

УДК 519.6+618.3

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

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.

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

Введение

Метод Монте-Карло для решения задач переноса нейтронов и гамма-квантов применяется в РФЯЦ-ВНИИЭФ около пятидесяти лет [1]. Первые расчеты этим методом были выполнены Н. А. Дмитриевым и Ю. Н. Кондюриным в 1958 г. 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 данной статье 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 [2]. 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 ($K_{эф}$ 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

Основой в задании геометрических данных служит понятие геометрического блока, который 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);
- цилиндрический (так называемое "тело вытяжения"; все поверхности цилиндрические с образующими, параллельными друг другу);
- 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. Такой подход, используемый при построении геометрических объектов, позволяет описать геометрию всех постановок задач.

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. Изотопные составы могут быть заданы: 1) ядерными концентрациями, 2) плотностью и молекулярным составом веществ, 3) плотностью и массовым составом 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 [3], ENDL-82, ENDF/B-V, ENDF/B6, ENDF/B7 и JENDL-3.

Для моделирования процессов гамма-образования используются библиотека NJMC, которая основана на разработанных во ВНИИЭФ данных по сечениям гамма-образования для быстрых нейтронов и библиотеках ENDL-82 и JENDL-3 для нейтронов с низкими энергиями, а также константы гамма-образования из упомянутых выше нейтронных библиотек.

Перенос гамма-квантов осуществляется с использованием библиотеки, сформированной по данным работ [4] и [5] и библиотеки EPDL92 [6] и EPDL97.

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. 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). Допустимы следующие типы задания индикатрисы: мононаправленный, табличный, изотропный, ламбертовский. Временное распределение определяет время рождения частиц. Возможно табличное или δ -образное задание этого распределения.

Табличное распределение любого параметра может быть задано кусочно-постоянной (гистограммой), кусочно-линейной или дискретной функцией. 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. К ним относятся: числа реакций, количество рожденных и поглощенных в реакциях частиц, интегральные влет-вылет частиц и энергии по областям, интегральные перелеты частиц и энергии через поверхности.

Существуют два типа заказных результатов – областные и поверхностные. Первые вычисляются в областях, а вторые – в точках пересечения моделируемыми частицами поверхностей. Ряд результатов (энерговыведение, потоки частиц) можно рассчитывать как для областей, так и для поверхностей. Областные результаты вычисляются с использованием оценки либо по пробегу, либо по столкновениям.

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

Результаты можно также сворачивать с функцией одной переменной.

Моделирование и тактика счета

В программе 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 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 используются 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 очень удобно, так как не требует расчета констант для заданной температуры [7].

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; отражение от поверхности с заданной вероятностью; 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 [1], 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 г. в программу MCNP [8] 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 [9] учета тормозного излучения в задачах переноса гамма-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 рассчитывается по программе ЭЛИЗА [10] с учетом переноса электронов и позитронов и размещается в таблицах.

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

Проведены сравнительные расчеты переноса гамма-излучения в толстых свинцовых пластинах. Показано, что задача с использованием модели ТТВIAS 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 выходы гамма-квантов вперед и назад из толстых пластин, рассчитанные с использованием модели ТТВIAS, хорошо согласуются с выходом, сосчитанным с учетом переноса заряженных частиц.

В табл. 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 гамма-квантов вперед

Энергия источника, МэВ	$\gamma + e^- + e^+$	$\gamma + \text{ТТВIAS}$	γ	MCNP ($\gamma + \text{ТТВ}$)	ЭЛИЗА ($\gamma + \text{ТТВ}$)
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	$\gamma + e^- + e^+$	$\gamma + TTBIAS$	$\gamma + TTBIAS +$ модель аннигиляции	γ	MCNP ($\gamma + TTBIAS$)
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, т. е. 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 расчет расстояния от места нахождения частицы до границ ячейки и пересчет ее координат при перелете границы, то увеличение числа ячеек сетки обязательно приведет 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 ведется по максимальному для каждой энергетической группы сечению. Причем это максимальное сечение насчитывается по всем ячейкам системы.

Свободный пробег частицы с энергией, соответствующей j -й 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, т. е. 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 пересчет координат при перелете 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, остается одной и той же.

Вместе с тем в системах, в которых имеются существенные 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 методом максимальных по всей системе сечений за счет сокращения количества фиктивных столкновений.

Программа TDMCC

Программа TDMCC [11], созданная на базе комплекса С-95, предназначена для проведения модельных исследовательских расчетов нейтронной динамики активных зон водных реакторов.

В принятой модели расчета нейтронной динамики используется пошаговый временной счет. 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 моде-

лировании 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 меньше, то пакет дополняется до первоначального значения розыгрышем из уже имеющихся.

Пространственно-энергетическое распределение нейтронов на начало временного шага передается 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 задается 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 С-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 расчет 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.

На рис. 1, 2 приводятся результаты тестовых расчетов по программе TDMCC модельной тепловыделяющей сборки. Первый тестовый расчет соответствует установлению стационарного режима в ТВС.

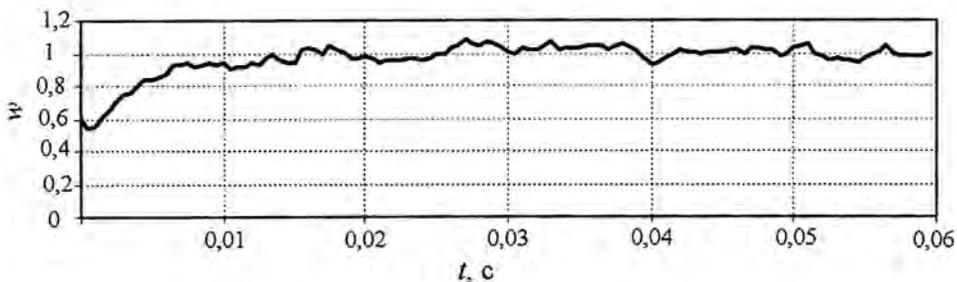


Рис. 1. Установление стационарного режима

Второй расчет соответствует моменту мгновенного поднятия регулирующего стержня на некоторую высоту, приводящую к возрастанию реактивности системы на $0,5\beta$.

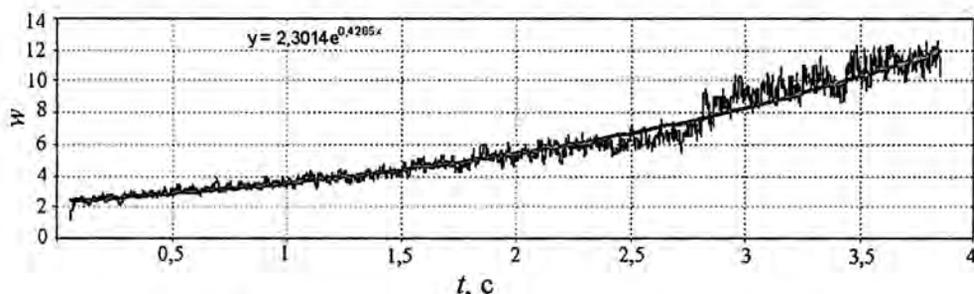


Рис. 2. Динамика системы после повышения ее реактивности

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.

Список литературы

1. Донской Е. Н., Ельцов В. А., Житник А. К. и др. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 2. С. 61–64.
2. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло // Там же. 2000. Вып. 2. С. 49–52.
3. 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. Proceedings of the International Conference of Nuclear Criticality Safety / Albuquerque, New Mexico, USA, September 17–21, 1995.
4. Storm E., Israel H. I. Photon cross section from 1 keV to 100 MeV for elements $Z = 1$ to $Z = 100$ // Nucl. Data Tables. 1970. A7.
5. Veigele W. J. Photon cross section from 0.1 keV to 1 MeV for elements $Z = 1$ to $Z = 94$ // Atomic Data Tables, 1973.
6. 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.
7. Иванов Н. В., Иванов А. Н. Учет теплового движения атомов среды при решении задач переноса нейтронов методом Монте-Карло // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 25–32.

8. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4c. Ed. Briesmeister J. F. // Los Alamos National Laboratory. Report LA-13709-M. April 2000.
9. Donskoy E. N., Zalyalov A. N. Bremsstrahlung account in photon transport // Book of Abstracts of International Conference "Parallel Computational Fluid Dynamics" (May 13–15, 2003, Moscow, Russia). P. 249–252.
10. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
11. Zhitnik A. K., Ivanov N. V., Marshalkin V. E. et al. The TDMCC Monte Carlo capability for spatial kinetics calculations of reactor cores // Trans. Am. Nucl. Soc. 2004. Vol. 91. P. 248–249.

Monte Carlo Simulation of Joint Transport of Neutrons and Photons

E. V. Artemeva, V. V. Bakanov, E. N. Donskoy, V. A. Eltsov, A. K. Zhitnik,
A. N. Zalyalov, N. V. Ivanov, S. P. Ognev, A. B. Ronzhin, V. I. Roslov,
T. V. Semenova

The approaches used at VNIIEF to simulate transport of neutrons and photons in standard (with surface description of region interfaces) and grid geometries are considered in the paper. Summary of TDMCC code intended for solving dynamic problems of operation of water reactors is presented.