

Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло

**Артемьева Е.В., Баканов В.В., Донской Е.Н., Житник А.К.,
Залялов А.Н., Иванов Н.В., Огнев С.П., Ронжин А.Б.,
Рослов В.И., Семенова Т.В.**

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИЭФ,
Проспект Мира, 37, Саров, Нижегородская область, Россия.

Рассматриваются подходы, используемые во ВНИИЭФ к моделированию переноса нейтронов и гамма-квантов на стандартных (с поверхностным описанием границ областей) и сеточных геометриях. Дается краткая информация о программе TDMCC, предназначенной для решения динамических задач работы водных реакторов.

Введение

Метод Монте-Карло применяется для решения задач переноса нейтронов и гамма-квантов в РФЯЦ – ВНИИЭФ около пятидесяти лет. Первые расчеты этим методом были выполнены Н.А. Дмитриевым и Ю.Н. Кондюриным в 1958 году. Это были расчеты временной постоянной размножения нейтронов для сферически симметричных систем. Созданные в дальнейшем программы С-2 (1960 г.), С-20 (1962 г.), С-30 (1964 г.), С-60 (1969 г.), С-90 (1989 г.) и С-95 (1995 г.) последовательно расширяли как классы решаемых задач, так и точность описания процессов моделирования. Существующие в настоящее время программы позволяют решать задачи в сложных трехмерных геометриях с использованием последних версий констант взаимодействия частиц с веществом. В программы введены алгоритмы, позволяющие существенно повысить эффективность расчетов. В настоящем сообщении будет рассмотрен ряд вопросов, связанных с работами, выполненными во ВНИИЭФ в последние годы.

Программа С-95

Программа С-95 – последняя версия программы для решения уравнений переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло (Кочубей и др., 2000). Она предназначена для решения задач совместного переноса нейтронов и гамма-квантов в трехмерных системах с использованием как спектральных, так и групповых констант. С-95 – многоцелевая программа. Она может быть использована для решения задач защиты, расчета критических параметров ($K_{эфф}$ и временной постоянной размножения нейтронов), задач ядерной безопасности, а также реакторных задач. Еще одним из применений программы С-95 является решение задач на сеточных геометриях.

Исходные данные задачи (геометрия, составы областей, источники частиц, требующиеся результаты и используемые методы повышения эффективности расчета)

задаются в текстовом виде с использованием синтаксически ориентированного входного языка, позволяющего достаточно просто описывать эту информацию.

Геометрия

Основным объектом в задании геометрических данных является геометрический блок. Он представляет собой совокупность областей и поверхностей определенного типа. Различаются блоки следующих типов:

- плоский (поверхности – набор параллельных плоскостей, области – слои между ними),
- сферический (поверхности – концентрические сферы, области – сферические слои между ними),
- осесимметричный (поверхности и области – поверхности вращения и тела вращения вокруг некоторой оси соответственно),
- трехмерный (границами областей блока могут быть произвольные поверхности второго порядка).

В задаче может быть описано произвольное количество блоков. Они рассматриваются как независимые “строительные” элементы, которые следует так разместить друг относительно друга, чтобы составить требуемую геометрию. В качестве исходного вместилища рассматривается мировое пространство (пустота), обладающее лишь системой координат (его можно рассматривать как всегда существующий блок 0-го уровня вложенности). В нем размещаются блоки (1-й уровень вложенности), которые, в свою очередь, могут содержать в себе другие блоки (2-й уровень вложенности), и так далее. Глубина вложений блоков, вообще говоря, не ограничена.

Геометрия, составленная из вложенных друг в друга блоков, напоминает “матрешку”. Отличие состоит лишь в том, что в блок можно вкладывать не один, а несколько других (не обязательно разных) блоков. Важно лишь, чтобы размещенные блоки не пересекались между собой и не выходили за пределы блока-вместилища. К сожалению, в программе не заложена возможность проверить, соблюдается ли это требование, поэтому приходится особенно тщательно задавать информацию о размещении блоков.

Существенную помощь в тестировании геометрии оказывает графическая программа вывода. Она позволяет получать рисунки сечений, как отдельных блоков, так и всей заданной геометрии произвольными плоскостями. Поскольку в этой программе для построения сечений используется алгоритм, сходный с алгоритмом, применяемым в счете для моделирования траекторий частиц, то успешное получение рисунков характерных сечений дает довольно высокую степень уверенности в правильности геометрии. Кроме того, выведенные на принтер рисунки могут использоваться в качестве иллюстраций к задаче.

Составы и константы

Задание начальных данных для областей, входящих в геометрические блоки, осуществляется описанием их изотопных составов, плотностей и начальных температур или энергий. Задание изотопных составов может быть сделано одним из следующих способов:

- заданием ядерных концентраций,

- заданием плотности и молекулярного состава веществ,
- заданием плотности и весовых составов веществ.

Программа предоставляет возможность использования различных систем констант, описывающих взаимодействие частиц с веществом.

Для переноса нейтронов возможно использование следующих библиотек: БАС-78, разработанной во ВНИИТФ (Vasilyev et al, 1979), ENDL-82, ENDF/B-V, ENDF/B-VI и JENDL-3.

Для моделирования процессов гамма-образования используются библиотеки: NJMC, которая основана на разработанных во ВНИИЭФ данных по сечениям гамма-образования для быстрых нейтронов и на библиотеках ENDL-82 и JENDL-3 для нейтронов с низкими энергиями, ENDL-82, ENDF/B-V, ENDF/B-VI и JENDL-3.

Перенос гамма-квантов осуществляется с использованием библиотеки, сформированной по данным работ (Storm and Israel, 1970) и (Veigele, 1973). и библиотеки EPDL92 (Cullen et al., 1989).

Источник

В задаче допускается задание произвольного числа элементарных источников. Элементарный источник (ниже просто источник) может испускать или нейтроны, или гамма-кванты. Кроме того, для каждого источника требуется указать вес, долю и задать пространственное, энергетическое, угловое и временное распределение испускаемых частиц.

Пространственное распределение характеризует конфигурацию источника и его расположение в геометрии системы, и оно определяется типом геометрии источника. Допустимы следующие типы геометрий источника: сфера и сферические слои; цилиндр и цилиндрические слои; брус; точка; диск; прямоугольник; трапеция; произвольная поверхность или область системы.

Энергетическое распределение устанавливает спектр моделируемых частиц источника, который может быть: моноэнергетичным; заданным таблицей; спектром Максвелла.

Угловое распределение (индикатриса) задает распределение косинуса угла между направлением вылета частицы и заданного направления излучения (нормали к поверхности для поверхностного источника). Допустимые следующие типы задания индикатрисы: мононаправленный, табличный, изотропный, Ламбертовский.

Временное распределение определяет время рождения частиц. Допускается табличное или δ -образное задание этого распределения.

Существуют следующие способы задания табличного распределения: кусочно-постоянное (гистограммой); кусочно-линейное; дискретное.

Распределение характеристик частиц источника по начальным параметрам может быть как независимым, так и более сложным, когда распределения по времени, энергии и углу зависят друг от друга.

Имеется возможность задания источника в виде ансамбля частиц, т.е. набора частиц с заданными координатами, направлением полета и энергией.

Результаты

Результаты счета задачи подразделяются на стандартные и заказные. Стандартные результаты рассчитываются и выдаются всегда, заказные - только в том случае, когда они явно заказаны.

К стандартным результатам относятся:

- число реакций,
- количество рожденных и поглощенных в реакциях частиц,
- интегральные влет-вылет частиц и энергии по областям,
- интегральные перелеты частиц и энергии через поверхности.

Стандартные результаты выдаются как для всей задачи, так и для каждой области и поверхности в отдельности.

Существуют два типа заказных результатов - областные и поверхностные. Первые вычисляются в областях, а вторые – в точках пересечения моделируемыми частицами поверхностей.

Заказные областные результаты вычисляются с использованием оценки либо по пробегу, либо по столкновениям. Можно вычислять следующие областные результаты: поток частиц; количество реакций, энерговыделение, число вторичных частиц, образовавшихся на реакциях деления. Заказными поверхностными результатами являются токи и потоки частиц и энергий.

Заказные результаты можно выдавать распределенными по наборам значений переменных, называемых параметрами. В программе предусмотрено использование около двадцати основных параметров. Среди них энергия, время, координаты частицы, всевозможные углы, номера реакций, столкновений, поколений и ряд других.

Результаты можно также вычислять с дополнительной сверткой с функцией одной переменной.

Моделирование и тактика счета

В работающем в настоящее время варианте программы моделируются процессы переноса нейтронов и гамма-квантов, а также образование гамма-квантов на нейтронных столкновениях и нейтронов на гамма-столкновениях.

Моделирование процессов переноса нейтронов и гамма-квантов осуществляется в соответствии с выбранной системой констант взаимодействия соответствующих частиц с веществом.

Для розыгрыша свободного пробега и выбора вещества, на котором происходит столкновение, используется схема максимальных кусочно-постоянных сечений. Учет теплового движения ядер среды при моделировании переноса нейтронов осуществляется двумя способами: либо с учетом химических связей – так называемая модель $S(\alpha, \beta)$, либо в приближении свободного максвелловского газа. При моделировании с учетом химических связей используется сечения взаимодействия и энергоугловое распределение для заданной температуры.

При использовании модели свободного газа моделирование распространения нейтронов осуществляется на холодных сечениях вещества. Учет температурного движения ядер заложен в сам алгоритм моделирования, что является очень удобным, так как не требует расчета констант для заданной температуры (Иванов Н. и Иванов А., 2003).

Образование гамма-квантов происходит при каждом нейтронном столкновении по всем каналам гамма-образования для вещества, на котором произошло столкновение.

В программу введен ряд методов повышения эффективности счета:

- расщепление и рулетка;
- два типа отражения на поверхностях – зеркальное и по Ламберту; коэффициент отражения представляет собой вероятность, с которой частица отражается от заданной поверхности;

- весовые окна, позволяющие выравнять веса частиц, пересекающих данную поверхность;
- ценность частиц по областям системы;
- экспоненциальное преобразование.

Одним из основных методов повышения эффективности счета задач является метод моделирования пробных частиц (Кочубей и др., 2000), который применяется при вычислении потока частиц в малый объем пространства.

Оборвать траекторию частицы можно по любому предусмотренному программой параметру, задавая для него условия обрыва.

Существенным моментом в задании тактики счета является возможность задания набора условий (обычно, это интервалы фазовых координат частицы), при выполнении которых указанная тактика применяется к моделируемой частице.

Тактику счета для решения конкретных задач не всегда бывает удобно задавать на реальной геометрии системы. Поэтому в программе С-95 можно вводить дополнительный блок, называемый управляющим. Этот блок накладывается на основную систему, а его геометрия строится исключительно из удобства задания тактики счета и получения результатов.

Учет тормозного излучения в задачах переноса гамма-излучения

При решении задач переноса гамма-излучения обычно предполагается, что образующиеся при взаимодействии гамма-квантов с веществом электроны и позитроны поглощаются в точке рождения, причем позитрон аннигилирует с образованием двух аннигиляционных квантов. При этом не учитывается, что в процессе своего движения заряженные частицы, взаимодействуя с атомами вещества, излучают тормозные кванты. Неучет этого обстоятельства приводит к занижению, порой значительному, выхода гамма-квантов при решении, например, задач глубокого проникновения через барьеры из тяжелых материалов. Решение же этих задач с учетом переноса электронов и позитронов требует значительных затрат времени.

В 1990 году в программу MCNP (Briesmeister, 2000) введена модель ТТВ учета тормозных квантов в случае, когда моделирование электронов и позитронов не производится. В этой модели предполагается, что все электроны и позитроны летят в направлении полета первичного гамма-кванта и локально поглощаются, излучая при этом тормозные кванты, также летящие в направлении полета первичного кванта. Основным недостатком модели ТТВ является неучет углового и пространственного распределения точек рождения вылетающих тормозных квантов.

Для исправления этого недостатка во ВНИИЭФ предложена модель ТТВIAS (Donskoy and Zalyalov, 2003) учета тормозного излучения в 'толстых' областях. Она предполагает локальное поглощение электронов и позитронов и испускание всех порожденных ими тормозных гамма-квантов. Количество, спектрально-угловое и пространственное распределение энергии тормозных гамма-квантов на один акт взаимодействия первичного гамма-кванта заранее насчитывается по программе ЭЛИЗА (Донской, 1993) с учетом переноса электронов и позитронов и размещается в таблицах. На языке уравнения переноса гамма-излучения предложенная модель сводится к добавлению к правой части этого уравнения еще одного интегрального члена, так что уравнение переноса гамма-излучения приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{E}, t)}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f(\vec{r}, \vec{E}, t)}{\partial \vec{r}} + \sigma(\vec{r}, E) \nu(E) f(\vec{r}, \vec{E}, t) = \\ & = \iint f(\vec{r}', \vec{E}', t) \sigma(\vec{r}, E') \nu(E') N_{brem}(E') \mathcal{K}_{brem}(\vec{r}', \vec{E}' \rightarrow \vec{r}, \vec{E}) d\vec{r}' d\vec{E}' + \\ & + \int f(\vec{r}, \vec{E}', t) \sigma(\vec{r}, E') \nu(E') K(\vec{r}; \vec{E}' \rightarrow \vec{E}) d\vec{E}' + g(\vec{r}, \vec{E}, t) \end{aligned} \quad [1]$$

Здесь $f(\vec{r}, \vec{E}, t)$ - функция распределения гамма-квантов в момент времени t в точке пространства \vec{r} по энергиям E и направлениям $\vec{\omega}$; $\vec{E} = E \cdot \vec{\omega}$; $\vec{v} = v \cdot \vec{\omega}$; v - скорость; $\sigma(\vec{r}, E)$ - полное сечение взаимодействия; $K(\vec{r}; \vec{E}' \rightarrow \vec{E})$ - ядро перехода при взаимодействии; $g(\vec{r}, \vec{E}, t)$ - источник гамма-квантов; $N_{brem}(E')$ - число тормозных квантов, образуемых гамма-квантом с энергией E' ; $\mathcal{K}_{brem}(\vec{r}', \vec{E}' \rightarrow \vec{r}, \vec{E})$ - спектрально-угловое и пространственное распределение тормозного излучения на один акт взаимодействия в точке \vec{r}' гамма-кванта (далее – первичного гамма-кванта) с энергией E' и направлением $\vec{\omega}'$.

Спектрально-угловое и пространственное распределение энергии тормозного излучения удалось описать как функцию трех переменных: энергии E , косинуса угла μ между направлением полета тормозного кванта и направлением полета первичного гамма-кванта и расстояния z по направлению полета первичного гамма-кванта от точки взаимодействия первичного гамма-кванта до точки рождения тормозного кванта (продольный сдвиг). Для сокращения объема таблиц была проведена частичная факторизация спектрально-углового и пространственного распределения энергии тормозного излучения: сетка по z укрупнялась, и в каждой крупной ячейке сетки спектрально-угловое и пространственное распределение представлялось в виде произведения спектрально-углового и пространственного распределений.

Для повышения точности расчетов модель ТТВІАС была дополнена моделью учета пространственного распределения точек рождения аннигиляционных квантов. В этой модели пространственное распределение точек рождения аннигиляционных квантов заранее насчитывается в цилиндрической системе координат по программе ЭЛИЗА и табулируется аналогично тому, как табулируется пространственное распределение точек рождения тормозных квантов в модели ТТВІАС (только продольный сдвиг).

Проведены сравнительные расчеты переноса гамма-излучения в толстых свинцовых пластинах. Показано, что задача с использованием модели ТТВІАС считается на порядки быстрее, чем задача совместного переноса гамма-излучения и заряженных частиц, но в несколько раз медленнее, чем задача переноса гамма-излучения без учета тормозного излучения. На примере свинцовой пластины установлено, что значения выхода гамма-квантов вперед и назад из толстых пластин, рассчитанные с использованием модели ТТВІАС, хорошо согласуются со значениями выхода, сосчитанными с учетом переноса заряженных частиц.

В таблицах 1 и 2 приведено количество гамма-квантов, выходящих из свинцовой пластины толщиной 10 см вперед и назад. Все величины нормированы на 1 гамма-квант источника. Статистическая ошибка не превышает 1% (1σ) для задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов и 0.1% для других задач.

Таблица 1. Выход вперед гамма-квантов.

Энергия источника, МэВ	$\gamma + e^- + e^+$	$\gamma + TTBIAS$	γ	MCNP ($\gamma + TTB$)	ЭЛИЗА ($\gamma + TTB$)
100	0.36748	0.37324	0.00022367	0.655449	0.64093
50	0.14645	0.14831	0.00065050	0.293417	0.28793
20	0.04480	0.04481	0.0034089	0.100999	0.09894
10	0.02564	0.02565	0.011524	0.050011	0.04817

Таблица 2. Выход гамма-квантов назад.

Энергия источника, МэВ	$\gamma + e^- + e^+$	$\gamma + TTBIAS$	$\gamma + TTBIAS + \text{модель аннигиляции}$	γ	MCNP ($\gamma + TTB$)
100	0.73203	0.94920	0.74851	0.27238	0.52134
50	0.55738	0.69756	0.56908	0.24093	0.34223
20	0.37729	0.42794	0.37386	0.18459	0.20653
10	0.22865	0.24796	0.22832	0.13411	0.13866

Алгоритмы распараллеливания

В основе алгоритмов распараллеливания используется модель с передачей сообщений, реализуемая библиотекой межпроцессорных обменов MPI.

Для решения задач линейного переноса, когда траектории частиц являются абсолютно независимыми, разработан параллельный алгоритм асинхронного счета пакетов траекторий, который позволяет получать почти 100 % эффективность на любом числе процессоров. В этом алгоритме каждый из запущенных процессов является независимым расчетом, который моделирует траектории на своих подцепочках случайных чисел и обменивается с другими только через определенные промежутки времени.

Для решения задач на собственные значения разработаны другие алгоритмы, так как при этом траектории нейтронов уже не являются абсолютно независимыми (ансамбль нейтронов, полученный на текущем шаге, продолжает моделироваться на следующем шаге).

Для решения таких задач применяется параллельный алгоритм, в котором один процесс выделяется в качестве управляющего (мастера). Этот процесс выполняет распределение данных об ансамбле нейтронов в начале шага моделирования на рабочие процессы и сбор с них данных в конце шага. Остальные процессы (рабочие) осуществляют непосредственно моделирование полученных траекторий на данном шаге. Такой алгоритм применяется, когда в расчетах используются до 50 процессоров, так как при дальнейшем увеличении числа процессоров наблюдается существенное снижение его эффективности распараллеливания.

Поэтому для эффективного решения задач на собственные значения на большом числе процессоров разработан другой алгоритм распараллеливания. Основная идея этого алгоритма заключается во введении еще одного уровня управления распределением начальных параметров ансамбля нейтронов. Этот главный управляющий процесс (процесс-хозяин) управляет несколькими управляющими (мастер) процессами более низкого уровня, каждый из которых, в свою очередь, управляет своим подмножеством подчиненных (рабочих) процессов с помощью описанного выше метода.

Расчеты с использованием сеточной геометрии

В комплексе С-95 имеется возможность в качестве одного из блоков использовать объект, определяемый сеточной геометрией, то есть совокупностью ячеек сетки, заполненных каким либо веществом с определенной плотностью. Сетки могут быть как регулярные и задаваться координатами узловых точек, так и нерегулярные и задаваться набором координат вершин для каждой ячейки сетки.

Так как стандартное моделирование траекторий частиц методом Монте-Карло включает в себя расчёт расстояния от места нахождения частицы до границ ячейки и пересчёт её координат при перелёте границы, то увеличение числа ячеек сетки обязательно приведёт к резкому увеличению времени, затрачиваемого на моделирование одной траектории. Поэтому в С-95 используется иной подход к моделированию траекторий внутри объектов с сеточной геометрией.

Этот алгоритм построен на основе метода максимальных кусочно-постоянных сечений. В отличие от стандартного алгоритма моделирования, где пробег разыгрывается исходя из истинного сечения взаимодействия частицы с веществом, содержащимся в конкретной ячейке, в этом алгоритме моделирование траекторий частиц ведётся по максимальному для каждой энергетической группы сечению. Причём это максимальное сечение насчитывается по всем ячейкам системы.

Свободный пробег частицы с энергией, соответствующей j -ой энергетической группе, разыгрывается по сечению Σ_{\max}^j . Для упрощения процедуры определения местонахождения частицы внутри объекта с сеточной геометрией в программе используется переинтерполяция сеточных величин более мелкой равномерной цилиндрической, сферической или кубической сеткой. Считается, что ячейка интерполяционной сетки заполнена веществом, которое находится в ячейке сеточной геометрии, в которую попадает центр ячейки интерполяционной сетки. Так как при этом используется сетка, равномерная по каждому из направлений, то номер ячейки сеточной геометрии, в которую попала частица, определяется очень легко. По номеру ячейки находится истинное сечение взаимодействия для вещества из этой ячейки. Далее используется метод отказов, то есть с вероятностью, пропорциональной истинному сечению вещества в ячейке принимается факт столкновения, а в противном случае оно считается фиктивным. Таким образом, отпадает необходимость в вычислении расстояний до границ каждой ячейки и, соответственно, пересчёт координат при перелёте этих границ.

Нетрудно видеть, что такой алгоритм по вычислительным затратам очень слабо зависит от количества ячеек в объекте с сеточной геометрией, так как при увеличении числа ячеек процедура определения номера ячейки, в которой произошло столкновение, остаётся одной и той же.

Вместе с тем в системах, в которых имеются существенно различия в плотностях, этот метод может оказаться не очень эффективным. Поэтому используется следующая схема моделирования траекторий. При задании начальных данных, описывающих исходную систему, дополнительно определяется управляющий блок. Это виртуальный объект, который накладывается на реальную геометрию и позволяет использовать различные приемы повышения эффективности расчетов. В случае наличия в системе объекта с сеточной геометрией, управляющая геометрия используется для того, чтобы разбить пространство на некоторые геометрические области, внутри которых нет существенных различий в плотностях. Максимальное сечение в этом случае рассчитывается отдельно для каждой области управляющей геометрии. Используемый метод кусочно-постоянных по энергии сечений для веществ в

системе позволяет легко рассчитать максимальные сечения по выделенным управляющей геометрией областям. Моделирование траекторий осуществляется по старой схеме, но с учетом максимального сечения насчитанного для каждой области.

Такой подход позволяет сократить время моделирования траектории частицы по сравнению с использованием метода максимальных по всей системе сечений за счет сокращения количества фиктивных столкновений.

Программа TDMCC

Программа TDMCC (Zhitnik et al., 2004), созданная на базе комплекса C-95, предназначена для проведения модельных исследовательских расчетов нейтронной динамики активных зон водных реакторов.

Информация о геометрии реактора и составах областей формируется с помощью интерфейсного модуля «Reactor Setting» в соответствии с правилом задания начальных данных C-95. Каждому стержню в ТВС присваивается отдельный номер, характеризующий его размещение в активной зоне реактора. По высоте стержни виртуально делятся на слои, внутри которых предполагается постоянство состава и концентрации запаздывающих нейтронов. Для описания информации о составе стержней на конкретный момент работы реактора, используется файл, полученный из расчета нейтронно-ядерной кинетики.

В принятой модели расчета нейтронной динамики используется пошаговый временной счёт. Мгновенные и запаздывающие нейтроны моделируются отдельно.

Моделируемое число частиц в ансамбле постоянно. Информация о нейтронах, выпущенных в момент времени T_0 и выживших на момент времени $T = T_0 + \Delta t$, является начальной при моделировании следующего пакета. Если число частиц, достигших момента времени T больше, чем размер ансамбля, то данные об остальных частицах не записываются (но вес их учитывается), если же меньше, то пакет дополняется до первоначального значения розыгрышем из уже имеющихся.

Пространственно-энергетическое распределение нейтронов на начало временного шага передаётся с предыдущего шага посредством массива, содержащего информацию о фазовых координатах моделируемых нейтронов. Такая информация описывает местонахождение и характеристики каждого нейтрона в ансамбле и, следовательно, полностью определяет распределение частиц в системе. Величина ансамбля моделируемых частиц задаётся в начальных данных и определяет точность проводимого расчета.

Кроме мгновенных нейтронов в системе моделируются запаздывающие нейтроны, которые испускаются отдельно сформированным источником равномерно по временному шагу. Информация о начальном распределении источников запаздывающих нейтронов в системе формируется в результате проведения предварительного расчета по программе C-95 (расчет критических параметров). Убыль источника запаздывающих нейтронов, связанная с испусканием частиц на протяжении временного шага, компенсируется за счет образования новых источников запаздывающих нейтронов, которыми являются осколки ядер, образующиеся на реакциях деления.

Время появления запаздывающих нейтронов связано с периодами полураспада их предшественников-осколков. По этому признаку запаздывающие нейтроны в настоящей версии программы разбиваются на шесть групп. Высвечивание запаздывающих нейтронов в течение временного шага проводится в соответствии с вероятностями распределения нейтронов по группам.

Мгновенные и запаздывающие нейтроны различаются только способом появления в системе, а моделирование их траекторий осуществляется одинаково. При моделировании траекторий используется метод максимальных сечений и учитывается тепловое движение ядер среды.

Вес запаздывающих нейтронов, приходящихся на один мгновенный нейтрон за моделируемый временной шаг, зависит от длины этого шага. Поэтому частота выпуска запаздывающих нейтронов в процессе моделирования ансамбля варьируется в зависимости от продолжительности временного шага.

Результатом работы вышеописанной схемы программы является пошаговый расчёт количества нейтронов, находящихся в системе, нормированный на один начальный нейтрон.

В программе TDMCC заложена возможность мгновенного изменения положения регулирующего стержня, что приводит к изменению его реактивности.

Реализована также параллельная версия программы расчета нейтронной динамики активных зон реакторов.

Далее приводятся результаты тестовых расчетов по программе TDMCC некоторой модельной ТВС. Первый тестовый расчет соответствует установлению стационарного режима в модельной ТВС.

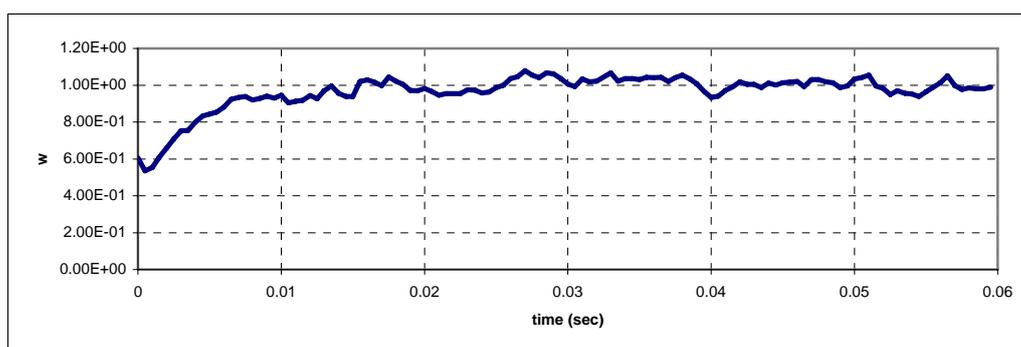


Рисунок 1 – I-этап. Установление стационарного режима.

Второй расчёт соответствует, моменту мгновенного поднятия регулирующего стержня на некоторую высоту, приводящую к возрастанию реактивности системы на 0.5β .

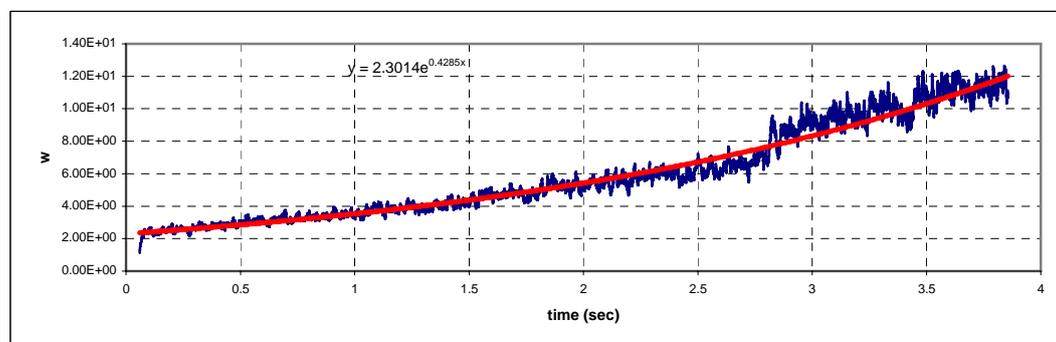


Рисунок 2 – II-этап. Динамика системы после повышения её реактивности.

Заключение

Работы, выполненные во ВНИИЭФ по разработке алгоритмов моделирования переноса нейтронов и гамма-квантов, позволили значительно расширить класс задач, решаемых этим методом. Задачи решаются как на геометриях, задаваемых обычными поверхностями, так и на сеточных геометриях. Созданы параллельные версии программ, которые работают с высокой эффективностью на достаточно большом количестве процессоров. Проведены модельные расчеты динамических процессов водных реакторов.

Благодарности

Программа TDMCC разработана в 2002-2004 годах в рамках проекта МНТЦ №1086.

Ссылки

- Кочубей Ю.К., Житник А.К., Артемьева Е.В. и др. Программа C-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 2. С. 49-52.
- Иванов Н.В., Иванов А.Н. Учет теплового движения атомов среды при решении задач переноса нейтронов методом Монте-Карло // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 25-32.
- A.K. Zhitnik, N.V. Ivanov, V.E. Marshalkin ... VNIIEF and T.A. Taiwo, W.S. Yang ANL. The TDMCC Monte Carlo Capability for Spatial Kinetics Calculations of Reactor Cores // Trans. Am. Nucl. Soc., 91, 2004. P. 248-249.
- Vasilyev A.P., Kuropatenko E.S., Lutov V.D., Orlov A.I. Nuclear Data Library – BAS. The history of development and validation for criticality safety calculation. // ICNC 95. Proceeding of the International Conference of Nuclear Criticality Safety. / Albuquerque, New Mexico, USA, September 17-21, 1995, 2.56-2.60. ENDF-102 (Data formats and procedures for the evaluated nuclear data file), 1979г.
- Storm E., Israel H.I. Photon Cross Section from 1 KeV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z=100. // Nucl. Data Tables, A7, 1970.
- Veigele W.J. Photon Cross Section from 0.1 KeV to 1 MeV for Elements Z=1 to Z=94. // Atomic Data Tables, 5, 1973.
- Cullen D.E., Chen M.N., Hubell J.H. Tables and Graphs of Photon-Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL). // UCRL-50400, vol.6, part A, Rev.4. Livermore, California. 1989.
- Донской Е.Н., Ельцов В.А., Житник А.К. и др. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ. // Вопросы атомной науки и техники, сер. Математическое моделирование физических процессов, вып.2, с.61-64, 1993г.
- J.F. Briesmeister, Ed. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4c. // Los Alamos National Laboratory. Report LA-13709-M. April 2000.
- E.N. Donskoy, A.N. Zalyalov. Bremsstrahlung Account in Photon Transport. // Book of Abstracts of International Conference “Parallel Computational Fluid Dynamics” (May 13-15, 2003, Moscow, Russia). P. 249-252.
- Е.Н. Донской. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3-6.