

РАСЧЕТ ВЫГОРАНИЯ СИЛЬНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПЕРВЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Давиденко В.Д., Карпушкин Т.Ю., Цибульский В.Ф. (ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Расчеты изотопного состава топлива в настоящее время являются рутинной задачей. Для решения уравнений изотопной кинетики необходимо знать плотность потока нейтронов в области, где рассчитывается выгорание, и среднее по энергетическому спектру нейтронное сечение изотопов. Эта информация дополняется цепочками радиационных превращений изотопов в результате ядерных реакций, постоянными распада, выходом продуктов деления ядер. Решением системы дифференциальных уравнений изотопной кинетики на небольшом временном интервале определяется новый изотопный состав разных компонентов среды, на основании которого подготавливаются новые сечения материалов для решения пространственно-энергетической задачи переноса нейтронов на следующем шаге расчета выгорания.

Наиболее успешно решение этих задач реализуется для простых геометрий элементарных ячеек, когда для расчета пространственного распределения нейтронов можно использовать относительно простые и быстрые методы решения транспортной задачи. Например, распределение поля нейтронов в многослойной цилиндрической, плоской или сферической геометрии можно оценить с помощью аналитических формул расчета вероятностей первых столкновений. Однако для расчета вероятностей первых столкновений в более сложных областях необходимо использовать численные методы, что сопряжено с большими вычислительными затратами. Трудности возникают при расчете сильных выгорающих поглотителей, например, гадолиния. Плотность потока нейтронов в таких материалах быстро уменьшается от поверхности внутрь поглотителя. При расчете необходимо следить за изменением изотопного состава в очень тонких слоях. Из-за большого поглощения ядерная концентрация изотопов меняется быстро и необходимо проводить вычисления с мелким временным шагом.

В настоящей статье описан приближенный метод восстановления матриц вероятностей первых столкновений по заранее рассчитанным реперным матрицам, позволяющий заметно с приемлемой точностью ускорить расчет. Алгоритм

реализован в качестве дополнительного модуля программного комплекса UNK [1], который имеет подробную библиотеку ядерных данных на основе файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-6 и библиотеку выхода продуктов деления в зависимости от энергии нейтронов, вызвавших деление. В программном модуле BURNUP, интегрированном в пакет, изменение ядерной концентрации изотопов на временном шаге рассчитывается с помощью аналитических формул. В UNK реализованы аналитические методы расчета вероятностей первых столкновений для одномерных геометрий и основанный на методе хорд модуль численного расчета матриц вероятностей первых столкновений для сложных геометрий.

Алгоритм решения задачи выгорания в областях со сложной геометрией следующий. Перед началом расчета вычисляют матрицы вероятностей первых столкновений для заданной геометрии и многогрупповых сечений (89 групп), характеризующих состояние ТВС со свежим топливом. Эти матрицы запоминаются в качестве реперных. В процессе выгорания ядерная концентрация изотопов меняется, следовательно, меняются и групповые сечения. Для новых сечений следовало бы пересчитать матрицы вероятностей первых столкновений, но эта процедура длительная, и в UNK реализован алгоритм восстановления новых матриц по реперным по методике [3], которая, по существу, является экстраполяционной. Из реперных матриц вероятностей первых столкновений выбирается наиболее близкая по состоянию материалов (с наиболее близкими полными макроскопическими сечениями) на данный момент выгорания. Элементы этой матрицы корректируются таким образом, что вероятность первых столкновений с учетом новых сечений удовлетворяет соотношению взаимности. Как показала расчетная практика, этот алгоритм пригоден для тех ситуаций, когда макросечения материалов в процессе выгорания меняются не очень сильно.

Новый алгоритм расчета выгорания отличается от описанного методикой восстановления новых матриц вероятностей первых столкновений. Существо ее состоит в следующем. При

расчете реперных матриц одновременно рассчитываются средние хорды первых столкновений, т.е. средние отрезки луча вдоль пробега нейтрона, которые он пересекает в зонах до первого столкновения. И эти средние хорды затем используются для восстановления новых матриц. Реперные матрицы рассчитываются статистическим способом. Для каждой регистрационной зоны равновероятно по ее объему разыгрывается точка старта нейтрона и направление вылета. Движение нейтронов вдоль этого направления продолжается до тех пор, пока случайно не реализуется акт столкновения. Во время полета нейтрон может столкнуться и в той зоне, где он родился, а может пролететь и несколько регистрационных зон до первого столкновения. Число стартов NS_i из зоны i суммируется, суммируется и число столкновений NC_{ij} в зоне j нейтронов, стартовавших из зоны i . Вероятность P_{ij} определяется как отношение числа столкновений NC_{ij} нейтронов в зоне j , пришедших из зоны i , к полному числу стартов NS_i из зоны i : $P_{ij} = NC_{ij}/NS_i$.

Одновременно с регистрацией столкновений регистрируются хорды в последовательно проходимых при движении нейтрона зонах. Длина хорды l_{ijm}^k — это путь в зоне номер m при k пересечении нейтрона, родившегося в зоне i и испытывавшего первое столкновение в зоне j . Тогда средний путь или средняя хорда, пройденная нейтроном в зоне m ,

$$L_{ijm} = \sum_{k=1}^{PS_m} l_{ijm}^k / PS_m, \quad (1)$$

где PS_m — число случаев пересечения зоны m нейтроном, родившимся в зоне i и испытывавшим первое столкновение в зоне j .

Можно предположить, что для нейтрона, родившегося в зоне i и испытывавшего первое столкновение в зоне j , вероятность испытать это столкновение

$$P_{ij} = A_{ij} \left\{ \exp \left(- \sum_{m \neq j}^N \Sigma_t^m L_{ijm} \right) \left[1 - \exp \left(- \Sigma_t^j L_{ijj} \right) \right] + \left[1 - \exp \left(- \Sigma_t^j LII_{jjj} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где Σ_t^m — полное сечение в зоне m ; L_{ijm} — средняя хорда (1), пройденная нейтроном в зоне m при рождении в зоне i и столкновении в зоне j ; Σ_t^j — полное сечение в зоне j ; L_{ijj} — средняя

хорда, пройденная нейтроном в зоне j при рождении в зоне i и столкновении в зоне j ; LII_{jjj} — средняя хорда, пройденная нейтроном в зоне j при рождении в зоне j и столкновении в зоне j без прохождения других зон; A_{ij} — нормировочный коэффициент, который рассчитывается из условия равенства вероятностей P_{ij} , определенных по формуле (2) и прямым расчетом. Эти коэффициенты запоминаются после первого расчета и используются для расчета вероятностей при изменившихся полных сечениях.

Формула (2) для расчета вероятностей первых столкновений имеет простой физический смысл: первое слагаемое есть вероятность нейтронов, родившихся в зоне i , долететь до зоны j и испытать в ней столкновение, второе — вероятность нейтронов, родившихся в зоне i , испытать столкновение в ней же. Использование этой формулы для других сечений в сравнении с теми, при которых были рассчитаны реперные матрицы, ведет к изменению вероятностей в нужную сторону.

Подставим в формулу (2) новые сечения и скорректируем вероятности P_{ij} с учетом нормировки на единицу и соотношения взаимности. Скорректируем недиагональные элементы P_{ij}^* с помощью соотношения взаимности

$$P_{ij}^* = \frac{(P_{ij}^{(1)} V_i \Sigma_t^i + P_{ji}^{(1)} V_j \Sigma_t^j) 0,5}{V_i \Sigma_t^i}. \quad (3)$$

Тогда диагональный элемент матрицы

$$P_{ii}^* = 1 - \sum_{j \neq i}^N P_{ij}^*. \quad (4)$$

Новые матрицы используются для решения задачи переноса в прежней геометрии, но с новыми полными сечениями.

Нужные хорды в программе, реализующей данный метод, выбирают таким образом, чтобы полные макроскопические сечения в зонах наименьшим образом отличались от реперных. Для этого выбираются две наиболее близкие группы реперных сечений Σ_1 , Σ_2 с наименьшим среднеквадратичным отклонением

$$hi = \sum_{i=1}^N [\Sigma_i^g - \Sigma_i]^2,$$

где Σ_i^g — полные макроскопические сечения энергетической группы g , для которых требуется рассчитать матрицу вероятностей первых столкновений; Σ — полные макроскопические групповые сечения, для которых рассчитаны средние хорды. Суммирование проводится по всем геометрическим зонам. Средняя длина хорд и коэффициенты A_{ij} для подстановки в соотношение (2) корректируются простой интерполяцией

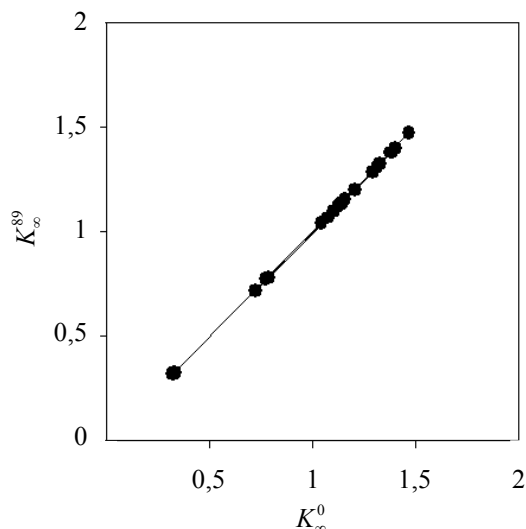
$$\langle X \rangle = \frac{X^{(1)}hi(\Sigma_1)^{-1} + X^{(2)}hi(\Sigma_2)^{-1}}{hi(\Sigma_1)^{-1} + hi(\Sigma_2)^{-1}},$$

где вместо $X^{(1)}$ и $X^{(2)}$ подставляются пары значений $I_{ijm}^{(1)}$ и $I_{ijm}^{(2)}$, $LII_{jjj}^{(1)}$ и $LII_{jjj}^{(2)}$, $A_{ij}^{(1)}$ и $A_{ij}^{(2)}$, выбранные для двух минимальных среднеквадратичных отклонений $hi(\Sigma_1)$ и $hi(\Sigma_2)$.

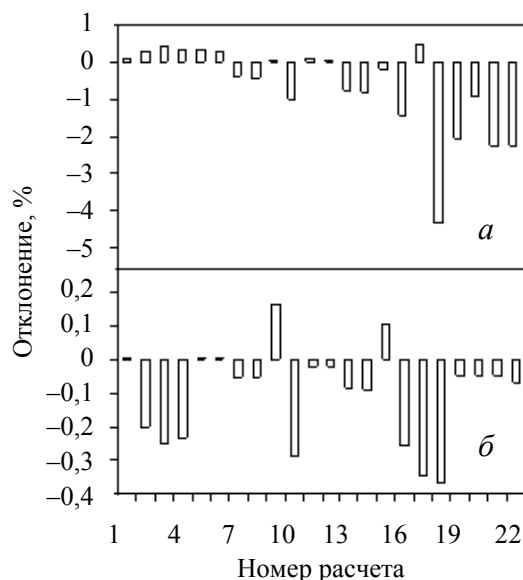
Полученные средние хорды и коэффициенты используются в восстановлении вероятностей для новых сечений Σ_i^g с помощью соотношений (2)—(4).

Эффективность разработанной методики проверена при расчете элементарной ячейки. Геометрию элементарной ячейки фиксировали, реперные матрицы вероятностей первых столкновений запоминали только для двух энергетических групп. Затем рассчитывали другие по материальному составу ячейки с использованием этих двух реперных матриц. Такой же расчет был выполнен и для случая, когда запоминали 89 реперных матриц вероятностей для всех энергетических групп. Рассчитали 25 ячеек разного состава, в которых коэффициент размножения изменялся от 0,3 до 1,5, и сравнили с расчетом с помощью аналитических формул (рис. 1).

Как видно на рис. 2, в случае расчетов только с двумя реперными матрицами погрешность не превышала 4,5%, в расчетах с 89 реперными матрицами максимальная погрешность составила 0,37%. Следует отметить, что сечения материалов в реперных расчетах в несколько раз отличались от аналогичных сечений для конкретной ячейки.

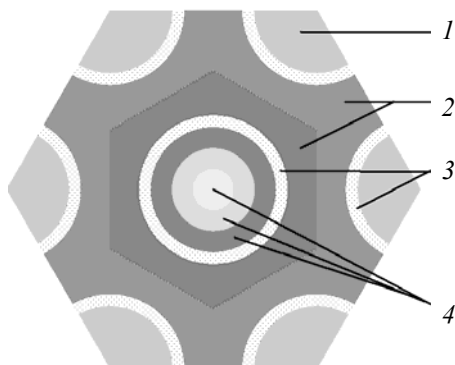


Р и с. 1. Коэффициент размножения нейтронов, рассчитанный по предлагаемой методике (●) и с помощью аналитических формул расчета матриц вероятностей первых столкновений (—)

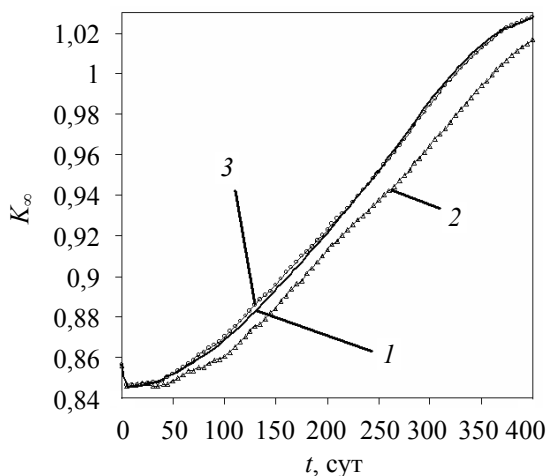


Р и с. 2. Отклонение коэффициента размножения нейтронов от точного расчета при использовании двух (а) и 89 реперных матриц вероятностей (б)

Определено выгорание фрагмента ТВС ВВЭР с гадолиниевым поглотителем с помощью расчета матриц вероятностей первых столкновений методом Монте-Карло на каждом шаге выгорания (он считался реперным), методики [3] и средних хорд (рис. 3). Каждый твэл с гадолиниевым поглотителем был разбит на три радиальные кольцевые зоны для более подробного расчета. Как видно из сравнения, методика восстановления вероятностей первых столкновений с использованием реперных хорд хорошо согласуется с реперным расчетом и обеспечивает лучшую точность (рис. 4, 5).

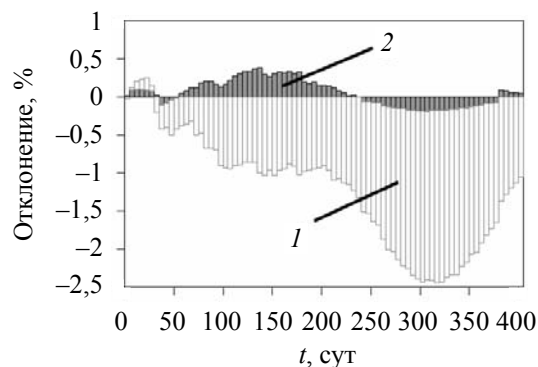


Р и с. 3. Фрагмент ТВС ВВЭР с выгорающим поглотителем: 1 — диоксидурановое топливо; 2 — вода; 3 — цирконий-ниобиевая оболочка; 4 — гадолиниевый поглотитель



Р и с. 4. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от времени выгорания ТВС ВВЭР, рассчитанная реперным методом с пересчетом методом Монте-Карло матриц вероятностей первых столкновений на каждом временном шаге (1), по методике [3] (2) и средних хорд (3)

Результаты расчета выгорания топлива, например, ТВС ВВЭР без сильных поглотителей с помощью этой методики совпадают с тестовыми. Отметим, что основной ресурс, который задействован при реализации методики средних



Р и с. 5. Относительное отклонение коэффициента размножения нейтронов, рассчитанного по методике [3] (1) и средних хорд (2), от реперного расчета в зависимости от времени выгорания

хорд, — это память ЭВМ, и ее использование вместо прямого расчета вероятностей методом Монте-Карло дает возможность существенно сократить время расчетов и выполнять их с высокой степенью детализации. Методика является детерминистической, что позволяет напрямую оценивать небольшие возмущения, важные для практического проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Davidenko V.D., Tsibulskiy V.F.** Detailed calculation of neutron spectrum in cell of a nuclear reactor. — In: Intern. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology. NY, 1998, p. 1755—1760.
2. **Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф.** Разработка программы детального расчета спектра нейтронов в элементарной ячейке ядерного реактора. — В сб.: Нейтроника-96. Обнинск, 1998, с. 168—173.
3. **Takahashi H.** Approximation for the calculation of the generalized first-flight collision probability. — Nucl. Sci. Engng, 1966, v. 26, p. 254—261.

Поступила в Редакцию 10.06.10

УДК 621.039.562

УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ В АЛГОРИТМАХ СИСТЕМЫ СКАЛА-Микро РБМК-1000

Александров С.И., Давыдов В.К., Постников В.В., Шубин Д.А. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)

В последнее время большое внимание уделяется повышению мощности энергоблоков с РБМК-1000. В связи с этим необходимо увеличение запасов до пределов безопасной эксплуатации, в частности, за счет применения более корректных алгоритмов восстановления радиально-азимутального распределения энергос-

деления в программе специального математического обеспечения «Призма-М», учитывающих спектральную чувствительность внутриреакторных детекторов с эмиттером из диоксида гафния [1].

Имеющийся алгоритм при расчете мощности технологических каналов не учитывает