

**MCSS – ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ К МЕСТАМ
РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000.
КОМПЛЕКС НЕАНАЛОГОВЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРАЕКТОРИЙ НЕЙТРОНОВ**

А. В. Гриценко, В. Н. Буканов, В. Л. Демехин

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Обоснована необходимость разработки комплекса неаналоговых методов моделирования траекторий нейтронов для использования его в программе MCSS. Приведены критерии отбора неаналоговых методов. Описаны наиболее важные элементы разработанного комплекса. Показаны возможности решения целого класса задач с помощью этого комплекса, а также возможности расширения его применимости.

В данной статье продолжено начатое в работе [1] изложение принципов, на основе которых была разработана программа, предназначенная для решения методом Монте-Карло (ММК) задачи переноса нейтронов к местам расположения образцов-свидетелей (ОС) в реакторе ВВЭР-1000.

При использовании ММК для моделирования физического процесса распространения частиц в сложных средах возникают серьезные проблемы, связанные со сравнительно большими затратами расчетного времени. Эти затраты, необходимые для достижения заданных статистических погрешностей расчетных данных, в основном зависят от значений коэффициента ослабления излучения на пути от источника к расчетным детекторам и их размеров. При этом время расчета приблизительно пропорционально квадрату коэффициента ослабления и обратно пропорционально квадрату объема детекторов. Если затраты времени слишком велики, то в таких случаях решить задачу переноса нейтронов помогают неаналоговые методы моделирования траекторий частиц. Эти методы представляют собой замену непосредственного моделирования физического процесса распространения частиц (аналоговый подход) на модели, дающие те же расчетные результаты, но требующие существенно меньших затрат расчетного времени [2].

Вышеописанные проблемы возникают при моделировании переноса нейтронов от активной зоны (АКЗ) реактора к ОС, так как в этом случае имеет место значительное ослабление плотности потока нейтронов (ППН), а линейные размеры расчетных детекторов не превышают нескольких сантиметров. Поэтому в программе MCSS реализован ряд неаналоговых методов моделирования траекторий нейтронов, которые были выбраны с помощью специально разработанных для этой цели критериев.

Критерии отбора неаналоговых методов

Существует большое количество разновидностей неаналоговых методов и практически неограниченное количество различных вариантов их совместного использования в транспортной программе (например, см. работы [3, 4]). Кроме того, реализация многих неаналоговых методов предполагает подбор определенных параметров, оптимальные значения которых могут существенно отличаться в различных вариантах¹. При этом, как правило, заранее невозможно определить эффективность используемого комплекса неаналоговых методов. Поэтому для программы MCSS он разрабатывался на основании следующих критериев.

1. В случае, если некий метод является независимым от других неаналоговых методов комплекса и очевидно, что он существенно снизит затраты расчетного времени, то такой метод используется без дальнейшего анализа.

¹ Учитывая взаимосвязь и взаимозависимость совместно используемых неаналоговых методов, в дальнейшем будем говорить о комплексе неаналоговых методов.

2. Из нескольких альтернативных комплексов предпочтение отдается тому, при использовании которого за один и тот же промежуток времени достигаются наименьшие значения среднеквадратичных отклонений групповых ППН. При этом формы плотностей распределений вероятностей вкладов частиц в расчетные детекторы должны быть идентичны.

3. Предпочтение, как правило, отдается комплексу, при реализации которого наблюдаются наименьшие максимальные отклонения значений функционалов нейтронного потока, полученных в результате нескольких независимых аналогичных расчетов или в симметричных местах расчетной области (РО) (если таковые имеются). Этот критерий нуждается в некоторых пояснениях.

Количество искомым функционалов нейтронного потока, воздействующего на ОС, как правило, ограничено. Это, например, интегральные ППН, флюенсы нейтронов выше заданной энергии, спектральные индексы, скорости реакций активации и удельные активности их продуктов на момент конца облучения. Естественно, что основным заданием неаналогового комплекса является достижение максимальной скорости снижения их статистических погрешностей.

Если в РО можно добиться симметричности, то в этом случае, исходя из математического формализма, расчетные значения, полученные в симметричных местах, должны быть одинаковы. Следовательно, для ММК отклонения их отношений от единицы будут однозначно определять сравнительную эффективность неаналоговых комплексов. Примером подобной РО может служить 60-градусный сектор симметрии ВВЭР-1000, в котором за счет характеристик источника излучения (АКЗ) несложно создать 30-градусную симметрию.

Если же симметрия в РО в принципе невозможна, то проводятся по два независимых аналогичных расчета для каждого комплекса и сравниваются отклонения от единицы отношений функционалов, полученных в этих парах.

Однако описанная методика, как для симметричной, так и для несимметричной РО, работает только тогда, когда количество сравниваемых отклонений от единицы дает представительную статистическую выборку. Это необходимо, чтобы можно было сделать однозначный вывод при сравнении эффективностей неаналоговых комплексов. Если же указанного количества недостаточно, то представительность выборки достигается за счет увеличения количества описанных выше расчетов, а в качестве анализируемых величин выступают максимальные отклонения от среднего.

Этот критерий позволяет более точно, чем критерий № 2, оценить реальные величины статистических отклонений от среднего. Связано это с тем, что плотности распределений вероятностей вкладов частиц в расчетных детекторах, как правило, отличаются от нормального распределения и, более того, в некоторых случаях – сильно асимметричны. Поэтому расчетные среднеквадратичные отклонения не всегда однозначно определяют значения реальных статистических разбросов искомым функционалов [5].

Комплекс неаналоговых методов

Несмотря на то, что вариантов комплексов неаналоговых методов может существовать очень много, нам, основываясь на перечисленных выше критериях, удалось разработать такой комплекс, который позволяет получать результаты расчетов переноса нейтронов к местам расположения ОС с достаточно малыми статистическими погрешностями при приемлемых затратах расчетного времени.

Приведем комплекс неаналоговых методов, который из всех опробованных нами вариантов является наиболее эффективным для рассматриваемой задачи. Комплекс условно можно разделить на несколько частей.

Первую часть составляют методы, введенные в комплекс согласно критерию № 1:

расслоения стартующих нейтронов по месту старта (по топливным сборкам, твэлам, их высоте) и энергии (согласно спектру рождающихся нейтронов, свернутому в групповую структуру);

замена поглощения частицы умножением ее веса w на вероятность выживания.

Также разработан и реализован неаналоговый метод, удовлетворяющий критерию № 1, с помощью которого достаточно корректно учитывается нестационарность источников излучения во времени. Суть его состоит в следующем.

Топливная кампания условно разбивается на ряд временных интервалов. Независимо от интенсивности выхода излучения из данного источника нейтронов (высотного фрагмента твэла) имитируется вылет частицы с единичным начальным весом. В случае попадания моделируемой траектории в расчетный детектор значение веса частицы умножается на набор коэффициентов, идентифицирующих ее с интенсивностью и спектральными характеристиками источника, испустившего данную частицу. При этом отдельно проводится регистрация для начала и конца каждого временного интервала.

Таким образом, после расчета имеется ряд файлов с данными, которые позволяют не только получить искомые функционалы нейтронного потока на конец облучения, но и отслеживать динамику их изменения во времени.

Методы, вошедшие во вторую часть комплекса, разработаны нами, основываясь на подходах, изложенных в работах [3, 6]. Для каждой подзоны (зоны) РО [1] вводятся принудительные веса частиц всех энергетических групп нейтронов W и коэффициенты рассогласования $k \geq 1^2$. Веса частиц w при входе и после взаимодействия сравниваются со значениями принудительных весов в данной подзоне (зоне). Если выполняется неравенство

$$w < \frac{W}{k}, \quad (1)$$

то частица выживает с вероятностью

$$P = \frac{w}{w''}, \quad (2)$$

где

$$w'' = \frac{W}{k} + \left(Wk - \frac{W}{k} \right) \gamma, \quad (3)$$

и ей присваивается новое значение веса $w' = w''$. В формуле (3) и в дальнейшем γ – случайное число, равномерно распределенное на интервале (0,1). Если выполняется другое неравенство

$$w > Wk, \quad (4)$$

то происходит расщепление на

$$N = \frac{w}{W} \quad (5)$$

частей (при необходимости N округляется), каждая из которых имеет вес

$$w' = \frac{w}{N}. \quad (6)$$

Все принудительные веса зависят от местоположения областей детектирования³ и энергетического диапазона, где следует получить особо малую статистическую погрешность. Общее правило заключается в том, что веса должны быть обратно пропорциональны средне-

² Поскольку используемые в данной статье формулы аналогичны для всех энергетических групп нейтронов, то в обозначениях физических величин индексы групп опущены.

³ Подзоны (зоны) РО, в которых располагаются расчетные детекторы. В нашем случае это – контейнерные сборки с ОС.

му вкладу в эти области и энергетический диапазон частицы, которая находится в данной подзоне (зоне) РО с данной энергией (функция ценности). В результате количества частиц в подзонах (зонах) РО прямо пропорциональны их вкладам. Для источников используется аналогичная процедура. Много частиц стартуют в регионах и с энергиями, которые имеют высокую ценность для результатов, в то время как траектории лишь нескольких частиц моделируются, если предполагается, что их ценность невелика.

Третья часть комплекса представляет собой специально разработанный неаналоговый метод, названный нами "расщепление по направлениям". Этот метод учитывает специфику нашей задачи, а именно малые размеры расчетных детекторов. Суть его состоит в следующем.

Каждая частица, которая стартовала при рождении или рассеянии в направлении одной из областей детектирования, расщепляется на две. Пробег одной из них разыгрывается в диапазоне от места старта до границы области детектирования, а другой – от этой границы до бесконечности. Веса между ними распределяются в соответствии с вероятностью достижения границы области детектирования. Для большей ясности приведем следующие рассуждения.

При аналоговом подходе для получения длины оптического пробега нейтрона обычно используют формулу

$$L_o = -\ln \gamma, \quad (7)$$

Вычислим

$$\delta = \exp(-L_{od}), \quad (8)$$

где L_{od} – длина оптического пробега до области детектирования. Тогда веса нейтронов определяются как

$$w_1 = w(1 - \delta), \quad (9)$$

$$w_2 = w\delta, \quad (10)$$

а длины их оптических пробегов соответственно

$$L_{o1} = -\ln(1 - (1 - \delta)\gamma_1), \quad (11)$$

$$L_{o2} = -\ln \gamma_2. \quad (12)$$

Ограничением для срабатывания описанного расщепления по направлениям является соотношение между w_2 и значением принудительного веса в данной области детектирования. Иными словами, если значение w_2 не входит в диапазон $(W/k, W \cdot k)$, то расщепление не происходит.

Естественно, что средние значения δ в подзонах (зонах) РО для частиц всех энергий рассчитываются заранее. Кроме того, при программной реализации расщепления по направлениям по понятным причинам [1] границей, разделяющей диапазоны розыгрыша оптических пробегов, является точка, в которой частица пересекает ближайшую границу зоны.

Необходимо отметить, что значения величин W , k и δ являются зависимыми практически от всех методов, входящих в неаналоговый комплекс. Поэтому их подбор нужно проводить после реализации всего комплекса. Кроме того, поскольку эти величины зависят друг от друга, возможно проведение нескольких подгоночных итераций для получения их оптимальных значений.

Описанный комплекс неаналоговых методов будет наиболее эффективен, если плотность количества разыгрываемых нейтронных историй в промежутке РО между источником и областями детектирования приблизительно одинакова. Исходя из этого, некоторые подзо-

ны (зоны) из указанного промежутка РО, в объемах которых имеются значительные градиенты плотности нейтронных историй, следует разделить на несколько отдельных подзон. Это еще одно требование, которое следует учитывать при разбиении РО на зоны и подзоны [1].

Выбор метода регистрации

Известно, что эффективность метода регистрации нейтронных историй в расчетных детекторах при решении задачи переноса нейтронов ММК может быть различной [4]. Кроме того, она зависит от используемого неаналогового комплекса и в значительной мере определяет его эффективность. Таким образом, метод регистрации нейтронных историй можно рассматривать как дополнительную часть комплекса неаналоговых методов. Отсюда следует необходимость рассмотреть в данной статье подходы к выбору этого метода.

Метод регистрации нейтронных историй представляет собой оценку вкладов нейтронов в регистрируемую величину в случае, если их траектории пересекают расчетные детекторы. Таким образом, выбор метода регистрации предполагает выбор регистрируемых величин, типов расчетных детекторов и используемых оценок вкладов.

Приведем рассуждения, на основании которых были выбраны перечисленные составляющие метода регистрации нейтронных историй.

Ранее уже упоминалось, что при дозиметрии ОС определяется ограниченное число функционалов нейтронного потока. Однако всегда может случиться так, что кроме имеющихся данных об условиях облучения ОС могут понадобиться дополнительные, которые невозможно получить на основании располагаемой информации. Поэтому желательно иметь в выходных расчетных файлах величины, с помощью которых возможно определить практически все функционалы в рассматриваемых расчетных детекторах. Таковыми величинами являются значения интегральных групповых плотностей потоков частиц, которые в дальнейшем будем обозначать Φ .

Возможности современной компьютерной техники позволяют отказаться от группового приближения теории переноса нейтронов за счет непрерывного отслеживания энергии частиц. Однако спектр нейтронного потока при регистрации нейтронных историй обычно представляется в групповом виде, что дает возможность и в этой ситуации в качестве регистрируемой величины также использовать Φ .

Расчетные детекторы могут быть двух типов – поверхностные и объемные. Рассмотрим особенности каждого из них.

Поверхностный детектор удобен, прежде всего, своей относительной простотой. Единственной величиной кроме веса частицы и площади поверхности S , которая необходима для вычисления вклада в Φ , является значение угла ω между направлением полета частицы и нормалью к поверхности в точке пересечения. Оценка потока на поверхности проводится по формуле

$$\Phi = \sum_{i=1}^{m_{nc}} \frac{w_i}{|\cos \omega_i| S}, \quad (13)$$

где m_{nc} – количество пересечений поверхности частицами данной энергетической группы.

Однако из соотношения (13) видно, что если $|\cos \omega_i|$ хотя бы для одного нейтрона стремится к 0, то Φ стремится к ∞ . На практике это проявляется в виде выбросов в пространственном распределении потока в отдельных точках, для устранения которых необходимы большие затраты расчетного времени. Поэтому мы не рекомендуем применять описанный тип детекторов даже в случаях, когда необходимо определить характеристики поля излучения именно на поверхности.

При использовании объемных детекторов видов оценок может быть достаточно много (см., например, работу [4]). Однако все они являются, по сути, модификациями двух следующих.

Оценка по числу соударений

$$\Phi = \sum_{i=1}^{m_c} \frac{w_i}{\Sigma_t V}, \quad (14)$$

где m_c – количество соударений в объеме данного детектора (V) частиц данной энергетической группы; Σ_t – макроскопическое сечение полного взаимодействия.

Оценка по пробегу

$$\Phi = \sum_{i=1}^{m_n} \frac{w_i L_i}{V}, \quad (15)$$

где m_n – количество свободных пробегов в объеме данного детектора частиц данной энергетической группы; L_i – длина i -го пробега.

Эффективности этих оценок могут достаточно сильно отличаться между собой в зависимости от применяемого комплекса неаналоговых методов. При этом ясно, что с одной стороны, заранее сложно определить более предпочтительную оценку, а с другой – сам процесс регистрации не может заметно увеличить затраты расчетного времени. Поэтому были использованы обе оценки с тем, чтобы позже остановиться на более эффективной.

Еще одним аргументом в пользу использования сразу двух оценок является возможность применения описанного в работе [4] комбинированного метода, синтезирующего обе оценки с целью достижения минимальной дисперсии.

Выводы

Решение ММК задачи переноса нейтронов к местам расположения ОС в реакторе ВВЭР-1000 потребовало создания специального комплекса неаналоговых методов моделирования траекторий частиц. Включение его в программу MCSS позволило получить достаточно малые статистические погрешности при приемлемых затратах расчетного времени. При этом данный комплекс можно рекомендовать к применению для решения целого класса задач, которые могут быть объединены по следующим признакам.

1. Конструктивная сложность физического объекта, для которого решается транспортная задача, например ядерного реактора.
2. Большие габариты источника излучения, например АКЗ.
3. Малые размеры детекторов излучения, например ОС.
4. Большие значения коэффициентов ослабления излучения в пространстве между источником и детекторами.
5. Перераспределение интенсивности выхода излучения.

Кроме того, несложные преобразования описанного в работе комплекса могут значительно расширить его применимость. Например, убрав расщепление по направлениям, данный комплекс можно эффективно использовать при определении функционалов нейтронного потока на поверхностях, а также в толще металла корпуса реактора ВВЭР-1000.

Также отметим, что на основании предложенных критериев отбора неаналоговых методов можно разработать эффективный комплекс неаналоговых методов для решения практически любой задачи переноса нейтронов в сложных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко О.В., Буканов В.М., Демехин В.Л. MCSS – програма розрахунку переносу нейтронів до місць розташування зразків-свідків у реакторі ВВЕР-1000. Організація геометричного блока // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2001. – № 1. – С. 100 - 105.
2. Спанье Д., Гелбард Э. Метод Монте-Карло в задаче переноса нейтронов. – М.: Атомиздат, 1972.
3. Коробейников В.В., Алешечкин В.Н. Анализ некоторых алгоритмов расщепления и рулетки в рас-

четах защиты методом Монте-Карло // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1987. – Вып. 8. – С. 39.

4. Франк-Каменецкий А.Д. Моделирование траекторий нейтронов при расчете реактора методом Монте-Карло. - М.: Атомиздат, 1978. - 96 с.
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд., 1985. – 248 с.
6. 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, Sept. 2 – 6, 1996. – New Jersey: World Scientific, 1998. – P. 58.

MCSS – ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПЕРЕНОСУ НЕЙТРОНІВ ДО МІСЦЬ РОЗТАШУВАННЯ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ У РЕАКТОРІ ВВЕР-1000. КОМПЛЕКС НЕАНАЛОГОВИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЕКТОРІЙ НЕЙТРОНІВ

О. В. Гриценко, В. М. Буканов, В. Л. Демьохін

Обґрунтовано необхідність розробки комплексу неаналогових методів моделювання траекторій нейтронів для використання його в програмі MCSS. Наведено критерії підбору неаналогових методів. Описано найбільш важливі елементи розробленого комплексу. Показано можливості рішення цілого класу задач за допомогою цього комплексу, а також можливості розширення його придатності.

MCSS – PROGRAM OF NEUTRON TRANSPORT CALCULATION TO LOCATION OF SURVEILLANCE SPECIMENS IN REACTOR VVER-1000. VARIANCE REDUCTION SCHEME

O. V. Grytsenko, V. N. Bukanov, V. L. Dyemokhin

The necessity of development of the variance reduction scheme for usage in MCSS program is well grounded. The criterions of nonanalog method selection are stated. The most important elements of the developed scheme are described. Opportunities of numerous problems solution by usage of this scheme and opportunities of expanding its applicability are shown.

Поступила в редакцію 26.10.01,
после доработки – 11.02.02.