А.Л., Земсков Е.А., Мельников К.Г., Суслов И.Р., Тормышев И.В. Гибридный нейтронно-физический расчет радиационной защиты ядерного реактора с ТЖМТ. Сборник трудов 10-я Юбилейная Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Обнинск – Москва, 22-25 сентября 2015.
25. Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Библиотека групповых констант для расчетов реакторов и защиты // Известия вузов. Ядерная Энергетика. – 2014. – № 3. – С. 93.

26. Кощеев В.Н., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Свидетельство о государственной регистрации базы данных БНАБ-РФ № 2016620461 от 12 апреля 2016 г.
27. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кощеев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2.
28. Г.Н. Мантуров, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений. - ВАНТ. Сер. Ядерные константы. Вып. 1, М., 1996, с. 59.
29. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты. – М.: Энергоиздат, 1981.
30. Групповые константы для расчёта ядерных реакторов / Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, И.И. Бондаренко, М.Н. Николаев. – Москва: Атомиздат, 1964.
31. В.Н. Кощеев, Формирование библиотеки файлов оцененных нейтронных данных ФОНД-2.2 и ее переработка в реакторные константы: дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18 / Кощеев Владимир Николаевич; ГНЦ РФ-ФЭИ. – Обнинск, 2001. – 202 с.
32. С.В. Забродская, Новые типы данных в системе БНАБ-93 для расчета радиационных характеристик: дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук по спец. 05.13.18 / Забродская Светлана Васильевна; ГНЦ РФ-ФЭИ. – Обнинск, 2001. – 144 с.
33. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения: Препринт ФЭИ-2828. Обнинск. 2000.
34. Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ CONSYST-RF № 2016612865 от 11 марта 2016 г.

35. TRANSX 2.15 Code System to Produce Neutron, Photon, and Particle Transport Tables for Discrete - Ordinates and Diffusion Codes from Cross Sections in MATXS Format, ORNL, RSIC Peripheral Shielding Routine Collection PSR-317, February 1995. Available from OECD-NEA Data Bank as PSR-0317/03 TRANSX-2.15.
36. Broad-Group and Fine-Group and Coupled Neutron/Gamma Cross-Section Libraries Derived from ENDF/B-VII.0 Nuclear Data RSICC DATA LIBRARY COLLECTION - BUGLE-B7/VITAMIN-B7. DLC-245.
37. ENDF/B-VI Release 8 (Last release of ENDF/B-VI). IAEA-NDS-100 Rev. 11, Nov. 2001.
38. D. Wiarda, M.E. Dunn, D.E. Peplow, T.M. Miller and H. Akkurt. Development and Testing of ENDF/B-VI.8 and ENDF/B-VII.0 Coupled Neutron-Gamma Libraries for SCALE 6. ONRL/TM-2008/047.
39. A. Trkov, M. Herman and D.A. Brown. ENDF-6 Formats Manual. Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. CSEWG Document ENDF-102. Report BNL-90365-2009 Rev.2. December 2011.
40. Синица В.В., Малков М.Р., Ринейский А.А. Возможность переработки GND-структур ядерных данных с помощью пакета GRUCON Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2014.
41. Chadwick M.B. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data / M.B. Chadwick, M. Herman, P. Oblozinsky, et al. // Nuclear Data Sheets, 112(12):2887-2996 (2011).
42. J. Kopecky. Final verification and validation of JEFF-3.2. JEF/DOC-1590.
43. Shibata K. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering / K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura // Nuclear Science and Technology. – 2011, 48(1), 1-30.

44. Блохин А.И., Гай Е.В., Игнатюк А.В., Коба И.И., Манохин В.Н., Проняев В.Г. Новая версия библиотеки нейтронных данных БРОНД-3.1 // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы, Вып. 2, 2016. – С. 62 – 93.
45. Koning A.J., TENDL-2014: TALYS-based evaluated nuclear data library / A.J. Koning, D. Rochman, S.C van der Marck, J. Kopecky, J.Ch. Sublet, S. Pomp, H. Sjostrand, R. Forrest, E. Bauge, H. Henriksson, O. Cabellos, S. Goriely, J. Leppanen, H. Leeb, A. Plompen, R. Mills and S. Hilaire // available online ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/talys/tendl2014/tendl2014.html.
46. Положение о проведении верификации и экспертизы программных средств по направлению «Нейтронно-физические расчеты» (РБ-061-11). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2011.
47. Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б. О возможности улучшения нейтронных данных для конструкционных материалов в библиотеке РОСФОНД // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.
48. Николаев, М.Н. Измерение структуры резонансных параметров полного нейтронного сечения некоторых элементов в области энергий 0,3 - 2,7 МэВ / М.Н. Николаев, В.В. Филиппов // Атомная Энергия. – 1963. – Вып. 15. – № 6. – с. 493.
49. В.Л. Аксенов, А.М. Балагуров. Времяпролетная нейтронная дифрактометрия. Успехи физических наук, Том 166, № 9. Сентябрь, 1996. С. 955 - 985.
50. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. – Т. 4, 25: Машиностроение ядерной техники. – Кн. 1/ Под ред. Е.О. Адамова. – М.: Машиностроение, 2005. – 959 с.
51. M.B. Chadwick, E. Dupont, E. Bauge, A. Blokhin, O. Bouland, D.A. Brown, R. Capote, A. Carlson, Y. Danon, C. De Saint Jean, M. Dunn, U. Fischer, R.A. Forrest, S.C. Frankle, T. Fukahori, Z. Ge, S.M. Grimes, G.M. Hale, M. Herman, A. Ignatyuk, M. Ishikawa, N. Iwamoto, O. Iwamoto, M. Jandel,

R. Jacqmin, T. Kawano, S. Kunieda, A. Kahler, B. Kiedrowski, I. Kodeli, A.J. Koning, L. Leal, Y.O. Lee, J.P. Lestone, C. Lubitz, M. MacInnes, D. McNabb, R. McKnight, M. Moxon, S. Mughabghab, G. Noguere, G. Palmiotti, A. Plompen, B. Pritychenko, V. Pronyaev, D. Rochman, P. Romain, D. Roubtsov, P. Schillebeeckx, M. Salvatores, S. Simakov, E.Sh. Soukhovitski˜ı, J.C. Sublet, P. Talou, I. Thompson, A. Trkov, R. Vogt, and S. van der Marck. The CIELO Collaboration: Neutron Reactions on ^{1}H, ^{16}O, ^{56}Fe, ^{235,238}U, and ^{239}Pu Nuclear Data Sheets 118 (2014) 1–25.

52. Лемехов В.В., Смирнов В.С. БРЕСТ: быстрый реактор со свинцовым теплоносителем и пристанционным топливным циклом. Безопасность ядерных технологий и окружающей среды № 1 2012: "Замыкание ЯТЦ".
53. Селезнев Е.Ф. Кинетика реакторов на быстрых нейтронах. М.: Наука, 2013. – 239 с.
54. Ардашников С.Н., Гольдин С.М., Николаев А.В. и др. Защита от радиактивных излучений. Под ред. Николаева А.В. – М.: Металлургиздат, 1961.
55. Nikolaev M., Tsiboulia A., Matveenko I., Briggs J.B., Dean V.F. “Criticality experiments: analysis, evaluation, and programs. 4. Benchmark Experiments with Silicon Dioxide Waste Matrix”. Transactions of the American Nuclear Society; v. 84; ISSN 0003-018X; Worldcat; CODEN TANSAO; 2001; p. 280-282; American Nuclear Society 2001, Annual Meeting.
56. Z. Perk_o, S. Pelloni, K Mikityuk, J. Krepel, M. Szieberth, G Ga€etan, B. Vrban, J. Lüley, S. Cerba, M. Halasz, S. Feher, T. Reiss, 1, J. L. Kloosterman, R. Stainsby, C. Poette. Core neutronics characterization of the GFR2400 Gas Cooled Fast Reactor // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – 83. pp. 460-481.
57. K.D. Weaver. Interim Status Report on the Design of the Gas-Cooled Fast Reactor (GFR). INEEL/EXT-05-02662.
58. K. Yueh, K.A. Terrani. Silicon carbide composite for light water reactor fuel assembly applications. Journal of Nuclear Materials 448 (2014) 380–388.

59. А.А. Никитина. Исследование и разработка ДУО сталей на основе ЭП-823 и ЭП-450 для перспективных быстрых реакторов. Материалы научно-практической конференции «Проектное направление «Прорыв»: Результаты реализации новой технологической платформы ядерной энергетики», 3-4 апреля 2015.
60. Leal L.C., Derrien H., Larson N.M., Guber K.H., Valentine T.E. and Sayer R.O. «Nuclear Data Measurements, Analysis and Evaluation at the Oak Ridge National Laboratory in Support of Nuclear Criticality Safety». Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 2, p. 1422-1426 (August 2002).
61. N.M. Larson. SAMMY: an ORNL Tool for Generating Covariance Matrices in the Resonance Region. Workshop on Nuclear Physics and Related Computational Science R&D for Advanced Fuel Cycles, August 10-12, 2006. Bethesda, Maryland, USA.
62. R.H. Cooper, Jr.E.E. Hoffman. Refractory Alloy Technology for Space Nuclear Power Applications. CONF-8308130. Proceedings of a symposium held at Oak Ridge, Tennessee. August 10-11, 1983.
63. A. Dacca', G. Gemme, R. Musenich, R. Parodi, S. Pittaluga S. Rizzini, V. Buscaglia. Niobium Titanium Nitride for Superconducting accelerating cavities. Proceedings of the 1997 Workshop on RF Superconductivity, Abano Terme (Padova), Italy.
64. Несмеянов Ан. Н. Радиохимия. «Химия», 582 с., 1972.
65. C. Konno, T. Nakagawa, K. Ochiai, S. Sato, and M. Yamauchi. Problem on unresolved resonance data in recent nuclear data libraries. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007.
66. Ch. Konno, Yo. Kato, K. Takakura, M. Ohta, K. Ochiai and S. Sato. Self-shielding effect of unresolved resonance data in JENDL-4.0 Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp. 606-609.
67. "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments", Organization for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency, NEA/NSC/DOC(95)03 (September 2008 Edition).

68. J.B. Briggs, E. Sartori, L. Scott. /The International Reactor Physics Experiment Evaluation Project (IRPhEP). INL/CON-06-01060 PREPRINT. PHYSOR 2006.
69. I. Kodeli, A. Milocco, P. Ortego and E. Sartori. 20 Years of SINBAD (Shielding Integral Benchmark Archive and Database) Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp. 308-311.
70. Ю.Е. Головко, Ориентированная библиотека критических экспериментов для повышения точности расчетного предсказания параметров ядерной безопасности: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук по спец. 05.14.03 (17.02.2016) / Головко Юрий Евгеньевич; АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – Подольск, 2016. – 193 с.
71. G. Žerovnik, I.A. Kodeli, A. Trkov, A. Jazbec. Re-evaluation of the EURACOS Sodium and Iron Integral Shielding Experiments. 22nd International Conference Nuclear Energy for New Europe, 2013 Sept. 9-12, Bled, Slovenia.
72. G. Manturov, Ye. Rozhikhin, L. Trykov. “ALARM-CF-PB-SHIELD-001. Neutron and Photon Leakage Spectra from ^{252}Cf Source at Centers of Six Iron Spheres of Different Diameters”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
73. G. Manturov, Ye. Rozhikhin, L. Trykov. “ALARM-CF-PB-SHIELD-001. Neutron and Photon Leakage Spectra from ^{252}Cf-252 Source at Centers of Three Lead Spheres of Different Diameters”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
74. Cullen D.E., Hubbel J.H., Kissel L. / EPDL97: The Evaluated Photon Data Library’97 Version // Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-LR-50400, Vol. 6, Rev. 5, September 1997.
75. Cullen D.E., Perkins S.T., Seltzer S.M. / Tables and Graphs of Electron Interaction Cross 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL), Z = 1 - 100 // Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-50400, Vol. 31, November 1991.

76. Ломаков Г.Б., Николаев М.Н., Филиппов В.В. Неэкспоненциальность пропускания нейтронов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные-реакторные константы, 2016, Вып. 1, с. 148-166. (доступна онлайн http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/1-12.pdf).
77. Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Филиппов В.В. Измерение параметров резонансной структуры сечений, влияющих на распространение быстрых нейтронов в средах. МАГАТЭ, Вена, 1962.
78. Л.П. Абагян. Методы учеты резонансных эффектов в групповых константах для расчета быстрых реакторов. Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Мелекесс, 1971.
79. Николаев М.Н., Игнатов А.А., Исаев Н.В., Хохлов В.Ф. Метод подгрупп для учета резонансной структуры сечений в нейтронных расчетах. Часть 2. Атомная энергия, 1971, т. 30, вып. 5, с. 426-430.
80. В.В. Филиппов. Измерения структуры полных нейтронных сечений / В.В. Филиппов, М.Н. Николаев // Англо-советский семинар по ядерным константам для аналитических исследований реакторов – Дубна, 1968.
81. N. Otuka, E. Dupont, V. Semkova, B. Pritychenko, A.I. Blokhin, M. Aikawa, S. Babykina, M. Bossant, G. Chen, S. Dunaeva, R.A. Forrest, 1 T. Fukahori, N. Furutachi, S. Ganesan, Z. Ge, O.O. Gritzay, M. Herman, S. Hlavaˇc, K. Kato, B. Lalremruata, Y.O. Lee, A. Makinaga, K. Matsumoto, M. Mikhaylyukova, G. Pikulina, V.G. Pronyaev, A. Saxena, O. Schwerer, S.P. Simakov, N. Soppera, R. Suzuki, S. Tak´acs, X. Tao, S. Taova, F. T´ark´anyi, V.V. Varlamov, J. Wang, S.C. Yang, V. Zerkin, and Y. Zhuang. Towards a More Complete and Accurate Experimental Nuclear Reaction Data Library (EXFOR): International Collaboration Between Nuclear Reaction Data Centres (NRDC) Nuclear Data Sheets 120 (2014) 272–276.
82. А.В. Комаров, А.А. Лукьянов. Учет влияния резонансов p-волны при анализу эксперимента по пропусканию нейтронов через образцы железа. ВАНТ. Серия: ядерные константы, Вып. 1 (45), 1982. С. 23-29.

83. Кощеев В.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Библиотека оцененных нейтронных данных ФОНД-2.2.// В сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. «Ядерные константы», вып. 2. М. ЦНИИАИ, 2000, с. 40.
84. V. Koscheev, M. Nikolaev, V. Filippov. Measurement of fast neutron transmission through iron, nickel, and chromium samples of various thicknesses (FUND-IPPE-VDG-MULT-TRANS-001) // ICSBEP Handbook. – 2011. – Том IX.
85. Белл. Д. Теория ядерных реакторов / Д. Белл, С. Глесстон. – Москва: Атомиздат, 1974.
86. Г.А. Борисов. Кинематические таблицы ядерных реакций d,n и p,n / Г.А. Борисов, Р.Д. Васильев, В.Ф. Шевченко – Москва, 1974.
87. Физика быстрых нейтронов. Том 1: Техника эксперимента. – Москва, 1963.
88. Technical reports series 273 / IAEA // Handbook on Nuclear Activation Data. – Vienna, 1987. – с. 83.
89. Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Тестирование системы CONSYST/БНАБ-РФ в расчетах переноса гамма-квантов // Сборник тезисов докладов 10-ой Юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва – Обнинск, 22-25 сентября 2015, с. 20-22.
90. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка пропускания нейтронов для кремния и ниобия в области энергий 0,01 – 3 МэВ // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.
91. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка экспериментов по пропусканию нейтронов для кремния в области энергий 300-3000 кэВ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные-реакторные константы, 2016, Вып. 2, с. 33-51. (доступна онлайн http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/2-3.pdf).
92. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка экспериментов по пропусканию нейтронов для ниобия в области энергий 7-3000 кэВ. Вопросы атомной

науки и техники. Серия: Ядерные-реакторные константы, 2016, Вып. 3, с. 5-23. (доступна онлайн http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/3-1.pdf).

93. Andrianova O., Lomakov G., Manturov G. Examination of total cross section resonance structure of niobium and silicon in neutron transmission experiments // ND 2016 - Programme & Abstract Book, p. 146**.**
94. M.E. Dunn, ed., Proceedings of the Oak Ridge Electron Linear Accelerator (ORELA) Workshop ORNL/TM-2005/272, July 2005.
95. H. Derrien, K.H. Guber, J.A. Harvey, N.M. Larson and L.C. Leal Average Total Neutron Cross Section OF ^{233}U, ^{235}U AND ^{239}Pu from ORELA Transmission Measurements and Statistical Analysis of the Data Manuscript 149.
96. R.E. MacFarlane et al., NJOY97.0 Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Sections from ENDF/B Data. RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, PSR-368.
97. Синица В.В. ГРУКОН - библиотека программ расчёта групповых констант/ Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, В.В. Синица и др. // М., Атомиздат, Ядерно-физические исследования в СССР, 27, 1979.
98. M.E. Dunn and N.M. Greene. AMPX-2000: A Cross-Section Processing System for Generating Nuclear Data for Criticality Safety Applications International Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP) June 9-13, 2002.
99. H. Derrien, L.C. Leal, K.H. Guber, T. Valentine, N.M. Larson, and T. Rauscher. Evaluation of Silicon Neutron Resonance Parameters in the Energy Range Thermal to 1800 keV. Rep. ORNL/TM-2001/271.
100. О.Н. Андрианова, Методы и программы для оценки влияния неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений на расчетные характеристики ядерных реакторов: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук по спец. 05.14.03 (22.12.2015) / Андрианова Ольга Николаевна; НИЦ «Курчатовский институт». – Москва, 2015. – 152 с.
101. Андрианова О.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Уточнение нейтронных констант кремния и урана на основе интегральных и дифференциальных

экспериментов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2016. – № 1. – С. 61-69.

102. Klaus H. Guber, Luiz C. Leal, Royce O. Sayer, Robert R. Spencer, Paul E. Koehler, Timothy E. Valentine, Herve Derrien, and John A. Harvey. Neutron Cross Sections Measurements for Light Elements at ORELA and their Application in Nuclear Criticality.
103. Yo. Kato, K. Takakura, M. Ohta, K. Ochiai, S. Sato and Ch. Konno. Benchmark test of JENDL-4.0 with TOF experiments at Osaka Univ./OKTAVIAN Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp. 596-600.
104. Казанский Ю.А., Дулин В.А., Зиновьев В.П. и др. Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС // Сер. Физика ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977. № 8.
105. A. Tsiboulia, I. Matveenko, M. Nikolaev, M. Semenov, "HEU-MET-MIXED-005. Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Highly Enriched Uranium, Silicon Dioxide, and Polyethylene", International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
106. A. Tsiboulia, I. Matveenko, M. Nikolaev, M. Semenov, "PU-MET-MIXED-001. Critical Experiments with Heterogeneous Compositions of Plutonium, Silicon Dioxide, and Polyethylene", International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
107. Anrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Neutron data adjustment based on integral critical experiments on the BFS-facility with different neutron spectrum // Proceeding of International Conference on Physics of Reactors «PHYSOR 2016», Sun Valley, ID, USA, May 1-5, 2016, pp. 2166-2175.
108. Мантуров Г.Н. Приложение метода максимума правдоподобия к оценке нейтронных данных. Минск, 1984. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

109. Г.Н. Мантуров, В.П. Лунев, Л.В. Горбачева. Оценка нейтроны данных ^{232}Th в области неразрешенных резонансов. ВАНТ. Серия: Ядерные константы, Вып. 1 (50), 1983. С. 50-63.
110. D. Loaiza, “HEU-MET-FAST-047. Niobium - 1wt.% Zirconium Moderated by Polyethylene And fueled with Highly Enriched Uranium”, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
111. Андрианова О.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Совместное использование дифференциальных и интегральных экспериментов для уточнения оцененных ядерных данных // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника 2016), Обнинск, 23-25 ноября 2016.
112. Mattoon C.M. Generalized Nuclear Data: a New Structure (with Supporting Infrastructure) for Handling Nuclear Data / B.R. Beck, N.R. Patel, N.C. Summers, G.W. Hedstrom. Nuclear Data Sheets 113 (2012) 3145–3171.
113. J-Ch. Sublet, P. Ribon, M. Coste-Delclaux. CALENDF-2010: User Manual Rapport CEA-R-6277, ISSN 0429-3460, 2011.
114. Cullen D.E. PREPRO 2007, 2007 ENDF/B Pre-processing Codes (ENDF/B-VII Tested) / D.E. Cullen // Laurence Livermore National Laboratory, USA, owned, maintained and distributed by The Nuclear Data Section, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
115. J.E. White, D.T. Ingersoll, R.Q. Wright, H.T. Hunter, C.O. Slater, N.M. Greene, R.E. MacFarlane, R.W. Roussin. Production and Testing of the Revised VITAMIN-B6 Fine-Group and the BUGLE-93 Broad-Group Neutron/Photon Cross-Section Libraries Derived From ENDF/B-VI.3 Nuclear Data. ORNL/TM-6795/R1.
116. S.M. Bowman, W.C. Jordan, J.F. Mincey, C.V. Parks, L.M. Petrie. Experience with the SCALE Criticality Safety Cross-Section Libraries. Draft, April 2000.
117. В.В. Синица, А.В. Воронков GNPDL-30/19: Библиотека нейтронно-фотонных групповых констант для расчета быстрых реакторов и

радиационой защиты. Часть 1. Структура микросечений. Препринт ИПМ РАН (в печати), Москва, 2000.

118. Забродская С.В., Корчагина Ж.А., Кощеев В.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Библиотека сечений нейтронных реакций в системе константного обеспечения БНАБ-93 // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы, Вып. 2, 1999.
119. Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б., Теплухина Е.С., Переработка данных библиотеки РОСФОНД в групповые константы в формате MATXS и их верификация // Сборник докладов ежегодных межведомственных семинаров 2009-2011. – Обнинск, 2012. – Том 1. – С. 181-187.
120. “ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering”. – RSICC Computer Code Collection, CCC-254, ORNL.
121. Rhoades W.A., Childs R.L., “The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code”. Nucl. Sci. Eng., v.99, 1, 88 (1988).
122. M. Darrouzet et al., "Studies of Unit K, Lattices in Metallic Uranium Assemblies ZEBRA-8A, SNEAK 8, ERMINE and HARMONIE UK," Proc. International Symposium on Physics of Fast Reactors, Tokyo (1973).
123. R.J. LaBauve. “HEU-MET-FAST-001. Bare, Highly Enriched Uranium Sphere (GODIVA)”, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
124. R.W. Brewer. “HEU-MET-FAST-028. Uranium-235 Sphere Reflected by Normal Uranium Using Flattop”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
125. J.L. Sapir, B.J. Krohn, and R.D. Mosteller. “IEU-MET-FAST-007. BIG TEN: A Large, Mixed-Uranium-Metal Cylindrical Core with 10 % Average ^{235}U Enrichment, Surrounded by a Thick ^{238}U Reflector”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.

126. R. Douglas O'Dell. “PU-MET-FAST-001. Bare Sphere of Plutonium-239 Metal (4.5 at.%. 240Pu, 1.02 wt.% Ga)”, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
127. R.W. Brewer. “PU-MET-FAST-006. Plutonium sphere reflected by normal uranium using flattop”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2008 Edition.
128. Golovko Yu., Koscheev V., Lomakov G. et al. Verification of current version of ABBN constants and CONSYST code in calculation of criticality benchmarks // International Conference on Nuclear Data for Science and Technology «ND2013», New-York, USA, March 4-8, 2013.
129. Головко Ю.Е., Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б. и др. Верификация современной версии констант БНАБ и программы подготовки CONSYST в расчетах критичности // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2014. – № 2. – С. 99-108.
130. Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. и др. Состояние и верификация константного и программного обеспечения БНАБ // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.
131. Блыскавка А.А., Поляков А.Ю., Цибуля А.А. FORMCNP программа формирования библиотеки групповых констант для MCNP // Препринт ФЭИ-2928, Обнинск, 2001.
132. Серегин А.С., Кислицына Т.С. Цибуля А.М., Аннотация комплекса программ TRIGEX.05: Препринт ФЭИ-3132. – г. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008.
133. Комплекс программ для ПЭВМ расчета основных физических процессов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах РЕАКТОР-ГП. Описание программы и применения. 8624607.00564-01 13 01, ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007.

134. Дедуль А.В., Николаев А.А., Соколов Р.В. Возможности кодов ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в комплексном расчете реактора и радиационной защиты. Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». НИКИЭТ, г. Москва, 27-29 ноября 2012 г.
135. В.И. Журавлев, А.В. Воронков, А.Н. Брыкин, В.В. Синица, Е.А. Земсков, В.В. Кальченко. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 24. Реакторные установки СВБР. Новые возможности GNDL – системы константного обеспечения расчетов реакторов и защиты, 2009.
136. Working Material. The Fourth Research Co-ordination Meeting on "Updated Codes and Methods to Reduce the Calculational Uncertainties of the LMFR Reactivity Effects", “BN-600 hybrid core benchmark analyses”, Y.I. Kim et al., IAEA CRP Meeting held in IPPE, Obninsk, Russian Federation, on May, 19-23, 2003.
137. А.В. Воронков, Е.А. Земсков, В.В. Кальченко. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 24. Реакторные установки СВБР. Методы расчета параметров точечной кинетики ядерного реактора. 2009.
138. Дедуль А.В., Кощеев В.Н., Ломаков Г.Б. и др. Новые возможности программы CONSYST – форматы gndlmac и gndlmic для обеспечения константами программ PMSNSYS и KINXYZ // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – Обнинск, 2014. – № 3. – С. 49-61. (доступна онлайн: http://vant.ippe.ru/images/pdf/2014/3-6.pdf).
139. С.В. Чернов. MESHMOD – пакет сервисных программ для проведения расчетов переноса излучений по гибридной схеме с использованием методов Монте-Карло и дискретных ординат. Руководство пользователя. 10.11.2015.
140. Grabezhnoy V., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Verification of the ABBN-RF2010 constants in calculations of shielding benchmarks // Progress in

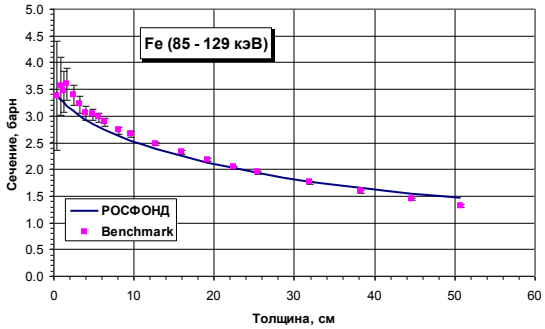
Nuclear Science and Technology (PNST) of Atomic Energy Society of Japan Vol. 4 (2014) pp. 587-590.

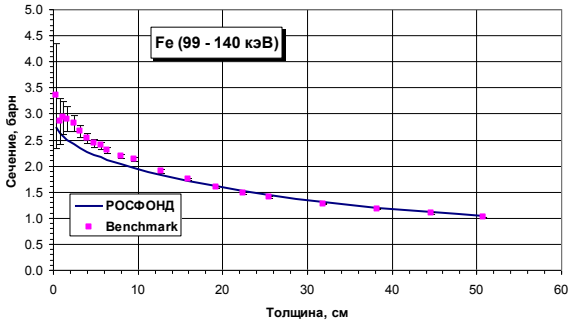
141. Грабежной В.А., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Использование системы групповых констант БНАБ-РФ для расчетного анализа экспериментов по радиационной защите // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника 2016), Обнинск, 23-25 ноября 2016.
142. F.J. Muckenthaler, B.D. Rooney, J.D. Drischler, N. Ohtani, J.L. Hull, L.B. Holland. Measurements for the JASPER Program Radial Shield Attenuation Experiment. ORNL/TM-10371.
143. W.W. Engle, Jr., D.T. Ingersoll, C.O. Slater, F.J. Muchenthaler, "Specifications for the JASPER Program Attenuation Experiment," ORNL/LMR/AC-86/5 (October 1986).
144. R.E. Maerker et al., "Calibration of the Bonner Ball Neutron Detectors Used at the Tower Shielding Facility," ORNL/TM-3465 (June 1971).
145. R.E. Maerker and F.J. Muckenthaler, "The Absolute Neutron Spectrum Emerging Through the Large Beam Collimator from the TSR-II Reactor at the Tower Shielding Facility", ORNL-TM-5183, January 1976.

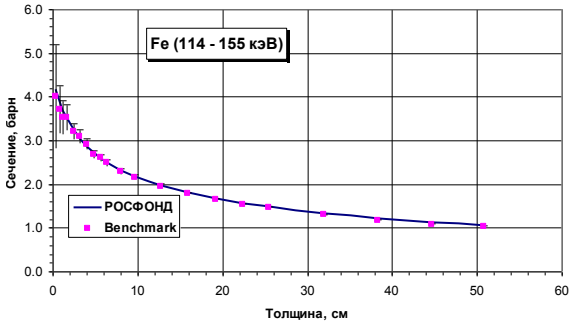
Приложение А. Журнал измерений

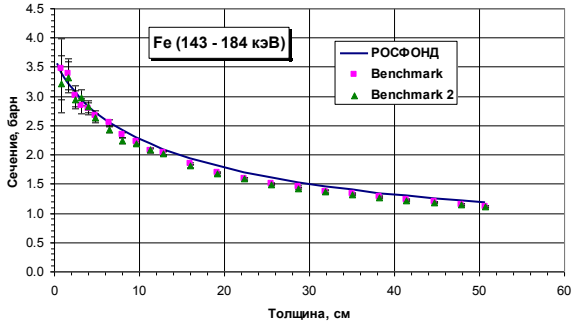
Приложение Б. Сравнение наблюдаемого сечения железа с расчетами по РОСФОНД

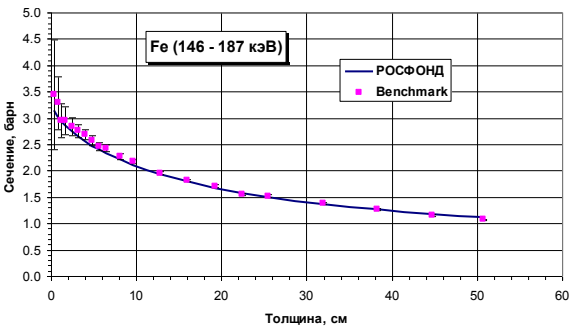
(шкала ординат имеет разные значения на графиках)

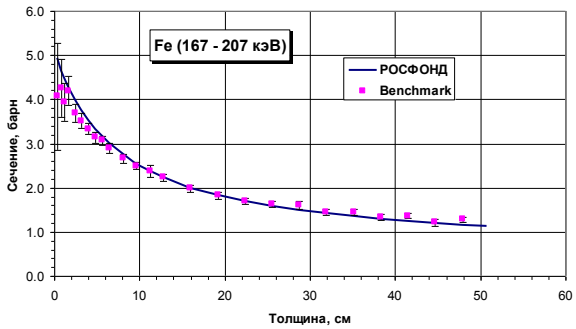


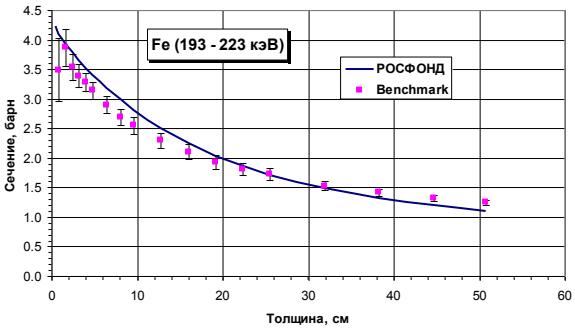


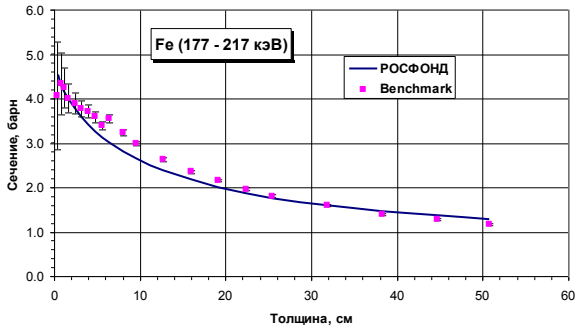


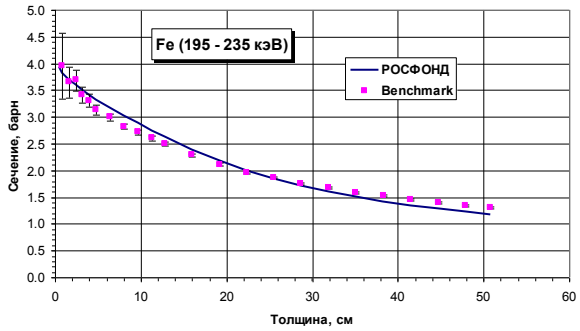


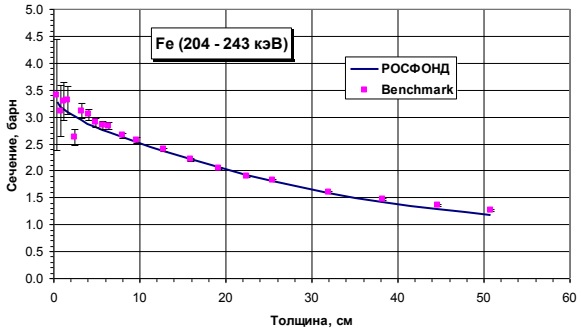


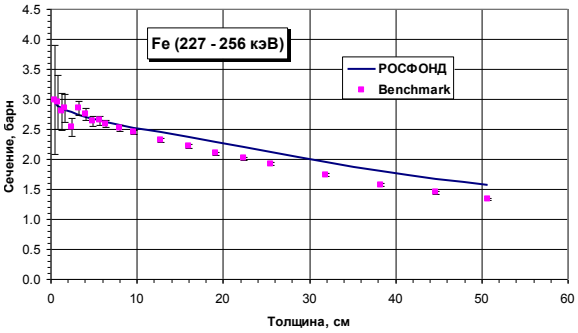


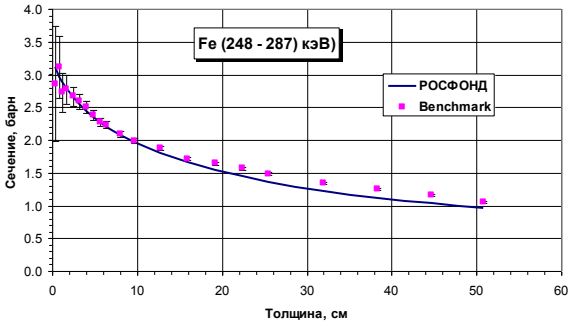


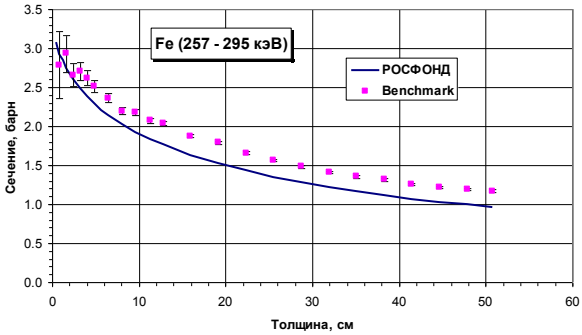


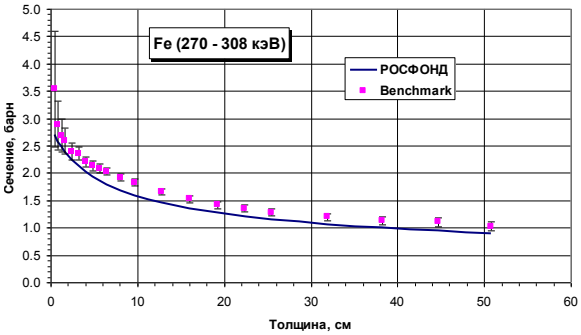

Fe (195 - 235 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

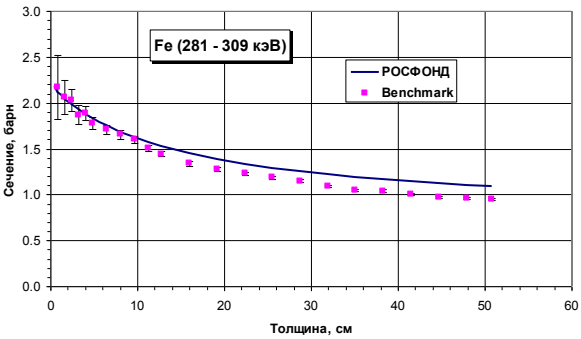

Fe (204 - 243 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

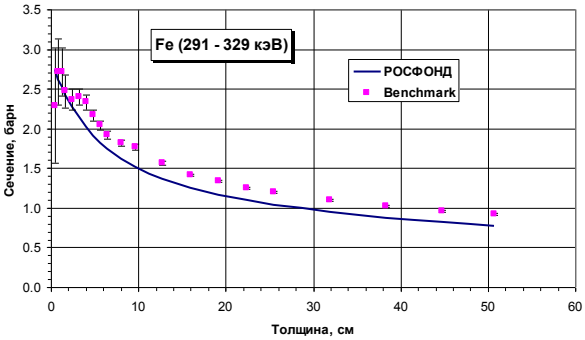

Fe (227 - 256 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

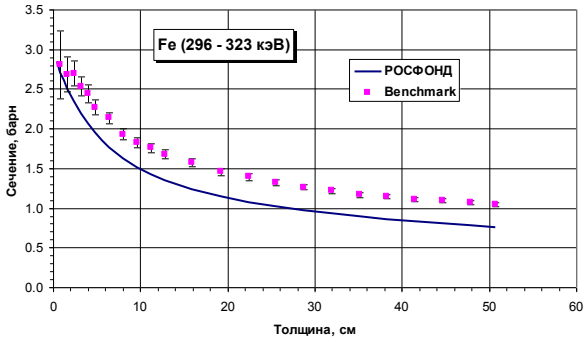

Fe (248 - 287) кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

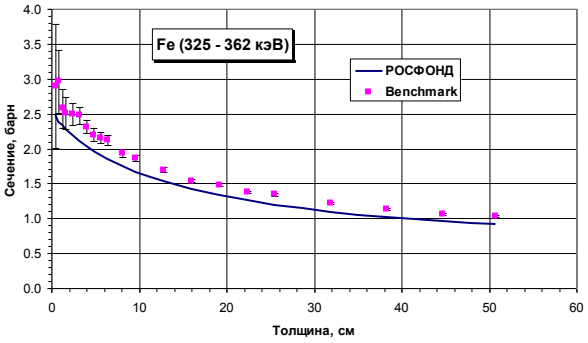

Fe (257 - 295 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

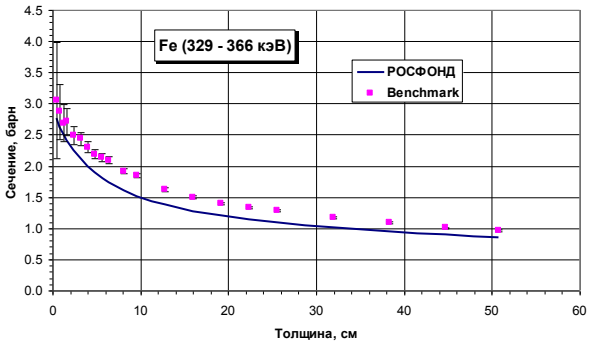

Fe (270 - 308 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

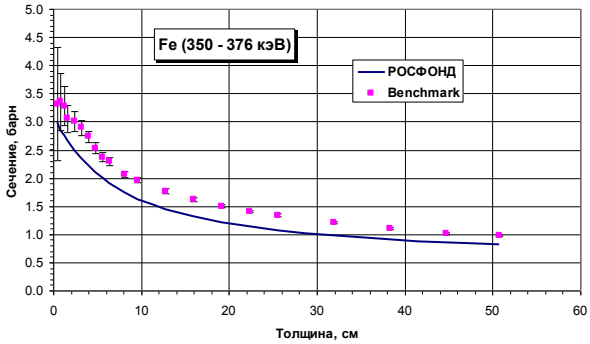

Fe (281 - 309 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см


Fe (291 - 329 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см


Fe (296 - 323 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

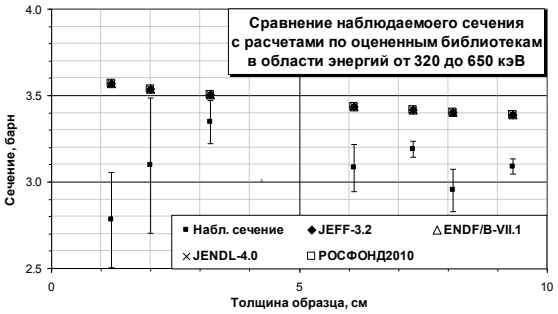

Fe (325 - 362 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

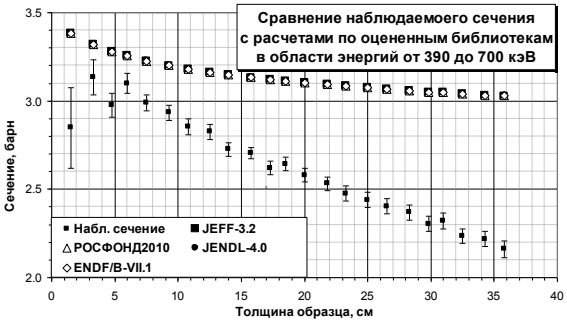

Fe (329 - 366 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

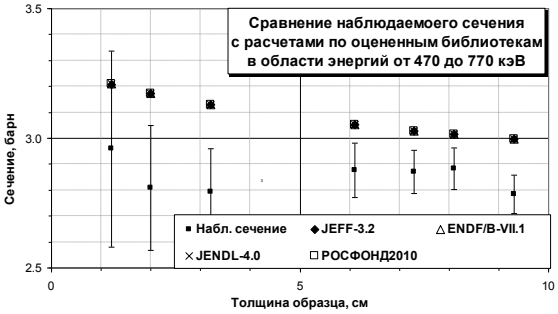

Fe (350 - 376 кэВ)
РОСФОНД
Benchmark
Сечение, барн
Толщина, см

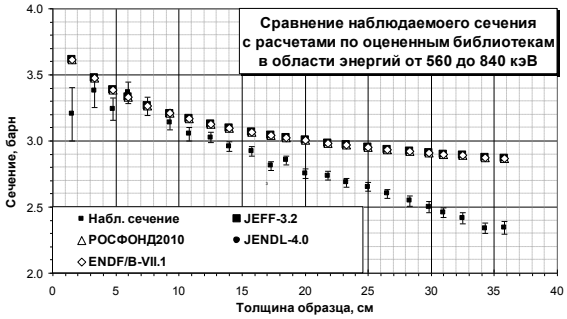
Приложение В. Сравнение наблюдаемого сечения кремния с расчетами по современным библиотекам

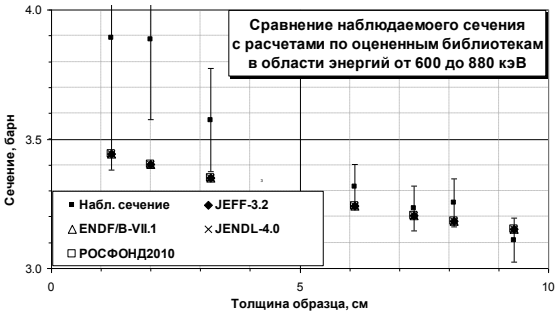
(шкала ординат имеет разные значения на графиках)

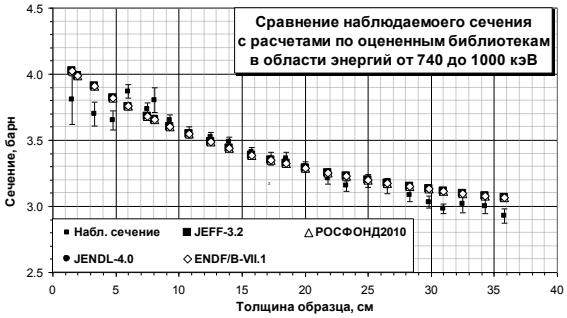


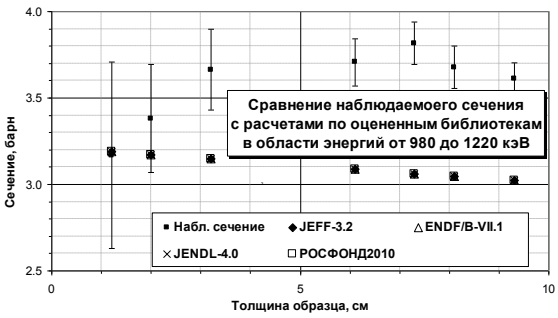


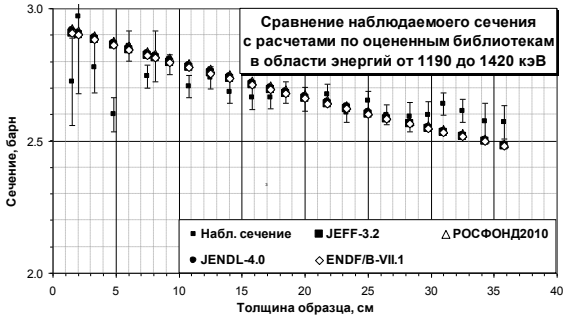


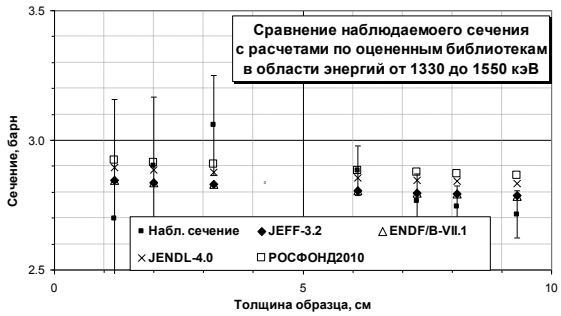


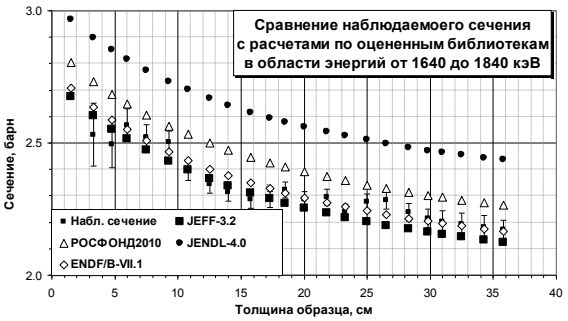


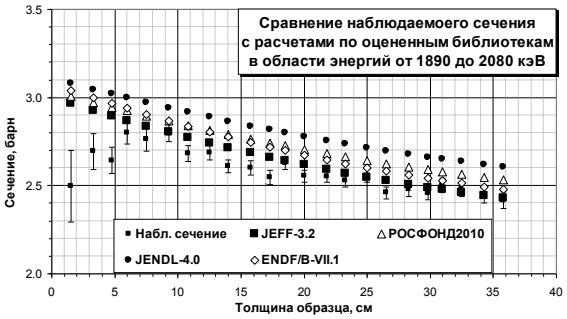


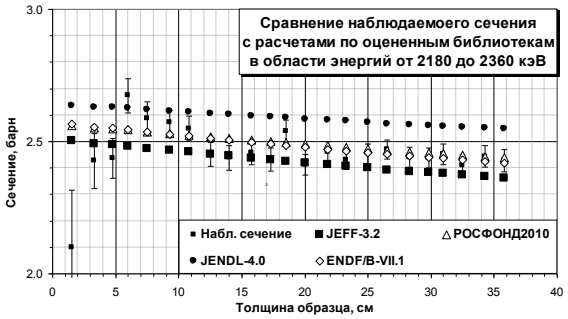


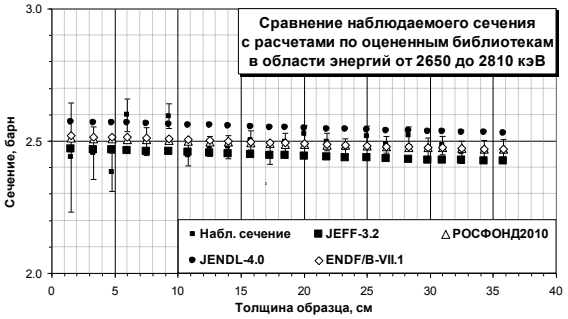



Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1330 до 1550 кэВ
Сечение, барн
Толщина образца, см
Набл. сечение
JEFF-3.2
ENDF/B-VII.1
JENDL-4.0
РОСФОНД2010


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1640 до 1840 кэВ
Сечение, барн
Толщина образца, см
Набл. сечение
JEFF-3.2
РОСФОНД2010
JENDL-4.0
ENDF/B-VII.1

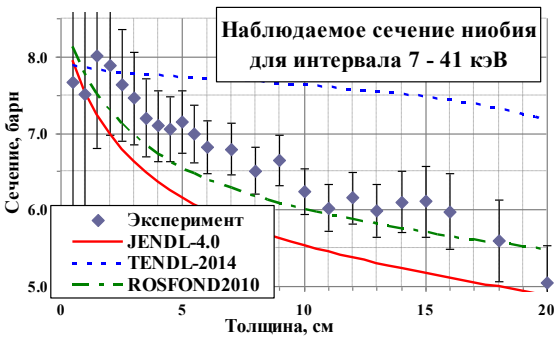

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1890 до 2080 кэВ
Сечение, барн
Толщина образца, см
Набл. сечение
JEFF-3.2
РОСФОНД2010
JENDL-4.0
ENDF/B-VII.1

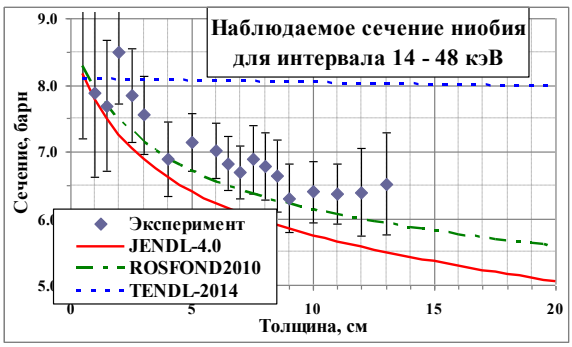

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 2180 до 2360 кэВ
Сечение, барн
Толщина образца, см
Набл. сечение
JEFF-3.2
РОСФОНД2010
JENDL-4.0
ENDF/B-VII.1

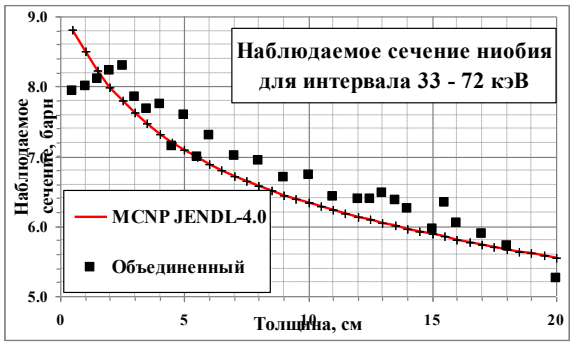

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 2650 до 2810 кэВ
Сечение, барн
Толщина образца, см
Набл. сечение
JEFF-3.2
РОСФОНД2010
JENDL-4.0
ENDF/B-VII.1

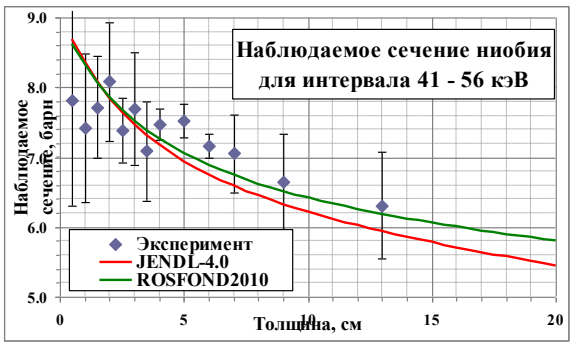
Приложение Г. Сравнение наблюдаемого сечения ниобия с расчетами по современным библиотекам

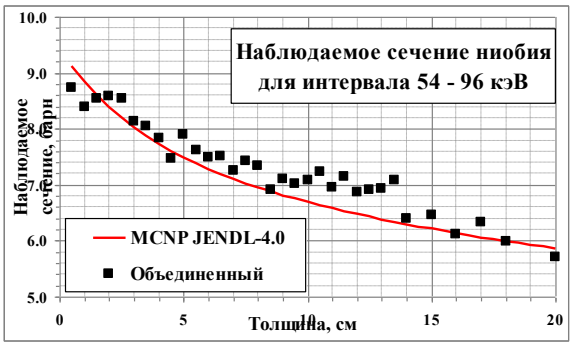
(шкала ординат имеет разные значения на графиках)

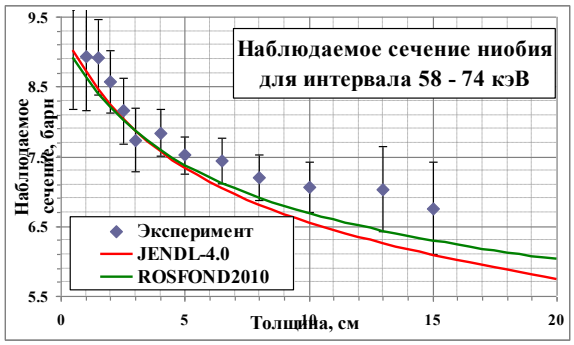


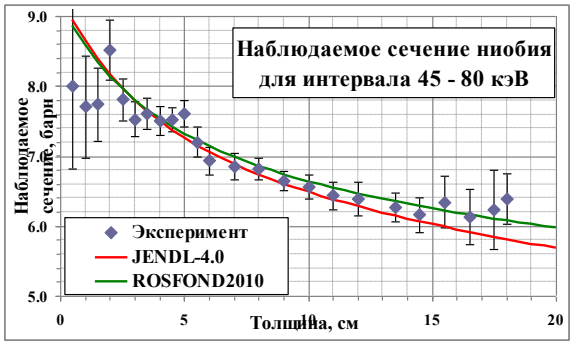


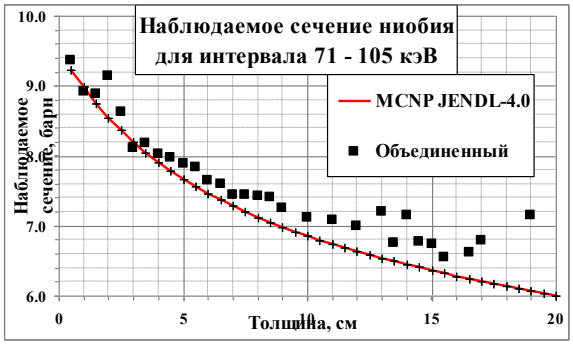


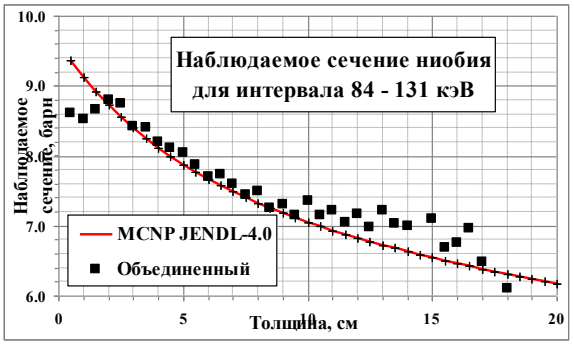


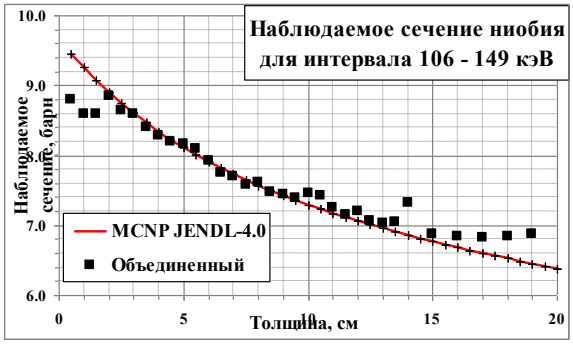


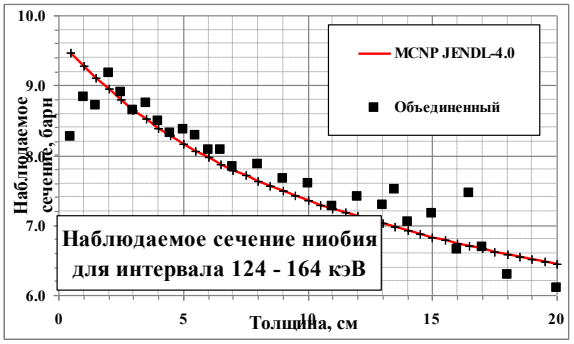


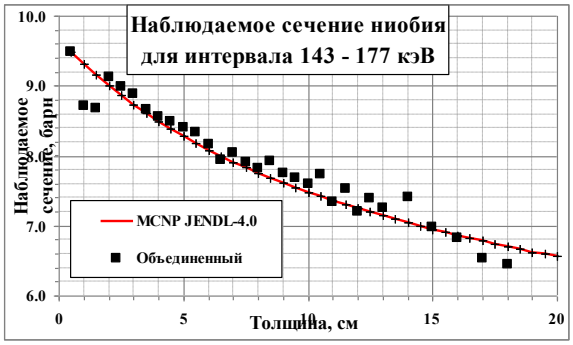


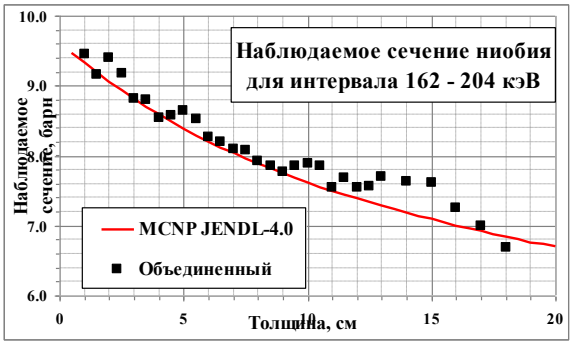

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 71 - 105 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

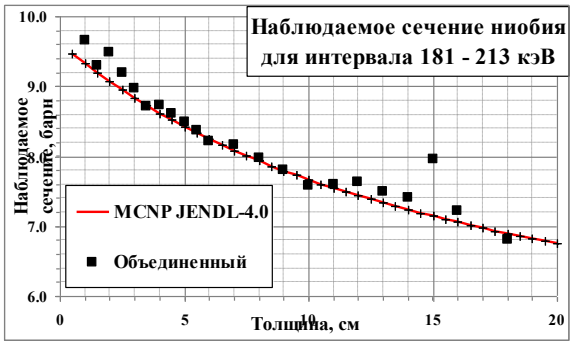

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 84 - 131 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

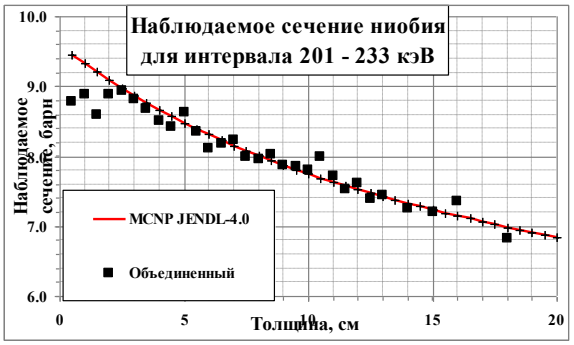

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 106 - 149 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

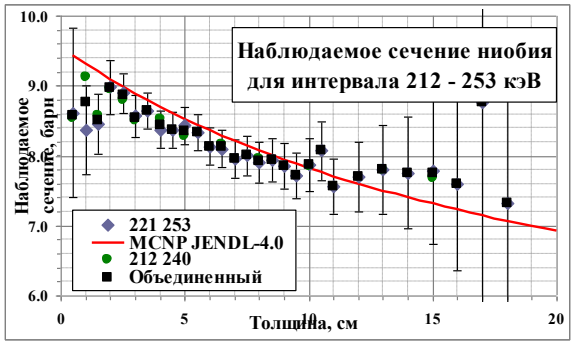

MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 124 - 164 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

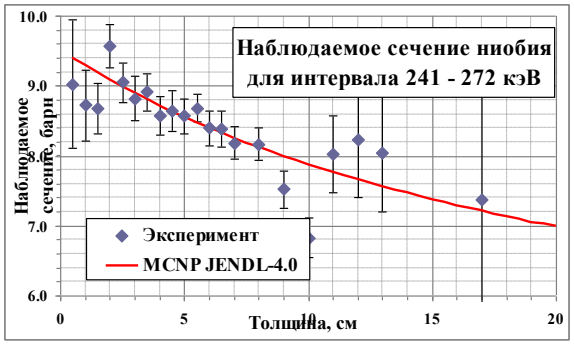

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 143 - 177 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

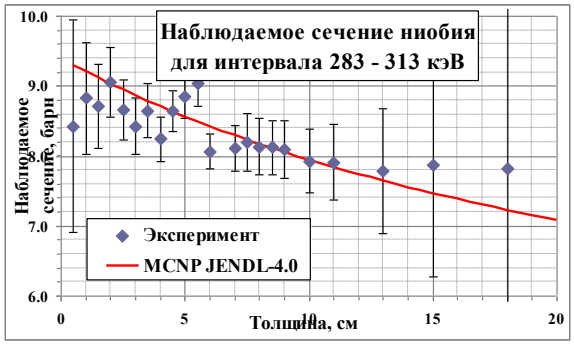

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 162 - 204 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

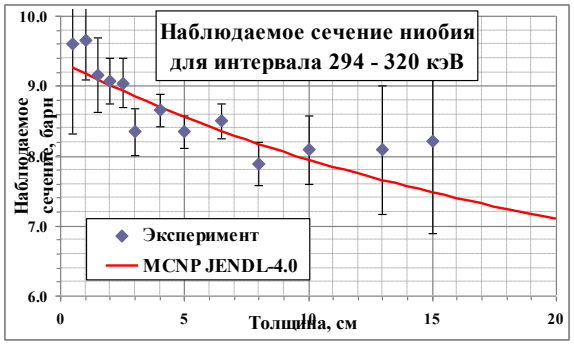

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 181 - 213 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

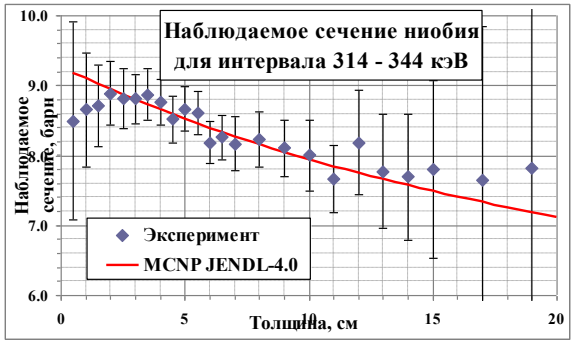

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 201 - 233 кэВ
MCNP JENDL-4.0
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

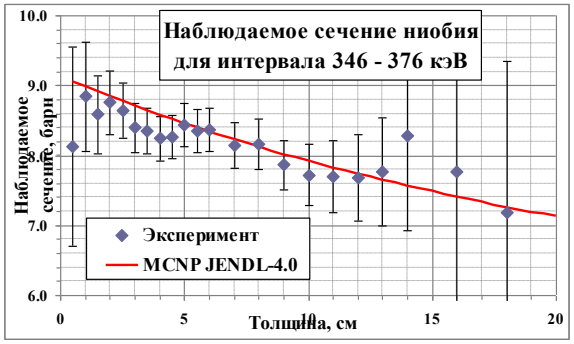

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 212 - 253 кэВ
221 253
MCNP JENDL-4.0
212 240
Объединенный
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

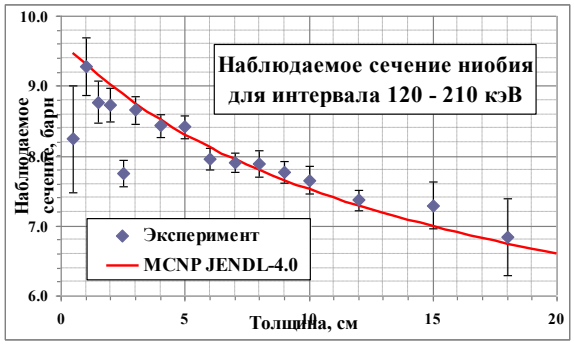

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 241 - 272 кэВ
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см

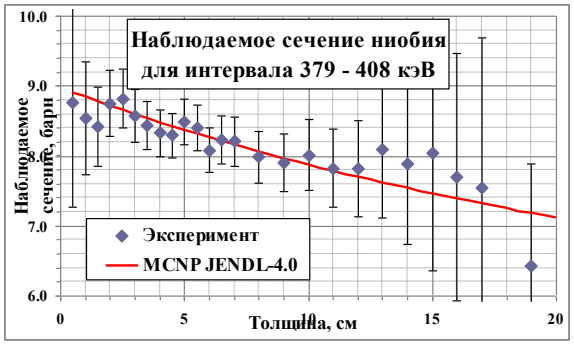

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 283 - 313 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

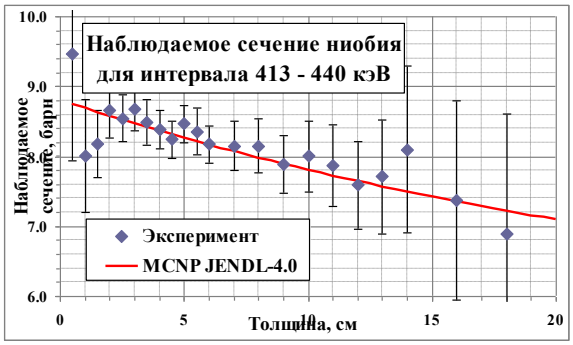

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 294 - 320 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

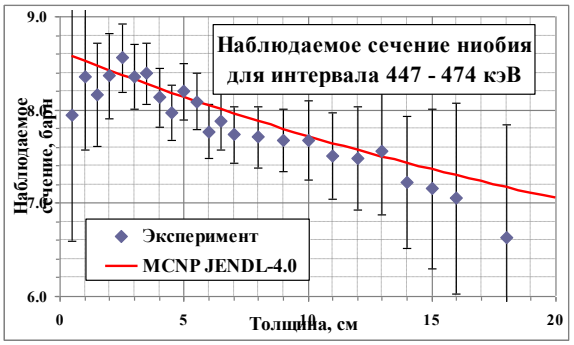

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 314 - 344 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

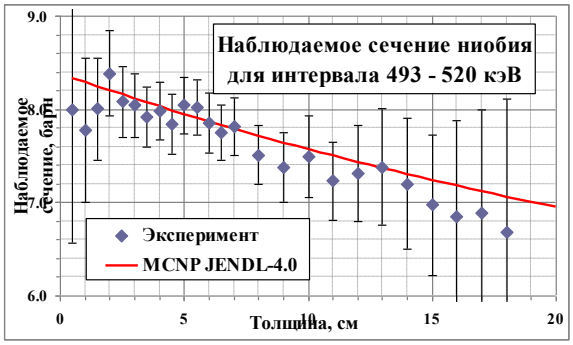

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 346 - 376 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

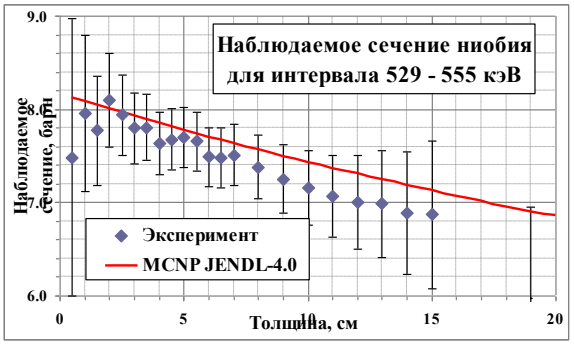

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 120 - 210 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

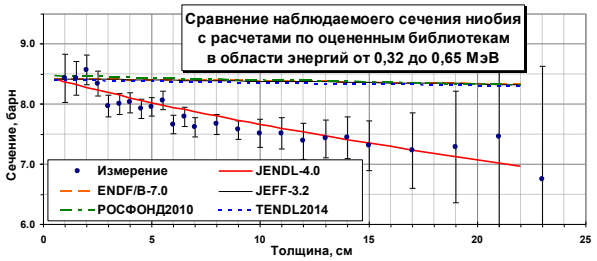

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 379 - 408 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

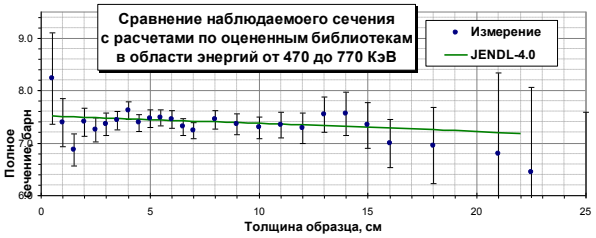

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 413 - 440 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

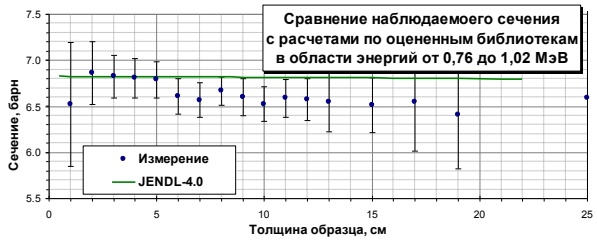

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 447 - 474 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

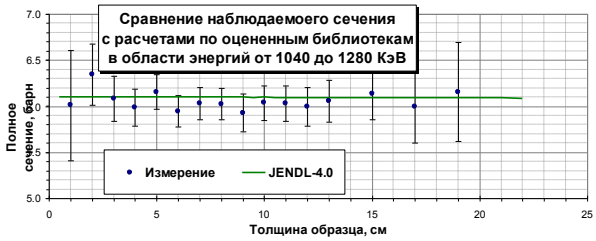

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 493 - 520 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

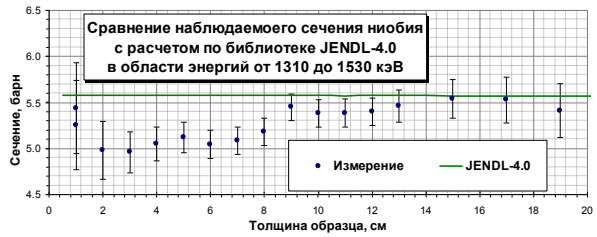

Наблюдаемое сечение ниобия для интервала 529 - 555 кэВ
Наблюдаемое сечение, барн
Толщина, см
Эксперимент
MCNP JENDL-4.0

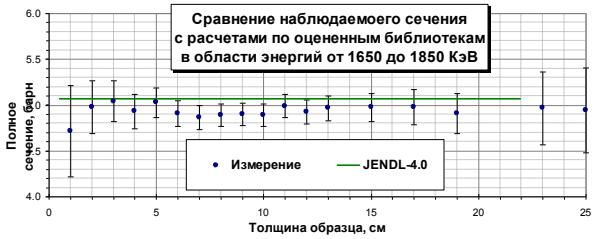

Сравнение наблюдаемоего сечения ниобия
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 0,32 до 0,65 МэВ
Сечение, барн
Толщина, см
Измерение
JENDL-4.0
ENDF/B-7.0
JEFF-3.2
РОСФОНД2010
TENDL2014

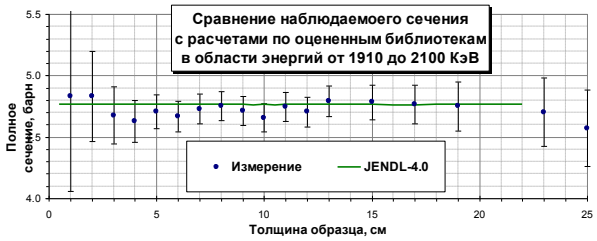

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 470 до 770 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см

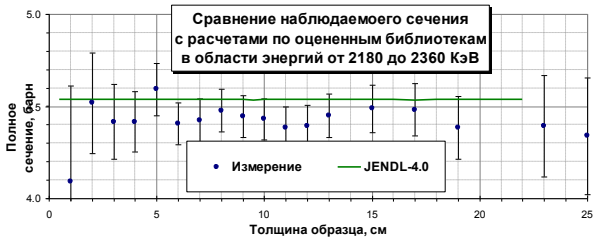

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 0,76 до 1,02 МэВ
Измерение
JENDL-4.0
Сечение, барн
Толщина образца, см

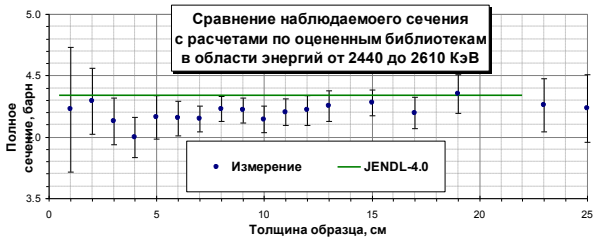

Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1040 до 1280 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см

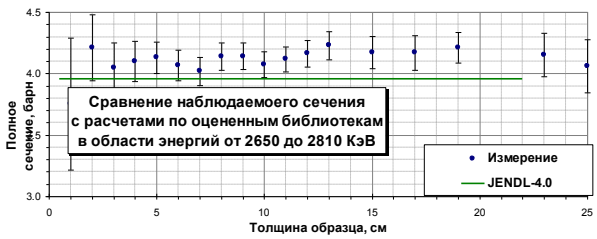

Сравнение наблюдаемоего сечения ниобия
с расчетом по библиотеке JENDL-4.0
в области энергий от 1310 до 1530 кэВ
Измерение
JENDL-4.0
Сечение, барн
Толщина образца, см


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1650 до 1850 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 1910 до 2100 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 2180 до 2360 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 2440 до 2610 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см


Сравнение наблюдаемоего сечения
с расчетами по оцененным библиотекам
в области энергий от 2650 до 2810 КэВ
Измерение
JENDL-4.0
Полное сечение, барн
Толщина образца, см

Приложение Д. Описание формата GNDL представления данных

Раздел	Описание
Идентификация файла	Холлеритовое имя файла
	Пользовательская информация
	Номер версии формата файла
Контрольные параметры файла	Количество групп
	Количество материалов
	Количество моментов
	Количество заказанных сечений
	Признак разрядности чисел сечений
	Количество нейтронных групп
	Максимальный номер группы, в которую есть переходы вверх. Если номер не определен, то печатается ноль
	Максимальный номер группы, в которую есть переходы вниз. Если номер не определен, то печатается ноль
	Признак умножения на 2L+1
	По материалам / по группам (для микросечений всегда по материалам)
	Длина символов комментария
	Массив комментария
Данные о сечениях и групповом разбиении	Массив из девяти чисел. Содержит порядковые номера сечений в списке, соответствующие принципиальным сечениям. Если сечение в файле отсутствует, проставляется ноль
	Имена сечений, массив длиной, равной количеству заказанных сечений
	Идентификационные номера сечений. Возможные значения: 1 – векторные сечения; 2 – сечения внутригруппового рассеяния; 3 – матрицы межгрупповых переходов
	Массив значений средних скоростей в группах. Если значения не определены, то проставляются нули
	Массив значений границ нейтронных групп. Если значения не определены, то проставляются нули
	Массив значений границ гамма-квантов. Если значения не определены, то проставляются нули
Групповые сечения	Групповые сечения в порядке их объявления в массиве с именами сечений

Для микросечений запись происходит следующим образом:

1) Векторные сечения записываются по циклам: группы, сечения и изотопы. То есть все изотопы для первого сечения, потом для второго сечения и так далее для первой группы. Далее также для второй и последующих групп для первого материала. После записи всех сечений и матриц для первого материала следует запись для второго материала и т.д.
2) Сечения внутригрупповых переходов записываются по циклам: группы, изотопы, моменты. Все моменты для первого изотопа, потом для второго и последующих изотопов для первой группы. Далее, для второй и последующих групп для первого

материала. Для второй зоны запись начинается после печати матриц для первого и векторных сечений для второго материалов.

3) Матрицы межгрупповых переходов записываются по циклам: тип рассеяния, изотопы. Для заданного изотопа с определенным типом рассеяния для первого материала вычисляется общее число ненулевых переходов по всем моментам, плюс четыре для каждого перехода и записывается перед матрицей. Далее идут два числа с информацией о том, из какой и, в какую группу произошел переход, затем дважды информация о количестве моментов для данного перехода и затем сами значения переходов. Все это повторяется для всех выбранных изотопов и всех выбранных типов рассеяния для первого материалов.

Для макросечений запись по материалам происходит следующим образом:

1) Векторные сечения записываются по циклам: материалы, сечения и группы. То есть все группы для первого сечения, потом для второго и так далее для первого материала. Далее также, для второго и последующих материалов.
2) Сечения внутригрупповых переходов записываются по циклам: материалы, группы и моменты. Все моменты для первой группы, потом для второй и последующих групп для первого материала. Далее также, для второго и последующих материалов.
3) Матрицы межгрупповых переходов записываются по циклам: материалы и тип рассеяния. Для определенного типа рассеяния для первого материала вычисляется общее число ненулевых переходов по всем моментам, плюс четыре для каждого перехода и записывается перед матрицей. Далее идут два числа с информацией о том, из какой и, в какую группу произошел переход, затем дважды информация о количестве моментов для данного перехода и затем сами значения переходов. Все это повторяется для всех выбранных типов рассеяния и всех материалов.

Для макросечений запись по группам происходит следующим образом:

1) Векторные сечения записываются по циклам: группы, сечения и материалы. То есть все материалы для первого сечения, потом для второго и так далее для первой группы. Далее также, для второй и последующих групп.
2) Сечения внутригрупповых переходов записываются по циклам: группы, материалы и моменты. Все моменты для первого материала, потом для второго и последующих материалов для первой группы. Далее также, для второй и последующих групп.
3) Матрицы межгрупповых переходов записываются по типам рассеяния. Для определенного типа рассеяния для всех материалов вычисляется общее число ненулевых переходов по всем моментам, плюс четыре для каждого перехода и записывается перед матрицей. Далее идут два числа с номерами групп, из какой и, в

какую произошел переход, затем массив с информацией о количестве моментов в каждом материале для данного перехода, потом идет сумма значений этих моментов и далее массив значений сечений переходов. Записываются все моменты для первого, второго и последующих материалов для данного перехода. Число значений сечений должно совпадать с суммой моментов для всех материалов для данного перехода. Все это повторяется для всех выбранных типов рассеяния.

Набор сечений может быть произвольный и выбор сечения для микро- и макроконстант осуществляется по отдельности. На данный момент программа CONSYST может вывести на печать около 50 имен сечений для макро- и микроконстант по заказу пользователя.

Приложение Е. Список сечений, записываемых в формат GNDL

Таблица

Имя макро-сечения	Имя микро-сечения	Блоки-ровка	Описание
SIT	ST	да	полное сечение, усредненное с весом спектра 0-й гармоники потока нейтронов
SIT1	ST1	да	полное сечение, усредненное с весом спектра 1-й гармоники потока нейтронов
SIC	SC	да	сечение исчезновения нейтрона без деления
SIF	SF	да	сечение (n, f)
SIGNG	SNG	нет	сечение (n, γ)
SIGHE	SHE	нет	сечение (n, α)
SIGHE3	SHE3	нет	сечение (n, he3)
SIGHE4	SHE4	нет	сечение (n, he4)
SIG2HE	S2HE	нет	сечение (n, 2α)
SIG3HE	S3HE	нет	сечение (n, 3α)
SIGP	SP	нет	сечение (n, p)
SIG2P	S2P	нет	сечение (n, 2p)
SIGD	SD	нет	сечение (n, d)
SIGH3	SH3	нет	сечение (n, t)
SIGNHE	SNHE	нет	сечение (n, nα)
SG2NHE	S2NHE	нет	сечение (n, 2nα)
SIG3HE	S3HE	нет	сечение (n, 3α)
SIGP	SP	нет	сечение (n, p)
SIG2P	S2P	нет	сечение (n, 2p)
SIGD	SD	нет	сечение (n, d)
SIGH3	SH3	нет	сечение (n, t)
SIGNHE	SNHE	нет	сечение (n, nα)
SG2NHE	S2NHE	нет	сечение (n, 2nα)
SG3NHE	S3NHE	нет	сечение (n, 3nα)
SIGNP	SNP	нет	сечение (n, np)
SIG2NP	S2NP	нет	сечение (n, 2np)
SIGND	SND	нет	сечение (n, nd)
SIGNT	SNT	нет	сечение (n, nt)
SIA	SA	да	сечение поглощения (SIC+SIF)
NSF	SNF	да	сечение произведения числа вторичных нейтронов на сечение деления
---	SNU	нет	число рождающихся нейтронов на одно деление
---	SNUP	нет	число мгновенных нейтронов на одно деление
---	SNUD	нет	число запаздывающих нейтронов на одно деление
D	---	да	коэффициент диффузии
STR	---	да	транспортное сечение
SIY	SSIY	да	сечение увода нейтронов из группы

Продолжение таблицы

Имя макро-сечения	Имя микро-сечения	Блоки-ровка	Описание
SIGS	SSIGS	да	сечение внутригруппового рассеяния, 0-й момент
SIGS1	SSIGS1	да	сечение внутригруппового рассеяния, 1-й момент
CHI	SHI		полный спектр нейтронов
CHIP	SHIP		спектр мгновенных нейтронов
CHID	SHID		спектр запаздывающих нейтронов
DMG	SDAM	нет	сечение повреждения
HN	SHEAT	да	сечение энерговыделения с переносом гамма-квантов
HNT	SHEATT	да	сечение энерговыделения с локальным поглощением гамма-квантов
N2N	SN2N	нет	сечение (n, 2n)
N3N	SN3N	нет	сечение (n, 3n)
N4N	SN4N	нет	сечение (n, 4n)
---	SXI	нет	средний логарифм потери энергии при упругом рассеянии
---	SMUEL	нет	средний косинус при упругом рассеянии
SIE	SE	да	сечение упругого рассеяния, 0-й момент
SIE1	SE1	да	сечение упругого рассеяния, 1-й момент
SIZ0	SSIZ0	да	сечение неупругого замедления, 0-й момент
SIZ1	SSIZ1	да	сечение неупругого замедления, 1-й момент
SIN	SSIN	да	сечение неупругого рассеяния, 0-й момент
SIN1	SSIN1	да	сечение неупругого рассеяния, 1-й момент
SELZ	SSELZ	да	сечение замедления в результате упругого рассеяния, 0-й момент
SELZ1	SSELZ1	да	сечение замедления в результате упругого рассеяния, 1-й момент
SIGPP	SSIGPP	да	по-моментное сечение внутригруппового рассеяния
SIGPQ	SSIGPQ	да	по-моментная матрица межгрупповых переходов
SNIN	SSNIN	да	по-моментная матрица неупругих переходов (включая n2n, n3n, n4n)
SNEL	SSNEL	да	по-моментная матрица упругих переходов
SPPIN	SSPPIN	да	по-моментное сечение внутригруппового неупругого рассеяния
SPPEL	SSPPEL	да	по-моментное сечение внутригруппового упругого рассеяния
SIGTR0	----	да	матрица межгрупповых переходов, 0-й момент
SIGTR1	----	да	матрица межгрупповых переходов, 1-й момент