

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РАСЧЕТА БЛАНКЕТОВ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

В.В.Коробейников

ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И.Лейпунского, г.Обнинск



Разработан универсальный алгоритм для физического расчета подкритических систем с внешним источником нейтронов методом Монте-Карло. Данный алгоритм позволяет эффективно рассчитывать электроядерные системы в широком диапазоне подкритичности. В работе содержится описание, теоретическое обоснование, способ реализации и результаты тестирования алгоритма на примере тестовых подкритических систем с внешним источником.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к рассмотрению установок, сочетающих интенсивный внешний источник нейтронов с подкритическим реактором в составе гибридных систем. Источник нейтронов предполагается получать путем облучения специальных мишеней, расположенных внутри подкритического реактора, пучками высокоэнергетических протонов или дейтронов от ускорителя (см., например, [1]-[3]). Подкритичность реактора рассматривается в настоящее время в качестве главного достоинства такого рода гибридных систем, поскольку считается, что она обеспечивает повышенную (по некоторым сообщениям и, вообще, абсолютную детерминированную) по сравнению с обычными критическими реакторами безопасность, что является приоритетным требованием.

Таким образом, возникает потребность в разработке эффективных алгоритмов метода Монте-Карло для подкритических систем с внешними источниками и произвольной величиной подкритичности.

В работе [4] приведено описание реализации эффективного подхода к расчету подкритических систем применительно к детерминистическим методам решения уравнения переноса. Метод Монте-Карло обладает рядом специфических особенностей по сравнению с обычными сеточными методами и, к сожалению, большинство приемов ускорения сходимости, развитых для детерминистических методов решения уравнения переноса, оказываются бесполезными при попытках применения их в методе Монте-Карло. Подходы, развитые в [4], оказались удобными при разработке новых эффективных алгоритмов Монте-Карло. Рассмотрим теоретические аспекты подхода к решению задачи о подкритической системе с внешним источником.

ТЕОРИЯ

При расчете подкритических систем с внешним источником обычно рассматривается уравнение вида:

© **В.В.Коробейников, 1999**

$$\hat{L}\Phi(x) = \hat{B}\Phi(x) + Q(x), \quad (1)$$

где
$$\hat{L}\Phi = \hat{\Omega} \nabla \Phi(r, E, \hat{\Omega}) + \Sigma \Phi(r, E, \hat{\Omega}) - \int dE' \int d\hat{\Omega}' \Sigma_s(E' \hat{\Omega}' \rightarrow E \hat{\Omega}, r) \Phi(r, E', \hat{\Omega}'),$$

$$\hat{B}\Phi = \int dE' \int d\hat{\Omega}' v \Sigma_f(r, E') \chi(r, E) \Phi(r, E', \hat{\Omega}')$$

- с нулевыми граничными условиями на внешней границе.

Для описания размножающих свойств таких систем многие авторы вводят величину k_s , определяемую из соотношения:

$$k_s = \frac{\langle \hat{B}\Phi \rangle}{\langle \hat{L}\Phi \rangle}. \quad (2)$$

Используя (1), можно переписать (2) в виде:

$$k_s = \frac{\langle \hat{B}\Phi \rangle}{\langle \hat{B}\Phi \rangle + \langle Q \rangle}, \quad (3)$$

где $\langle K \rangle$ - обозначает интегрирование по всем переменным в пределах объема рассматриваемой системы. Физический смысл соотношений (2) и (3) достаточно прозрачен: в числителе приведена полная скорость генерации нейтронов в результате деления, в знаменателе - скорость исчезновения нейтронов в результате поглощения и утечки, равная полной скорости появления нейтронов в результате деления и от внешнего источника. Величину k_s можно связать с традиционно используемой величиной умножения

$$Y = \frac{\langle B\Phi \rangle + \langle Q \rangle}{\langle Q \rangle}. \quad (4)$$

Используя (4) и (3), свяжем k_s и Y :

$$Y = \frac{1}{1 - k_s}. \quad (5)$$

Отметим, что величина k_s может существенно отличаться от k_{ef} . Действительно, умножение, а значит и k_s зависят от местоположения источника и его спектра. Запишем уравнение, сопряженное (1) и имеющее смысл ценности нейтронов по отношению к функционалу

$$I_{v\Sigma_f} = \langle \Phi v \Sigma_f \rangle, \quad (6)$$

$$\hat{L}^* \Phi^* = \hat{B}^* \Phi^*(x) + v \Sigma_f(x), \quad (7)$$

где

$$\hat{L}^* \Phi^* = -\hat{\Omega} \nabla \Phi^* + \Sigma_t \Phi^* - \int dE' \int d\hat{\Omega}' \Sigma_s(E \hat{\Omega} \rightarrow E' \hat{\Omega}', r) \Phi^*(r, E', \hat{\Omega}'),$$

$$\hat{B}^* \Phi^* = \int dE' \int d\hat{\Omega}' \chi(r, E') v \Sigma_f(r, E) \Phi^*(r, E', \hat{\Omega}').$$

Умножим уравнение (1) на F^* , а уравнение (7) на F и результат умножения проинтегрируем по всем переменным. Вычитая (7) из (1), получим:

$$\frac{\langle \Phi^* Q \rangle}{\langle Q \rangle} = \frac{\langle \hat{B} Q \rangle}{\langle Q \rangle} = \frac{k_s}{1 - k_s}. \quad (8)$$

Из (8) следует важный вывод: усредненная с весом внешнего источника ценность равна полному числу нейтронов деления, полученных от одного нейтрона внешнего источника. Соотношение (8) также показывает зависимость k_s от местонахождения и энергетической структуры внешнего источника.

Запишем теперь уравнение для ценности по отношению к асимптотической мощности реактора

$$\hat{L}^* \Phi_y^* = \frac{1}{k_{ef}} \hat{B}^* \Phi_y^*. \quad (9)$$

Проведя действия, подобные описанным выше при выводе соотношения (8), получим:

$$\frac{\langle \Phi_y^* \hat{B} \Phi \rangle}{\langle \Phi_y^* Q \rangle} = \frac{k_{ef}}{1 - k_{ef}}. \quad (10)$$

Из сравнения (8) и (10) следует, что k_{ef} может использоваться при описании умножения в подкритических системах в том случае, если $\Phi_y^* = \text{const}$. Расчеты методом Монте-Карло подкритических систем с внешним источником существенно усложняются, если k_s близко к единице. Традиционным подходом к решению уравнения (1) методом Монте-Карло является метод последовательных поколений [5]. В этом подходе

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n, \quad (11)$$

где Φ_n являются решениями уравнений вида:

$$\hat{L} \Phi_n = \hat{B} \Phi_{n-1}, \quad (12)$$

$$\hat{L} \Phi_0 = Q. \quad (13)$$

Реализация такого подхода в программах, основанных на методе Монте-Карло (см., например, ММКФК [5]) состоит в отказе от процедуры пополнения пакета нейтронов (как это делается при решении условно-критической задачи) и введении регистрации с весом w_n в оценках по столкновениям и длинам пробега:

$$w_n = w_{n-1} \frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a} (x_{n-1}) w_0 = 1, \quad (14)$$

где $x_{n-1} = (r_{n-1}, E_{n-1})$ - точка, в которой произошло поглощение нейтрона. Таким образом, в простейшей реализации нейтронная траектория в точках поглощения (в зоне с делением) не прерывается, а продолжается с весом до поглощения в зоне, не содержащей делящийся материал, или вылета из системы.

Такая схема, как отмечено в [5], приводит к неприемлемо большой дисперсии уже при подкритичности менее 10%. Более эффективной оказалась "безвесовая" схема одиночного прослеживания нейтронных траекторий с использованием приемов расщепления и рулетки, но и эта схема теряет свою эффективность при приближении k_s к единице.

Рассмотрим другой подход к решению задачи о подкритической системе с внешним источником. Перепишем уравнение (1) с использованием соотношения (8) в следующем виде [4]:

$$\hat{L} \Phi = \hat{B} \Phi + \frac{\langle \hat{B} \Phi \rangle}{\langle Q \rangle} \frac{1 - k_s}{k_s} Q, \quad (15)$$

которое полностью переходит в (1), если ϕ заменить на Φ и использовать (8). Однако (15) в отличие от (1) является однородным и удовлетворяет всем функциям вида:

$$\phi(x) = \Phi(x) \cdot C, \quad (16)$$

где $\Phi(x)$ - решение уравнения (1), а C - произвольная константа.

Преобразуем (15) к виду:

$$\hat{L}\phi = \frac{\langle \hat{B}\phi \rangle}{k_s} \left[k_s \frac{\hat{B}\phi}{\langle B\phi \rangle} + (1-k_s) \frac{Q}{\langle Q \rangle} \right]. \quad (17)$$

Проинтегрируем обе части (17) и с учетом равенства единице интеграла от выражения в квадратных скобках, получим:

$$\langle \hat{L}\phi \rangle = \frac{\langle \hat{B}\phi \rangle}{k_s}. \quad (18)$$

Поскольку уравнения (15) и (17) однородны, то можно выбрать нормировку $\phi(x)$ и сделать ее, например, такой, чтобы $\langle \hat{L}\phi \rangle = 1$. Тогда с учетом (18) можно (17) переписать в виде:

$$\hat{L}\phi = k_s \frac{\hat{B}\phi}{\langle B\phi \rangle} + (1-k_s) \frac{Q}{\langle Q \rangle}. \quad (19)$$

В уравнении (19) источник нейтронов представлен в виде суперпозиции двух нормированных на единицу распределений. Первый член - источник нейтронов деления, второй - внешний источник. Последнее соотношение открывает путь к решению задачи о подкритической системе, подобный тому, который используется при решении условно-критической проблемы.

Для более полной аналогии выпишем уравнение для плотности потока в условно-критической задаче:

$$\hat{L}\Phi_y = \frac{1}{k_{ef}} \hat{B}\Phi_y. \quad (20)$$

Подобно (18) можно записать:

$$\langle \hat{L}\Phi_y \rangle = \frac{1}{k_{ef}} \langle \hat{B}\Phi_y \rangle. \quad (21)$$

Используя те же принципы, что и при получении (19), запишем

$$\hat{L}\Phi_y = k_{ef} \frac{\hat{B}\Phi_y}{\langle \hat{B}\Phi_y \rangle} + (1-k_{ef}) \frac{\hat{B}\Phi_y}{\langle \hat{B}\Phi_y \rangle}. \quad (22)$$

Источник, стоящий в правой части, представлен суммой двух членов и нормирован на единицу. Трактовку соотношения (22) легко провести, если предположить, что полное число испускаемых нейтронов равно N . Тогда первый член в правой части будет представлять число нейтронов деления, образовавшихся в текущем поколении, если в предыдущем было испущено N нейтронов, и будет равен $k_{ef} \cdot N$. Второй член равен $(1-k_{ef}) \cdot N$ и соответствует числу нейтронов, которые нужно добавить, чтобы их количество было равно выпущенному в предыдущем поколении, т.е. N . Эта добавка делается из распределения нейтронов деления, т.е. того же распределения, что и в первом члене. Такая повторяющаяся для всего набора рассчитываемых поколений процедура обыч-

но используется в программах, основанных на методе Монте-Карло. Заметим, что при $k_{\text{ef}} > 1$ расчетная процедура видоизменяется: второй член в (22) становится отрицательным и вместо добавления до исходного числа N требуется, наоборот, убавить $(k_{\text{ef}} - 1)N$ нейтронов.

Подобный приведенному выше при $k_{\text{ef}} < 1$ подход предлагается использовать и при решении задачи о подкритической системе с внешним источником. Сравнивая (22) и (19), можно построить итерационную процедуру:

$$\hat{L}\varphi_n = k_{s_{n-1}} \frac{\hat{B}\varphi_{n-1}}{\langle \hat{B}\varphi_{n-1} \rangle} + (1 - k_{s_{n-1}}) \frac{S}{\langle S \rangle}, \quad (23)$$

где

$$k_{s_{n-1}} = \langle \hat{B}\varphi_{n-1} \rangle, \quad (24)$$

в которой в каждом поколении поддерживается постоянное число нейтронов. Действительно, из формул (19), (23), (24) следует, что при стационарно работающей системе из N рождающихся нейтронов $k_s \cdot N$ будут нейтронами деления, а $(1 - k_s) \cdot N$ - нейтронами внешнего источника. Таким образом, если в текущем поколении будет испущено N нейтронов, то $k_s \cdot N$ нейтронов получившихся в следующем поколении нужно дополнить $(1 - k_s) \cdot N$ нейтронами до исходного числа N . Эта процедура должна повторяться в процессе расчета поколений нейтронов.

При расчете величины k_s используются те же оценки, что и в стандартном расчете k_{ef} .

Рассмотренный выше подход реализован в программном комплексе ММКФК и содержит следующие основные этапы:

- моделирование некоторого количества предварительных поколений с целью установления начального распределения источников деления; вклады в рассчитываемые функционалы при моделировании нейтронных траекторий на данном этапе не делаются.
- моделирование основных поколений с вычислением вкладов в рассчитываемые функционалы.

В каждом поколении (как предварительном, так и основном) из полного числа N нейтронов деления выбирается $k_s \cdot N$ нейтронов деления. Из полного числа N нейтронов внешнего источника выбирается $(1 - k_s) \cdot N$ нейтронов.

Универсальность алгоритма состоит в его "автоматическом переходе" в условно-критическую опцию при $k_{\text{ef}} > 1$.

Заметим, что в результате решения методом Монте-Карло уравнения (19) мы получим плотность потока нейтронов и функционалы плотности потока, нормированные на один нейтрон, являющийся с вероятностью k_s нейтроном деления, и с вероятностью $(1 - k_s)$ - нейтроном внешнего источника. Для того, чтобы привести наш результат к исходной постановке, нужно воспользоваться следующим очевидным соотношением:

$$\Phi(x) = \frac{\langle Q \rangle}{1 - k_s} \varphi(x). \quad (25)$$

Такая же связь будет и для линейных функционалов плотности потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации работоспособности разработанного метода было проведено две серии расчетов. Первая тестовая задача предназначалась для тестирования метода в условиях, когда k_s должно совпадать с k_{ef} . Для этой цели использовалась система бесконечных размеров с внешним источником, распределенным по спектру деления. Тестовая система рассчитывалась по двум опциям программы ММКФК. В первом случае ре-

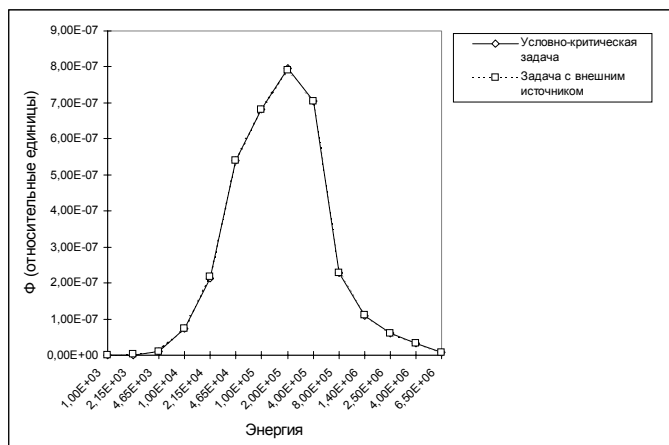


Рис.1. Сравнение результатов решения тестовой задачи:
 $k_{\text{eff}} = .9855 \pm 0.0013$; $k_s = .9854 \pm 0.0013$

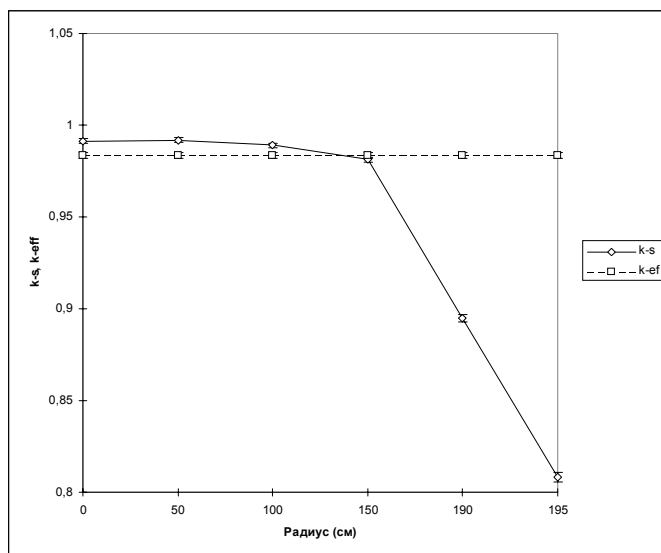


Рис.2. Зависимость k_s от местоположения внешнего источника

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе универсальный подход к расчету подкритических систем с внешним источником внедрен в практику серийных исследований физических характеристик бланкетов электроядерных установок.

Результаты большого числа расчетов показали его работоспособность и эффективность.

Применение разработанного подхода может быть эффективным при анализе экспериментов, проводимых на критических сборках и реакторах в подкритических условиях.

Автор выражает глубокую благодарность К.Ф.Раскачу и Г.Я.Румянцеву за многочисленные плодотворные обсуждения данной проблемы.

Список литературы

1. Адо Ю.М., Крючков В.П., Лебедев В.Н. Энергетический подкритический ядерный реактор сподсветкой пучком ускоренных протонов // Атомная энергия. – 1994. – Т.77. – Вып.4. – С.300-308.

шалась стандартная условно-критическая задача, а во втором использовалась описанная выше процедура расчета систем с внешним источником. На оба расчета было затрачено примерно одинаковое время ЭВМ. На рис.1 приведены результаты расчетов нейтронных спектров, а также величины k_s и k_{eff} . Видно полное совпадение результатов в пределах статистических ошибок метода Монте-Карло.

Во второй серии рассчитывалась подкритическая система, состоящая из смеси ^{235}U , ^{238}U и графита в цилиндрической геометрии. Исследовалась зависимость k_s от местоположения внешнего источника. Результаты расчетов приведены на рис.2. Из результатов расчетов, как и следовало ожидать, наблюдается уменьшение k_s при перемещении внешнего источника из центра системы к ее внешней границе. На этом же рисунке для наглядности приведено k_{eff} .

2. *Slesarev I.S.* Accelerator Driven System (ADS): a Principal Neutronics and Transmutation Potential. In Status of the Accelerator-Driven System (ADS). Working Material 622-13CT2065, CT2283 and CT2429, IAEA, Vienna Austria. - 1996. - P.74-82.
3. *Rubbia C., Buono S., Gonzalez E., Kadi Y.* A Realistic Plutonium Elimination Scheme with Fast Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium Fuel. CERN/AT/95-53(ET).
4. *Раскач К.Ф., Коробейников В.В.* Эффективный метод решения задачи о подкритическом реакторе с внешним источником//Атомная энергия. – 1998. - Т.85. - Вып.6.
5. *Полевой В.Б.* МОНИСТО - редакция программы ММК-22 для расчета глубоко подкритических систем с источником//ВАНТ. Сер.: Физика и техника ядерных реакторов. – 1981. - Вып.8(21).

Поступила в редакцию 7.06.99.

interaction with atmospheric precipitation are chosen. Quantitative estimations of a ratio of these factors in the real atmosphere are given.

УДК 541.64:541.183

Study of Influence of Alkaline Hydrolysis Products in Production of Track Membranes on the Basis of Polyethyleneterephthalate Films \T.E. Laricheva, A.A. Machula, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 10 titles.

The influence of ethyleneglycol (EG) and terephthalate ions (TPI), generated during an alkaline hydrolysis of polyethyleneterephthalate films, on the process of formation of track membranes is investigated. It is shown that TPI do not influence on the velocity of chemical etching polymer and of the latent tracks (LT). At the same time the kinetics of chemical etching polymer and of the LT essentially depends on the concentration of EG in etching solution. As a result accumulation of EG in the etching solution the selectivity of the process becomes worse along with the change of characteristics of track membranes.

УДК 539.172.8

Study of Phase Distribution of Initial and Final States of Multiparticle Systems in the Monte-Carlo Method of Classical Trajectories \A.E. Yanovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 14 illustrations. - References, 5 titles.

The results of calculation of phase distribution of reaction fragments simulated by three and four-particle models within the method of classical trajectories are represented in the paper.

УДК 621.039.525; 621.039.534.6

Universal Algorithm of the Monte-Carlo Method for Calculation of Blankets of Accelerator-Driven Systems \V.V. Korobeinikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 illustrations. - References, 5 titles.

The universal algorithm for physical calculation of subcritical systems with an external source of neutrons by the Monte-Carlo method is developed. This algorithm is effective in calculation of accelerator-driven systems within a wide range of subcriticality. Description, theoretical evidence, method of realization, and results of testing of the algorithm for the test subcritical systems with an external neutron source are given in the paper.

УДК 621.039

On the Method of Determination of Physical Characteristics of a Nuclear Reactor under Slow Reactivity Perturbation \N.A. Vinogorov, D.N. Jukovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 3 illustrations. - References, 5 titles.

The method of determination of nuclear reactor characteristics under slow reactivity perturbation by means of measurement of the parameter providing the feedback is presented.

The application of the method is demonstrated by examples of estimation of the poisoning effect of xenon-135 and barometric reactivity coefficient for VVR.

УДК 621.039.553.34

Study of Dependence of Wall Temperature in the Technological Channel of the RBMK-Reactor on the Gas Clearance between the channels and Graphite Blocks \A.I. Trofimov, S.A. Vinogradov, I.A. Tchusov, V.I. Belozerov, M.A. Trofimov, I.A. Shvetsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 1 table, 15 illustrations. - References, 5 titles.

Theoretical and experimental proof of the usage of data on the temperature field distribution over the inner surface of a technological channel (TC) for evaluating the size of the gas clearance in RBMK-reactors are considered in the paper. The calculations performed using k- ϵ turbulence model, showed that the size of the gas clearance considerably affects the temperature distribution over the length of the TC.