



УДК 621.039

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕНЕРАТОРА ВЕСОВЫХ ОКОН РАСЧЕТНОГО КОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

SOLVING PROBLEMS USING THE WEIGHT WINDOW GENERATOR OF THE CALCULATION CODE BASED ON MONTE-CARLO METHOD

Васютин Никита Андреевич, студент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19. E-mail: vasutinwasdek@gmail.com, Тел.: +7(900)211-97-06

Ташлыков Олег Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19. E-mail: otashlykov@list.ru, Тел.: +7(912)635-12-94

Nikita A. Vasutin, student, Nuclear Power Plants and Renewables Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Yekaterinburg, Russia. E-mail: vasutinwasdek@gmail.com. Ph.: +7(900)211-97-06

Oleg L. Tashlykov, Associate professor, Cand. Sci. (Engineering), Nuclear Power Plants and Renewables Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Yekaterinburg, Russia.
E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(912)635-12-94

Аннотация: В расчетных кодах, предназначенных для моделирования процессов переноса нейтронов или гамма-квантов, основанных на методе Монте-Карло, применяются методы понижения дисперсии. Один из них – метод весовых окон. В данной работе представлены методы решения проблемы генерации нулевых весовых окон при использовании генератора расчетного кода, использующего метод Монте-Карло. Данные методы применимы как для задач с переносом нейтронов, так и для задач с переносом гамма-квантов.

Abstract: Computer codes intended for neutrons or gamma rays transport simulation based on Monte-Carlo methods the variance reduction methods are applied. The weight windows method is one of them. In this report the methods of solving problem of zero-weight windows generation using the generator of computer code using the Monte-Carlo methods are presented. These methods are applicable both for neutron transfer problems and gamma rays transfer problems.

Ключевые слова: Метод Монте-Карло; весовые окна; генератор весовых окон; окна, основанные на сетках.

Key words: Monte-Carlo Methods; weight windows; weight window generator; mesh-based weight windows.

ВВЕДЕНИЕ

Методы понижения дисперсии существуют во многих расчетных кодах, реализующих метод Монте-Карло для моделирования процесса переноса частиц. Данные методы используются в случаях, когда накопление оценки требует достаточно большого количества времени, либо, когда без их использования оценку накопить не удастся. Однако, использование данных методов сопряжено с определенными трудностями.

В частности, для расчетного кода MCNP актуальна следующая проблема: в руководстве пользователя содержится описание методов понижения дисперсии (физическое и

математическое описание принципов работы методов), однако не содержатся примеры использования и возможные проблемы, которые могут возникнуть при проведении расчетов. В данной работе будут рассмотрены проблемы при использовании метода весовых окон.

ФУНКЦИЯ ВЕСА И ВЕС ЧАСТИЦ

На самом общем уровне, вес – множитель оценки. Вес – регулятор отклонения от прямой физической симуляции процесса переноса. Так как в расчетном коде, основанном на методе Монте-Карло производится выборка по распределениям, аналогичным реальному процессу, эти распределения имеют такое же

среднее значение, что и реальный процесс. Довольно часто дисперсия реального процесса недостижимо высока, поэтому выборка модифицируется, используя некоторые формы понижения дисперсии. Методы понижения дисперсии используют весовые схемы, чтобы получать в процессе переноса схожее с реальным процессом среднее значение, но с меньшей расчетной дисперсией.

Для повышения эффективности вычислений в расчетных кодах, использующих метод Монте-Карло используются техники, которые не совсем точно симулируют процесс переноса. В частности, в них используются «виртуальные» частицы, которые могут представлять некоторое количество реальных частиц. Количество физических частиц, представляемых одной виртуальной частицей – вес частицы. Истинное количество физических частиц представляется в доверительном интервале погрешности. Результаты расчетов для каждой виртуальной частицы умножается на ее вес, после чего представляется в итоговой оценке.

Цель использования данной техники – увеличение числа частиц, составляющих выборку для областей задачи, представляющих особый интерес, без увеличения выборки менее интересных областей задачи.

ПРОБЛЕМА ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОГО (ОДНОГРУППОВОГО) ВЕСОВОГО ОКНА

Генератор весовых окон – довольно простое устройство, предназначенное для достижения статистической оценки среднего числа частиц, испытавших столкновение в заданной области пространства.

Выходные данные генератора – величина, обратная количеству частиц, испытавших столкновение в данной области пространства. Нули могут выводиться генератором, либо если в заданную область пространства не попало ни одной частицы, либо если ни для одной частицы не была накоплена оценка. Таким образом, для областей пространства, которым генератором были присвоены нулевые значения весового окна, метод весовых окон не применяется.

Рассмотрим, каким образом данную проблему можно исправить. В качестве примера рассмотрим следующую расчетную модель: оценим поток гамма-квантов через поверхность свинцовой сферы радиусом 35 см вокруг шарового источника, состоящего из изотопа ^{60}Co , радиусом 5 см. Разобьем свинцовую сферу на коаксиально расположенные области толщиной 1 см. При задании исходных данных для расчетного кода, данные области, источник ионизирующего излучения, а также внешнюю воздушную среду вокруг сферы толщиной 1 см представим, как отдельные ячейки.

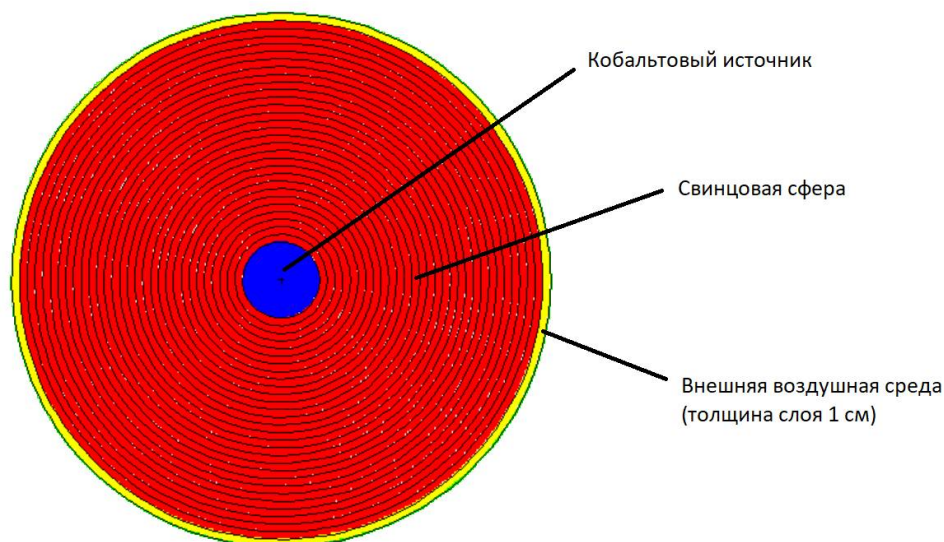


Рис. 1. Модель, используемая в данной работе

Кобальт-60 испытывает β -распад до стабильного изотопа ^{60}Ni , который после распада находится в возбужденном состоянии, поэтому при переходе в стабильное состояние выбрасывает гамма-кванты. Наиболее вероятны 2 линии выхода, с энергиями 1.1732 МэВ и 1.3325 МэВ. Для расчета, рассмотрим только перенос гамма-квантов.

В результате, при расчете с запуском миллиона виртуальных частиц с начальным весом равным единице, генератор весовых окон не способен сгенерировать ненулевое окно ни для одной ячейки, поскольку частицы не достигают внешней поверхности сферы. Решить данную проблему можно, увеличив число виртуальных частиц, однако данный способ приводит к значительному увеличению времени расчета. Так, для рассматриваемой задачи, требуется рассмотреть перенос примерно в 1000 раз большего количества частиц, чтобы генератор смог получить ненулевое весовое окно.

В данной ситуации для генерации ненулевых значений весовых окон могут помочь следующие методы:

- 1) Распределить источники по всему объему заданной геометрии таким образом, чтобы хотя бы некоторые ячейки получили хорошую оценку функции веса. Для рассматриваемой геометрии, например, распределение источников на расстоянии примерно 2/3 радиуса свинцовой сферы, становится возможным получить хорошее весовое окно.
- 2) Сохранить истинный источник, но уменьшить плотность материала так, чтобы произошло попадание частиц в необходимую ячейку, получив при этом окно. Затем, используя данное окно, запустить расчет для задачи с истинной плотностью материала. Иногда для получения результата, требуется проделать несколько итераций с увеличением плотности до истинного значения. В данной задаче, для получения ненулевого весового окна потребовалось 3 итерации: расчет при 1/3 и 2/3 от исходной плотности, а затем при истинной плотности.
- 3) Использовать экспоненциальное преобразование, чтобы искусственно уменьшить эффективное сечение реакций в направлении распространения частиц, имея правильные веса частиц. Источник при таком расчете следует сохранить истинным.
- 4) Создать начальное приближение для весовых окон, исходя из поведения аналогового расчета. Это наилучший способ, если количество весовых окон или ячеек невысокое. Начальное приближение можно подобрать довольно грубо, например, для данной задачи для наружного слоя толщиной 1 см значение истинной границы, заданное начальным приближением, отличается от полученного с помощью генератора в 10 раз.

wwe:p	1.0000E+02				
wnn1:p	5.0000E-01	4.0000E-01	2.0000E-01	1.0000E-01	5.0000E-02
	2.5000E-02	1.2500E-02	6.2500E-03	3.1250E-03	1.5625E-03
	7.8125E-04	3.9063E-04	1.9531E-04	9.7656E-05	4.8828E-05
	2.4414E-05	1.2207E-05	6.1035E-06	3.0518E-06	1.5259E-06
	7.6294E-07	3.8147E-07	1.9074E-07	9.5368E-08	4.7684E-08
	2.3842E-08	1.1921E-08	5.9605E-09	2.9802E-09	
	1.4901E-09	0.0000E+00	-1.0000E+00		
wwe:p	1.0000E+02				
wnn1:p	5.0000E-01	4.2337E-01	1.9080E-01	1.0452E-01	5.7940E-02
	3.2179E-02	1.7869E-02	9.9301E-03	5.5100E-03	3.0504E-03
	1.6893E-03	9.3296E-04	5.1456E-04	2.8376E-04	1.5639E-04
	8.5979E-05	4.7319E-05	2.6025E-05	1.4302E-05	7.8513E-06
	4.3085E-06	2.3656E-06	1.2971E-06	7.1064E-07	3.8917E-07
	2.1312E-07	1.1666E-07	6.3930E-08	3.5006E-08	1.9159E-08
	1.0483E-08	-1.0000E+00	-1.0000E+00		

Рис. 2 Разница нижних границ весовых окон, заданных начальным приближением (сверху) и полученных с помощью генератора (снизу). Красным выделено окно для наружного слоя сферы, толщиной 1 см

5) Использовать дополнительную оценку, которая хорошо соотносится с желаемой конечной оценкой, но получить которую проще. Использовать генератор для получения окон для этой оценки, а затем полученное распределение использовать для генерации окон для исходной оценки. Для рассматриваемой задачи была использована оценка потока для поверхности сферы, радиусом 23 см, после чего удалось сгенерировать окно для исходной оценки.

ЭНЕРГОЗАВИСИМОЕ ВЕСОВОЕ ОКНО

Если проблемы с генерацией энергонезависимого окна решить просто, то для энергозависимого окна все значительно сложнее.

Зачастую проблемы с генерацией весовых окон возникают для низких энергий частиц. Конкретно для данной модели, для задачи с переносом фотонов, окно трудно получить при энергиях ниже 0.114 МэВ.

Для энергозависимых окон можно попробовать вручную ввести приемлемые значения нижних границ весового окна. Приемлемые значения можно оценить с помощью биномиального распределения следующим образом.

Пусть рассматриваемое пространство делится на две области: R_1 и R_2 . Пусть регион R_i выбирается с вероятностью c_i . Тогда, если частицы могут испытать столкновение в регионе i с вероятностью p_i , s_i раз, и испытать столкновение 0 раз с вероятностью $1-p_i$. Среднее значение частиц, испытавших столкновение в данной области пространства:

$$M_1 = c_1 p_1 s_1 + c_2 p_2 s_2 \quad (1)$$

А для следующего момента времени:

$$M_2 = c_1 p_1 s_1^2 + c_2 p_2 s_2^2 \quad (2)$$

Откуда разница находится как:

$$V = M_2 - M_1^2 \quad (3)$$

$$V = c_1 p_1 s_1^2 + c_2 p_2 s_2^2 - (c_1 p_1 s_1 + c_2 p_2 s_2)^2 \quad (4)$$

Полученное таким образом среднее значение довольно близко к истинному. Предполагается, что применение методов понижения дисперсии сохраняет биномиальное распределение попаданий частицы из области R_2 , однако изменяет p_2 . M_1 сохраняется, пока сохраняется произведение $p_2 s_2$.

Стоит отметить, что некоторые методы, применимые для энергонезависимого весового окна, применимы также для энергозависимого окна, например, можно использовать дополнительную оценку.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОКОН, ОСНОВАННЫХ НА СЕТКЕ

В случае, если получить энергонезависимое окно, основанное на ячейках, не представляется возможным, можно попробовать использовать так называемые окна, основанные на сетках. Такие весовые окна не требуют разбиения геометрии на большое количество ячеек, чтобы обеспечить небольшой перепад значений нижних границ весового окна между соседними областями пространства (рекомендуется не допускать более чем двукратный перепад весов между соседними областями геометрии).

Сетка должна полностью покрывать геометрию, описанную в задаче. Это гарантирует, что все переносимые частицы останутся внутри сетки, а значит для них будет применяться метод весовых окон. Поверхности или линии геометрии не требуется располагать так, чтобы они совпадали с поверхностями сетки, однако точечный источник не должен располагаться на границе ячейки сетки.

Используемый в данной работе расчетный код предоставляет два вида сеток: в цилиндрических и декартовых координатах. Сетка должна быть выбрана в масштабе, гарантирующем небольшой перепад весов между соседними областями геометрии.

Для данной задачи была выбрана сетка в декартовых координатах. Сетка была выбрана таким образом, чтобы свинцовая сфера оказалась вписанной в прямоугольную сетку. Таким образом, для данной задачи было сгенерировано энергонезависимое весовое окно.

ВЫВОД

В работе предложены способы решения проблемы получения нулевых весовых окон при использовании генератора весовых окон расчетного кода, реализующего метод Монте-Карло. Были предложены методы для энергонезависимых (однотипных), энергозависимых окон, а также предложен метод использования весовых окон на сетке. Данные методы актуальны как в задачах по переносу нейтронов, так и в задачах по переносу гамма-квантов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume 1: User's Guide," Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-1987, (April 2003).
2. Thomas E. Booth, "MCNP Variance Reduction Examples," Los Alamos National Laboratory report LA-UR-12-25907, (December 2004).
3. J. C. Wagner and A. Haghghat, A MCNP: Automatic Adjoint Accelerated MCNP – User's Manual (Version 1.0i)