

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ УСЛОВИЙ
ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ КОРПУСА ВВЭР-1000**

**А.В. Грищенко, В.Н. Буканов, Е.Г. Васильева,
В.Л. Демехин, О.В. Неделин**

Представлены недостатки дозиметрической части реализуемой в настоящее время на АЭС Украины программы образцов-свидетелей (ОС). Описаны структура и принципы работы пакета программ MCSS, предназначенного для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на ОС в реакторах типа ВВЭР-1000. Приведены результаты сравнения экспериментальных данных с данными, полученными расчетным путем.

Введение

Согласно действующей в Украине применительно к установкам ВВЭР-1000 программе ОС шесть комплектов контейнерных сборок (КС) с образцами располагаются на выгородке над активной зоной (АКЗ) реактора. Для определения флюенсов быстрых нейтронов, воздействовавших на ОС, на штатные места в четырех комплектах КС устанавливаются штатные наборы индикаторов нейтронного потока (ИНП). В двух комплектах ИНП отсутствуют. В зависимости от сроков облучения ОС в реакторе штатные наборы ИНП включают активационные детекторы из железа, ниобия и меди.

Комплектация штатных наборов ИНП определялась временем облучения образцов, предусмотренным программой ОС. Однако уже первые исследования извлеченных из реакторов образцов показали существенные недостатки программы ОС в целом. С целью устранения обнаруженных недостатков было принято решение на действующих блоках АЭС, где не проводились выгрузки ОС, установить срок первой выгрузки через пять лет от начала эксплуатации реактора. Это практически исключило возможность использования реакции $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ для определения флюенсов быстрых нейтронов на ОС из-за относительно короткого периода полураспада продукта этой реакции. Кроме того, все детекторы из ниобия, которые сопровождали облучение ОС комплектов 1Л и 4Л в реакторах блоков № 1 ХАЭС и № 3 ЮУАЭС (первые выгрузки ОС на этих блоках), разрушились. Это привело к тому, что для определения флюенса нейтронов с $E_n > 0.5$ МэВ на ОС могла быть использована только реакция $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$.

Таким образом, дозиметрическое обеспечение программы ОС не позволяет получить достоверную информацию об условиях облучения ОС. Кроме того, ОС двух комплектов облучаются в реакторе без ИНП. Следовательно, функционалы нейтронного потока в местах расположения ОС в реакторе ВВЭР-1000 могут быть определены только с помощью специальной расчетной методики. Такая методика, учитывающая экспериментальные данные, которые могут быть получены после выгрузки КС из реактора, разработана в отделе проблем дозиметрии ядерных реакторов НЦ "ИЯИ" НАН Украины.

Основу методики составляет пакет программ MCSS, предназначенный для расчетного определения функционалов нейтронного потока в местах расположения ОС в реакторе ВВЭР-1000.

1. Структура и краткое описание пакета программ MCSS

Структура пакета представлена на рис. 1. Главной составляющей пакета является транспортная программа Trans, рассчитывающая методом Монте-Карло групповые плотности потока нейтронов (ППН) в местах расположения ОС, используя при этом очень подробную расчетную область (РО). Trans включает в себя два блока подпрограмм – геометрический и взаимодействия. Каждый из них имеет достаточно сложную структуру,

накладывающую определенные требования на принципы организации работы других программ пакета, выполняющих вспомогательные функции. К этим программам относятся:

D3mod3 и SyconMom, предназначенные соответственно для подготовки данных об источниках нейтронов и данных о взаимодействии нейтронов с материалами РО;

FluxAct, предназначенная для обработки результатов транспортного расчета.

Передача данных между программами пакета осуществляется путем организации буферных файлов.

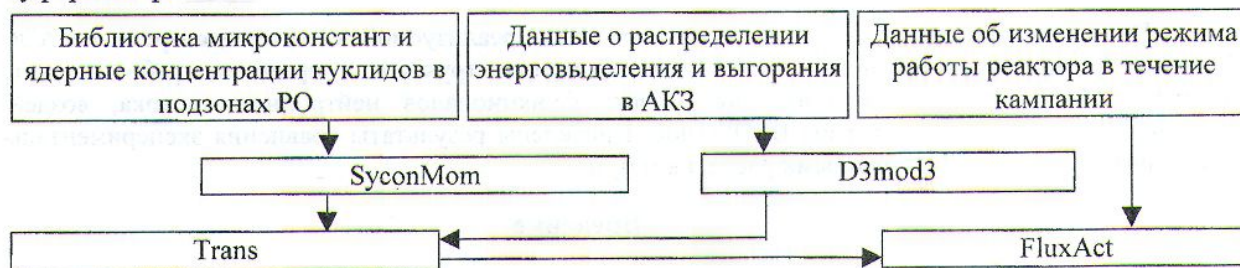


Рис. 1. Общая блок-схема пакета MCSS.

1.1 Основные принципы работы транспортной программы

Геометрический блок осуществляет моделирование траекторий нейтронов в РО. РО, приведенная на рис. 2, имитирует 60-градусный сектор симметрии реактора типа ВВЭР-1000. На основе проектной документации подробно и детально учтены все особенности конструкции реакторной установки, влияющие на результаты расчетов. В частности, в модели КС учитывались практически все детали, размеры которых превышали несколько миллиметров. Также учитывалось отсутствие в некоторых КС центральных контейнеров с ОС. Гомогенизация использовалась только при моделировании узла, отвечающего за фиксацию КС в трубе, что, исходя из места расположения этого узла, не может оказать заметного влияния на конечные результаты.

Поскольку часть комплектов состоит из КС с двумя рядами контейнеров с ОС, а часть – из КС с одним рядом контейнеров, нами были смоделированы две РО. Однако с точки зрения организации работы геометрического блока эти РО идентичны, вследствие чего рассматривается только одна РО.

Из рис. 2 очевидно, насколько сложной является задача программной реализации используемой РО. Разработанное нами решение указанной задачи заключается в следующем. РО разделяется на зоны, некоторые из которых в свою очередь разделяются на подзоны. При этом материал внутри подзон (зон) считается однородным. Такой подход позволил свести задачу к моделированию относительно простых зон отдельными наборами подпрограмм и организации связи между ними.

Принцип взаимодействия между подпрограммами геометрического блока продемонстрируем на примере. Допустим, что имеется РО, состоящая из четырех зон, как это показано на рис. 3, а. Тогда общая блок-схема геометрического блока примет вид, приведенный на рис. 3, б. Она состоит из подпрограмм двух видов, названных нами "области" и "проверки". В задачу первых входит отслеживание траекторий нейтронов в соответствующих им зонах. Вторые являются обслуживающими подпрограммами, и их основная функция заключается в определении самого факта и координат точки выхода нейтрона из данной зоны или подзоны.

Для осуществления корректной программной реализации данного подхода нами использовался следующий прием. В каждую "область" был добавлен массив – "массив-корзина" или просто "корзина", предназначенный для сохранения параметров траекторий всех нейтронов, вошедших в соответствующую зону. Благодаря этому появилась возможность изменить порядок моделирования последовательности событий при отслеживании пути каждого нейтрона. Как показано на рис. 3, б, очередность вызова

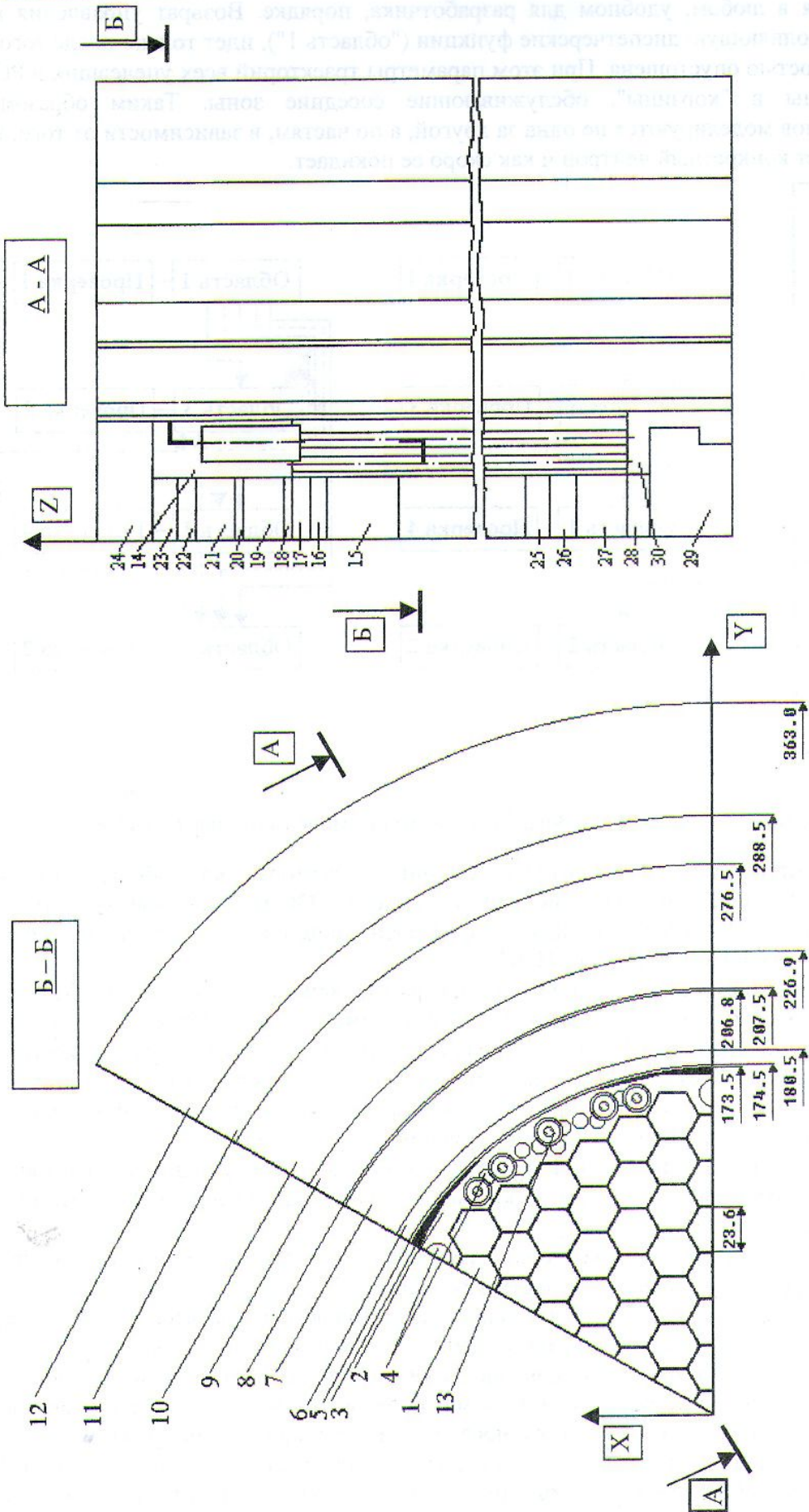


Рис. 2. Схема РО: 1 – ТВС в АКЗ реактора; 2 – выгорodka; 3 – кольцевая проточка; 4 – цилиндрические каналы в выгорodka; 5 – водяной зазор между выгорodka и шахтой реактора; 6 – шахта реактора; 7 – опускной участок; 8 – наплавка на корпусе; 9 – КР; 10 – воздушный зазор; 11 – тепловая изоляция цилиндрической части КР; 12 – биологическая защита; 13 – КС с ОС; 14 – водяной объем; 15 – компенсационный объем; 16 – наконечники ТВЭлов; 17 – водяной объем; 18 – плита дистанционирующая; 19 – кожух ТВС; 20 – плита нажимного блока ТВС; 21 – нажимной блок ТВС; 22 – плита нажимного блока ТВС; 23 – головки ТВС; 24 – нижняя плита БЗТ; 25 – 28 – хвостовая часть ТВС; 29 – блок опорных труб; 30 – граненый пояс выгорodka. Размеры на рисунке даны в сантиметрах.

"областей" задается в любом, удобном для разработчика, порядке. Возврат управления в подпрограмму, выполняющую диспетчерские функции ("область 1"), идет только после того, как "корзина" полностью опустошена. При этом параметры траекторий всех уцелевших в РО нейтронов записаны в "корзины", обслуживающие соседние зоны. Таким образом, траектории нейтронов моделируются не одна за другой, а по частям, в зависимости от того, в какую зону попадает конкретный нейтрон и как скоро ее покидает.

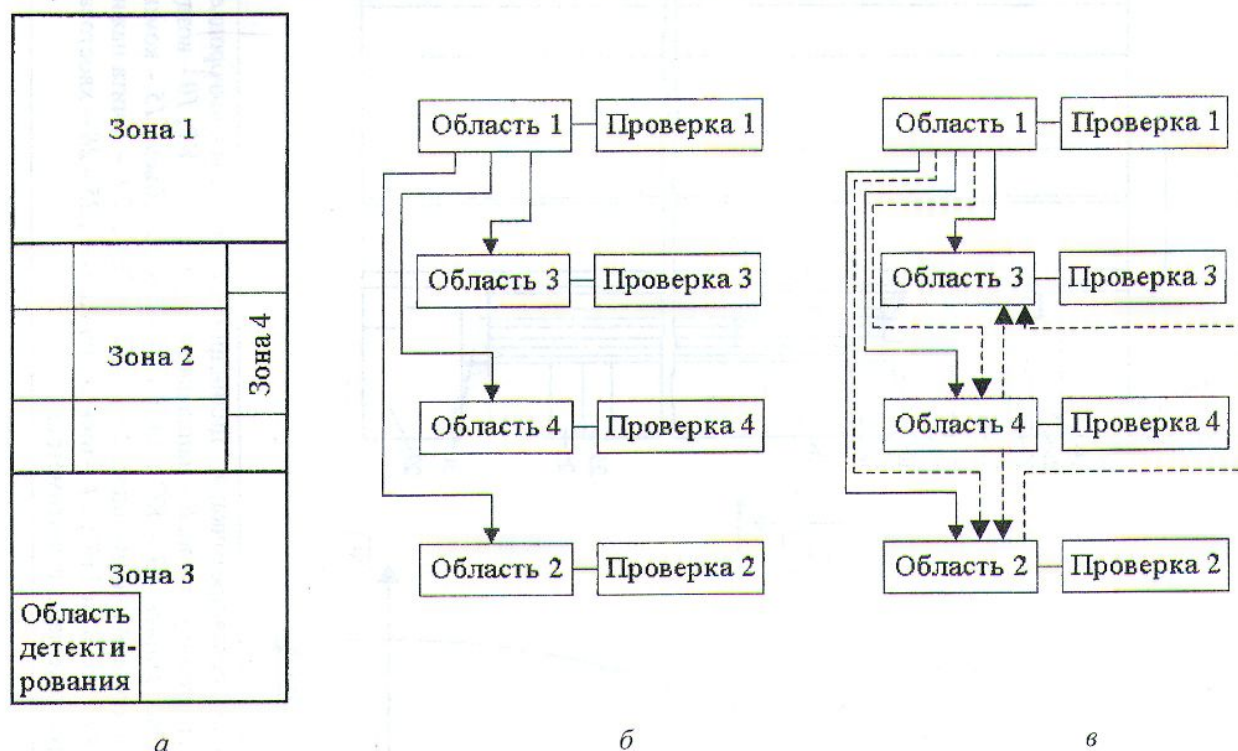


Рис. 3. РО, состоящая из четырех зон. Зона 2 состоит из шести подзон, зона 4 – из трех.

Регистрация нейтронов производится в объемных детекторах, каждый из которых представляет собой 1/3 часть по высоте модели контейнера с ОС (однородный цилиндр с диаметром 2.9 и высотой 7.2 см). Такой подход обусловлен, прежде всего, местоположением V-надреза образцов типа Шарпи и ампул с ИНП.

Важной характеристикой транспортных программ, использующих метод Монте-Карло, является количество расчетного времени, необходимого для получения достаточно малых статистических погрешностей определяемых величин. Это, главным образом, зависит от коэффициента ослабления излучения и геометрических параметров расчетных детекторов. В данном случае приемлемые затраты времени достигаются путем использования целого комплекса неаналоговых методов моделирования траекторий нейтронов.

В разработанной нами транспортной программе применены следующие неаналоговые методы. Так, еще при розыгрыше старта нейтрона используется расслоение по ТВС, твэлам, высотной координате и энергетической группе.

При имитации взаимодействия нейтрона с веществом розыгрыш реакции поглощения заменяется умножением его веса на вероятность выживания.

Наиболее важная часть комплекса неаналоговых методов основывается на подходах, изложенных в работах [1, 2]. Согласно функции ценности для каждой подзоны (зоны) и для каждой энергетической группы нейтронов вводятся значения принудительных весов, которые определяют границы весовых окон. Сам метод весовых окон используется как при входе нейтрона в данную подзону (зону), так и после взаимодействия с ее материалом.

Кроме того, разработан и реализован оригинальный неаналоговый метод, названный нами "расщепление по направлениям". Суть этого метода заключается в том, что нейтроны,

которые стартовали при рождении или рассеянии в направлении одной из КС, расщепляются на две частицы. Пробег одной из них разыгрывается в диапазоне от места старта до границы области детектирования, а другой – от границы до бесконечности. Веса между ними распределяются в соответствии с вероятностью достижения этой границы.

Использование расщепления требует организации очередей частиц, траектории которых необходимо смоделировать [3]. Это предполагает, с одной стороны, необходимость резервирования больших дополнительных массивов памяти, а с другой – принятие мер против их переполнения. Очевидно, что описанные выше "корзины" также можно использовать и для очередей. Однако в этом случае необходимо принять меры против их переполнения.

Защита от переполнения проводится следующим образом. Если в процессе работы данной "области" при очередной записи параметров траектории нейтрона в "корзину", которая обслуживает соседнюю зону, оказывается, что достаточно большая ее часть уже заполнена, то происходит вызов соответствующей "области" и эта "корзина" опустошается. После происходит возврат управления и доопустошение "корзины" данной "области" с учетом нейтронов, вернувшихся из соседних зон. При этом необходимо следить за тем, чтобы такие дополнительные вызовы не могли образовывать циклов в пределах программы. С точки зрения максимальной эффективности возможность дополнительных вызовов предусматривается в направлениях КС. В рассматриваемом примере структура геометрического блока примет вид, приведенный на рис. 3, в.

Дополнительной защитой от переполнения является то, что вылет очередного нейтрона из источника происходит только после того, как все "корзины" полностью опустошены.

Поскольку в течение кампании реактора изменяется изотопный состав топлива, то соответственно меняется распределение поля энерговыделения в объеме АКЗ. Следовательно, изменяющимися во времени являются макроконстанты взаимодействия нейтронов и распределение интенсивности источников в объеме АКЗ. При этом, как показывают проведенные нами исследования, изменением макроконстант в АКЗ при транспортном расчете можно пренебречь, что совпадает с рекомендациями, приведенными в конструкторской документации. В то же время неучет перераспределения источников нейтронов может достаточно сильно отразиться на результатах расчета. Поэтому, чтобы не проводить нескольких расчетов для одной и той же кампании, нами была реализована следующая процедура.

Нейтрону изначально присваивается вес, равный единице. Регистрация групповых ПИН в детекторах проводится отдельно для каждого момента кампании путем умножения его веса на ряд коэффициентов, соответствующих интенсивности и спектру источника данного нейтрона в каждый из рассматриваемых моментов. Отметим также, что с помощью этой процедуры проводятся одновременные расчеты нескольких кампаний.

Блок взаимодействия имитирует взаимодействие нейтронов с материалами подзон (зон) РО. На основании данных о принадлежности нейтрона энергетической группе определяется тип взаимодействия и новая энергетическая группа, в которую попадает нейтрон после взаимодействия, а также новое направление полета нейтрона.

Для работы этого блока макросечения отдельных типов взаимодействий подготавливаются в вероятностном виде. В силу очевидных причин взаимодействие с водородом выделено в отдельный тип. Также в вероятностном виде подготавливаются и данные о переходах нейтрона из одной группы в другую при каждом типе взаимодействия.

При имитации упругого взаимодействия индикатриса рассеяния аппроксимируется набором нескольких дельта-функций с различными вероятностями. Такой подход позволяет с необходимой степенью точности сохранить определенное число моментов разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра. Как известно, в большинстве библиотек микроконстант упругое рассеяние описывается именно в таком виде.

Анизотропия неупругого взаимодействия в рассматриваемом блоке аппроксимируется суперпозицией изотропного и дельта-рассеяния. Имеется в виду, что с вероятностью $1 - |\mu_{cp}|$ (μ_{cp} – средний косинус угла неупругого рассеяния из старой группы в новую) рассеяние считается сферически изотропным, а с вероятностью $|\mu_{cp}|$ рассеяние происходит строго вперед (при $\mu_{cp} > 0$) или строго назад (при $\mu_{cp} < 0$).

Естественно, что в неупругое взаимодействие включаются и реакции типа (n, p) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ и т.п. Их учет производится согласно рекомендациям работы [4].

1.2. Основные принципы работы программ подготовки данных

Программа D3mod3 предназначена для подготовки данных об источниках нейтронов, используя информацию о распределении энерговыделения и выгорания по объему АКЗ. Эта информация может быть получена с помощью как штатных программ сопровождения эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (АЛББОМ или БИПР), так и любых других, рассчитывающих необходимые характеристики АКЗ.

В основе алгоритма работы этого модуля лежит формула определения плотности нейтронов деления в i -й области АКЗ в j -й временной момент кампании

$$S_{ij} = \frac{\nu_{ij}}{E_{ij}} q_{ij},$$

где ν_{ij} – число вторичных нейтронов на один поглощенный с делением; E_{ij} – эффективное энерговыделение на 1 акт деления; q_{ij} – энерговыделение в i -й области АКЗ. При этом ν_{ij} и E_{ij} являются функциями от сорта и глубины выгорания используемого топлива.

В результате работы D3mod3 создается ряд файлов, количество которых равно числу ТВС, учитываемых при транспортном расчете. Отметим, что в эти файлы заносятся не только данные о количестве нейтронов деления, но и координаты центров твэлов. Это дает возможность с помощью специального блока визуализации проверять правильность задания источников. Для этого диапазон величин энерговыделений твэлов в каждом высотном слое АКЗ (10 условных слоев по высоте) для каждого рассматриваемого момента кампании разделяется на 13 одинаковых поддиапазонов. В зависимости от того, в какой из них попадает величина энерговыделения данного участка твэла, в изображении РО на экране дисплея он окрашивается определенным цветом. При этом предусмотрена возможность в любом, удобном для пользователя, порядке выводить на экран такие цветовые карты во всех слоях для всех временных моментов.

Программа SysonMom предназначена для подготовки данных о взаимодействии нейтронов с веществом каждой подзоны (зоны) РО на основе ядерных концентраций содержащихся в них нуклидов и библиотеки микроконстант. Многогрупповая библиотека микроконстант для транспортных расчетов разработана в секторе ядерных данных НИЦ "ИЯИ" НАН Украины на основе файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VI, JENDL-3.2, JEF-2. Энергетический диапазон от 0.1109 до 18.221 МэВ разбит на 51 группу, каждая из которых имеет равную ширину в шкале логарифма. Эта библиотека включает нуклиды, необходимые для описания материального состава РО.

1.3. Программа обработки результатов транспортного расчета

Результатом транспортного расчета являются выходные файлы, содержащие полученные в зонах регистрации групповые ППН на фиксированные моменты кампаний реактора, в течение которых происходит облучение ОС. Для получения по этим данным необходимых функционалов нейтронного потока используется программа FluxAct. Она рассчитывает дифференциальные и интегральные спектры, интегральные ППН и флюенсы нейтронов выше заданной энергии, спектральные индексы. При необходимости определяются величины смещений на атом, а также скорости реакций активации $^{93}\text{Nb}(n,n)^{93m}\text{Nb}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ и удельные активности их продуктов на момент

конца облучения. При этом учитывается изменение режима работы реактора в течение кампании согласно методике, изложенной в работе [5].

2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Важным элементом проверки правильности работы транспортной программы является сравнение расчетных данных с полученными экспериментально. Однако в рассматриваемом случае объем экспериментальных данных крайне ограничен. Более того, их сравнительный анализ показывает, что расположение ампул с ИНП относительно АКЗ не определяется однозначно. К такому же выводу приводит и анализ конструкторской документации.

Поэтому для сравнения нами были использованы средние по ряду сборки значения удельных активностей продуктов реакций активации $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ и $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$. Для примера в таблице приведены результаты такого сравнения для комплектов 1Л и 4Л, располагавшихся в реакторах блоков № 1 ХАЭС и № 3 ЮУАЭС. Видно, что данные, полученные в результате расчетов и активационных измерений, хорошо согласуются между собой. Это дает основание утверждать, что рассчитанные характеристики поля нейтронов в местах расположения ОС в реакторе достаточно близки к реальным.

Пакет программ MCSS был использован для определения усредненных за время облучения ППН с $E_n > 0.5$ МэВ и $E_n > 3.0$ МэВ, спектральных индексов, доз смещения для

Отношения средних по КС активностей ИНП, полученных по результатам расчетов и измерений

№ сборки	Комплект 1Л								Комплект 4Л	
	ИНП из железа				ИНП из меди				ИНП из меди	
	Нижний ряд		Верхний ряд		Нижний ряд		Верхний ряд		Верхний ряд	
	ХАЭС	ЮУАЭС	ХАЭС	ЮУАЭС	ХАЭС	ЮУАЭС	ХАЭС	ЮУАЭС	ХАЭС	ЮУАЭС
1	1.01	0.93	1.01	0.97	0.98	0.93	0.99	0.96	0.95	0.95
2	1.00	0.95	1.07	1.09	0.95	0.93	0.99	1.13	1.03	1.05
3	0.96	0.90	1.06	0.98	0.87	0.83	0.98	0.99	1.00	1.02
4	1.06	0.93	1.10	1.01	1.00	0.99	1.05	1.01	0.94	0.93
5									0.91	0.96
Среднее	1.00				0.97				0.97	
Среднее квадратичное отклонение	0.06				0.07				0.05	

нейтронов с $E_n > 0.5$ МэВ, флюенсов нейтронов с $E_n > 0.5$ МэВ на ОС блоков № 1 ХАЭС (1-й и 2-й сроки освидетельствования металла КР) и № 3 ЮУАЭС (1-й срок освидетельствования металла КР). Для примера на рис. 4 показано относительное распределение флюенсов

быстрых нейтронов на средние части ОС по периметру КС 1Л1 (ОС типа Шарпи основного металла КР) блока № 1 ХАЭС. Видно, что по периметру КС условия облучения ОС существенно различны. При этом отличия в дозах смещения почти такие же, как и во флюенсах, а в спектральных индексах – меньше.

Аналогичная картина наблюдается для остальных КС блоков № 1 ХАЭС и № 3 ЮУАЭС.

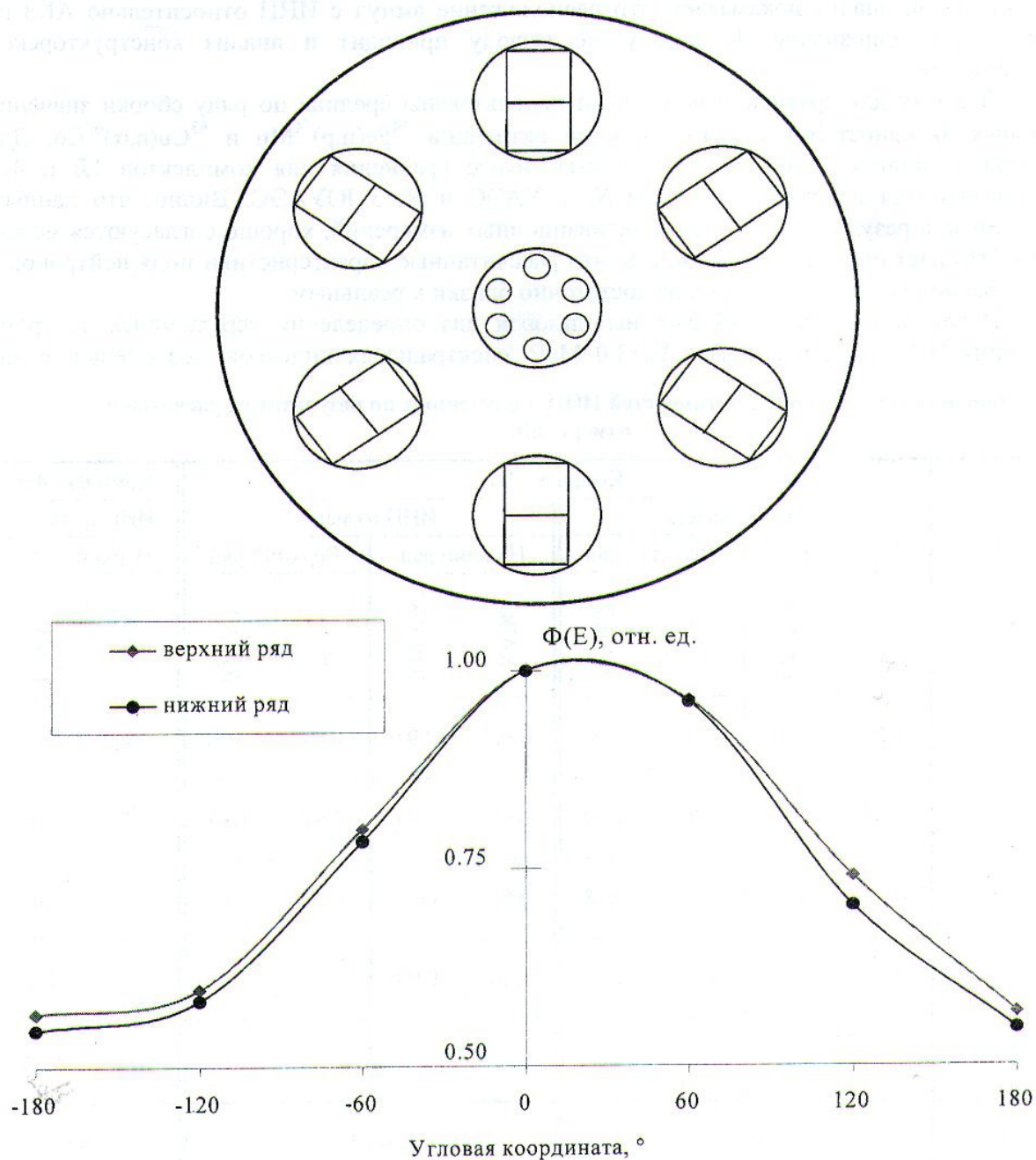


Рис.4. Относительное распределение флюенсов быстрых нейтронов по периметру КС 1Л1 с ОС основного металла КР блока № 1 ХАЭС.

Выводы

Дозиметрическое обеспечение программы ОС, реализуемой в настоящее время на АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000, не позволяет достоверно установить параметры условий облучения ОС. Эти параметры могут быть определены только расчетным путем с учетом ограниченных экспериментальных данных, получаемых после выгрузки контейнеров с ОС из реактора.

Разработанная в отделе проблем дозиметрии ядерных реакторов НЦ "ИЯИ" НАН Украины расчетная методика дает возможность с достаточной степенью достоверности определить ряд параметров условий облучения ОС в реакторе ВВЭР-1000, таких как плотность потока, спектр и флюенс быстрых нейтронов.

Анализ расчетных и экспериментальных данных, полученных после выгрузки ОС первого и второго сроков освидетельствования металла КР блока № 1 ХАЭС и первого срока освидетельствования металла КР блока № 3 ЮУАЭС, показывает, что условия облучения ОС даже в одной КС существенно различны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barz H.-U., Boehmer B., Konheiser J., Stephan I. Determination of Pressure Vessel Neutron Fluence Spectra for a Low Leakage Rovno-3 Reactor Core Using Three Dimensional Monte Carlo Neutron Transport Calculation and Ex-vessel Neutron Activation Data // Proc. 9th Intern. Symp. on Reactor Dosimetry, Prague, September 2 – 6, 1996. – New Jersey: World Scientific, 1998. – P. 58.
2. Коробейников В.В., Алешечкин В.Н. Анализ некоторых алгоритмов расщепления и рулетки в расчетах защиты методом Монте-Карло // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1987. – Вып. 8. – С. 39.
3. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В. Использование очередей в архитектуре программ расчета переноса излучения методом Монте-Карло // Расчетно-экспериментальное обеспечение исследований по безопасной ядерной энергетике и ее топливному циклу: Тез. докл. VIII сем. по проблемам физики реакторов, Москва, 5 – 9 сент., 1993. – М.: МИФИ, 1993. – Т. 1. – С. 30.
4. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучения // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. – 1996. – Вып. 1. – С. 59.
5. Демехин В.Л., Буканов В.Н., Гаврилюк В.И., Алхадж-Али С. Расчет поправки на распад при облучении активационных детекторов на корпусе реактора ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 1998. Т. 85, вып. 4. – С. 334.

РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕЯКИХ ПАРАМЕТРІВ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ КОРПУСУ ВВЕР-1000

О.В. Гриценко, В.М. Буканов, О.Г. Васильева, В.Л. Демьохин, О.В. Неделин

Подано недоліки дозиметричної частини реалізованої в даний час на АЕС України програми зразків-свідків (ЗС). Описано структуру та принципи роботи пакета програм MCSS, призначеного для розрахунку функціоналів нейтронного потоку, що впливає на ЗС у реакторах типу ВВЕР-1000. Наведено результати порівняння експериментальних даних з даними, отриманими розрахунковим шляхом.

CALCULATIONAL DETERMINATION OF SOME IRRADIATION CONDITION PARAMETERS OF SURVEILLANCE SPECIMENS OF WWER-1000 REACTOR PRESSURE VESSEL

O.V. Grytsenko, V.N. Bukanov, O.G. Vasylyeva, V.L. Dyemokhin, O.V. Nedyelin

The shortcomings of dosimetry part of surveillance specimen (SS) program that is realizing on Ukrainian NPPs at present are presented. Structure and functioning principles of the program package MCSS, intended for calculation of functionals of neutron flux which influence on SS in WWER-1000 reactor are described. The results of comparison of the experimental data with the data obtained by the calculational way are given.