

УДК 519.245

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ЦЕННОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ "ПРИЗМА" ЗАДАЧ ГЛУБОКОГО ПРОХОЖДЕНИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ ФИЗИКИ

О. В. Зацепин, Я. З. Кандиев
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ", г. Снежинск Челябинской области)

Дается обзор методов, применяемых при решении задач глубокого прохождения и детектирования по программе ПРИЗМА. Описаны особенности некоторых задач реакторной физики, принадлежащих этим классам и потребовавших развития методики моделирования по ценности. В целях подтверждения корректности усовершенствованной методики приводится решение тестовых задач. Рассмотрено решение прикладных задач оценки сигналов внеакторных детекторов от источников нейтронов, размещаемых в активной зоне ВВЭР-1 000, и внутриакторных детекторов ВВЭР-1 000.

Ключевые слова: перенос частиц, метод Монте-Карло, моделирование по ценности, глубокое прохождение, детектирование, программа ПРИЗМА, ВВЭР-1 000.

Введение

В программе ПРИЗМА [1, 2] более 30 лет успешно применяется методика моделирования по ценности [1, 3]. В настоящее время продолжается ее развитие. Методика разработана с учетом того, что для вычисления функционалов в программе используются оценки по посещениям, т. е. оценки, вклады в которые отличны от нуля только для траекторий частиц, пересекающих область или поверхность интегрирования (детектор). Выделены три класса элементарных задач, для решения которых необходимо применять технику моделирования по ценности. Для них разработаны методы вычисления приближенной функции ценности и параметров смещенных распределений.

Задачи, требующие применения различных методов моделирования, решаются с помощью аппарата управления счетом. Этот аппарат позволяет проводить один сквозной расчет сложной задачи, применяя методы решения элементарных подзадач в зависимости от заданных условий, а также типа моделируемых в расчете частиц (нейтронов, фотонов, электронов, позитронов, ионов).

В последнее десятилетие программа ПРИЗМА развивается в направлении полномасштаб-

ного моделирования ядерных энергетических реакторов [2, 4]. Среди различных типов задач реакторной физики представляют интерес задачи расчета защиты от излучения и моделирования регистрации излучения. Для их решения расширены возможности методики моделирования по ценности. В частности, разработан метод углового смещения в детектор, представляющий собой конечный или бесконечный прямой круговой цилиндр малого радиуса.

В настоящей работе дается обзор современного состояния методики моделирования по ценности для программы ПРИЗМА и примеры ее применения для решения задач глубокого прохождения и детектирования излучения в реакторах.

Особенности методики моделирования по ценности

Сложность решения задач детектирования и глубокого прохождения методом Монте-Карло связана с малой вероятностью пересечения детектора траекториями частиц. С учетом особенностей оценок, применяемых в программе ПРИЗМА, целью применения моделирования по ценности является повышение этой вероятности с минимизацией флуктуаций статистических ве-

сов. Для этого применяются методы неаналогового моделирования, позволяющие увеличивать плотность моделируемых частиц, направленных в детектор и достигающих его, а также контролировать вес частиц. Опишем кратко общую методику моделирования по ценности, применяемую в программе ПРИЗМА.

Общая методика моделирования по ценности включает в себя следующие алгоритмы:

- вычисление приближенной функции ценности и соответствующей весовой функции;
- моделирование траекторий частиц с использованием распределения источника и ядра перехода из одной точки фазового пространства в другую, соответствующих функции ценности;
- приведение статистического веса частиц на различных этапах моделирования траекторий.

Наиболее сложными шагами являются вычисление функции ценности, а также построение неаналоговых распределений и алгоритмов выборки из них.

Для упрощения практической реализации выделены три класса элементарных задач, характеризующиеся специфическими способами вычисления функции ценности и методами моделирования траекторий частиц:

- 1) прохождение частиц через большие оптические толщины;
- 2) моделирование процессов взаимодействия, имеющих малые вероятности;
- 3) регистрация излучения в детекторах, видимых из источника под малым телесным углом.

Для решения задач указанных классов разработаны алгоритмы вычисления приближенной функции ценности и построения переходных распределений. Развита методика неаналогового моделирования, которые включают в себя экспоненциальное преобразование, метод вынужденных столкновений, смещение углового распределения, смещение вероятностей процессов взаимодействия, расслоенную выборку [1]. Для решения сложных задач, относящихся одновременно к нескольким классам, разработаны способы выделения элементарных подзадач. Расчет исходной задачи производится путем построения траекторий частиц с помощью методов моделирования, соответствующих элементарной подзадаче, в рамках которой находится частица.

Далее изложим частные методы моделирования по ценности, применяемые для решения задач двух классов (1 и 3), рассматриваемых в настоящей работе.

Решение задач глубокого прохождения.

Для решения задач прохождения через оптически толстые преграды главным образом применяется метод моделирования, основанный на экспоненциальном преобразовании. Для вычисления весовой функции и неаналоговых распределений задается упрощенная геометрия, в которой описывается область детектора, накрывающая детектор исходной задачи, а также однородные слои пространства, окружающие эту область. При этом моделирование траекторий осуществляется в геометрии исходной задачи, а упрощенная геометрия используется только для вычисления параметров распределения длины свободного пробега и весовой функции. Для уменьшения флуктуаций статистического веса частиц и приведения его к весовой функции применяются методы рулетки и расщепления [1].

Введено пять типов упрощенной геометрии детектора:

- одномерная:
 - плоская;
 - сферическая;
 - цилиндрическая;
- двумерная — прямой круговой цилиндр, ограниченный плоскостями;
- трехмерная — прямоугольный параллелепипед.

Решение задач регистрации излучения.

Для моделирования регистрации излучения детекторами, видимыми из источника под малым телесным углом, разработан метод, основанный на применении метода концентрических детекторов [1]. Так же, как для задач глубокого прохождения, для вычисления весовой функции и неаналоговых распределений задается упрощенная геометрия.

Выделены четыре типа геометрии детектора, наиболее часто встречающиеся в задачах регистрации излучения в реакторной физике:

- одномерная:
 - плоская;
 - сферическая;
 - цилиндрическая;

— двумерная — прямой круговой цилиндр, ограниченный плоскостями.

Для этих типов детекторов разработаны методы вычисления приближенной функции ценности.

В целях повышения эффективности применяется расслоенная выборка направления частиц источника и вторичных частиц при взаимодействиях. Также применяется приведение статистического веса частиц.

Сравнение эффективности аналогового и неаналогового расчетов

При решении трудоемких задач с помощью методики моделирования по ценности представляет интерес оценка выигрыша в эффективности, полученного в результате применения методики. Стандартным способом оценки является проведение аналогового и неаналогового расчетов и вычисление выигрыша, равного отношению коэффициентов эффективности

$$F = \frac{1}{s^2 t}, \quad (1)$$

где s — относительная статистическая погрешность уровня 1σ ; t — время счета.

Однако нередко рассматриваются задачи, решить которые аналоговым способом и вычислить коэффициент эффективности (1) за приемлемое время не представляется возможным. В таких случаях для получения приближенного значения выигрыша неаналогового расчета по сравнению с аналоговым рассматривается задача о вычислении вероятности P попадания частицы в детектор с помощью двоичной оценки. Такая оценка равна 1 для историй частиц, попадавших в детектор, и 0 для остальных историй. Для этой оценки

$$s_a^2 \approx \frac{1}{PN}, \quad (2)$$

где s_a — относительная статистическая погрешность в аналоговом расчете; N — число промоделированных историй частиц.

Используя выражения (1) и (2), получаем следующую формулу для выигрыша:

$$k = \frac{s_a^2 t_a}{s_n^2 t_n} \approx \frac{t_1}{P s_n^2 t_n}, \quad (3)$$

где s_n — относительная статистическая погрешность в неаналоговом расчете; t_n — время неаналогового расчета; t_a — время аналогового расчета; t_1 — среднее время моделирования одной

истории в аналоговом расчете, которое оценивается без больших затрат времени и вычислительных ресурсов.

Тестирование и применение методики

В целях подтверждения корректности усовершенствованной методики рассматривается ее применение для решения ряда тестовых и прикладных задач.

Тестовая задача 1. Рассматривается бесконечная однородная среда с двумя типами взаимодействия: изотропное рассеяние с вероятностью $p_s = 0,9$ и поглощение с вероятностью $p_a = 0,1$; полное макроскопическое сечение взаимодействия $\Sigma = 1 \text{ см}^{-1}$. Требуется оценить интегральный по поверхности поток частиц $\Phi(r) = 4\pi r^2 \phi(r)$ ($\phi(r)$ — плотность потока частиц) от точечного изотропного источника, расположенного в начале координат, на сферических поверхностях с радиусами $r = 20, 40, 60, 80, 100$ см. Также требуется оценить интегральный поток частиц $\Phi(r) = 4\pi r^2 \phi(r)$ на границе *среда—вакуум* в конечных системах, ограниченных указанными поверхностями.

Все задачи решались в одном расчете по программе ПРИЗМА. Применялась техника экспоненциального преобразования с приведением статистического веса частиц перед соударением и после соударения. Также применялся метод коррелированных расчетов с мечеными частицами, позволяющий решать набор вариантов задачи в одном расчете [5].

В табл. 1 приведены расчетные и асимптотические значения потока в бесконечной среде [6], а также расчетные значения потока для задач с конечной средой. В скобках приводятся относительная статистическая погрешность (1σ) в процентах. Выигрыш k неаналогового расчета задачи с конечной средой по сравнению с аналоговым расчетом, вычисленный по формуле (3), для $r = 100$ см составил $O(10^{16})$.

В целях тестирования метода моделирования регистрации излучения в малых детекторах рассмотрен способ вычисления плотности потока в точке путем усреднения этой величины в шаре достаточно малого радиуса. Проведен расчет задачи с бесконечной средой для случая $r = 50$ см. Радиус шара, в котором вычислялась средняя плотность потока, был равен $0,1$ см. Применялась техника экспоненциального преобразования

и метод концентрических детекторов с приведением статистического веса. Результат приведен в табл. 2.

Таблица 1

Решения задач с бесконечной и конечной средой

r , см	$\Phi(r)$		$\tilde{\Phi}(r)$
	асимптотическое	расчетное	расчетное
20	$1,377261 \cdot 10^{-3}$	$1,377281 \cdot 10^{-3}$ (0,0020)	$6,344049 \cdot 10^{-4}$ (0,0018)
40	$7,520092 \cdot 10^{-8}$	$7,520072 \cdot 10^{-8}$ (0,0024)	$3,463950 \cdot 10^{-8}$ (0,0022)
60	$3,079581 \cdot 10^{-12}$	$3,079556 \cdot 10^{-12}$ (0,0034)	$1,418535 \cdot 10^{-12}$ (0,0027)
80	$1,121005 \cdot 10^{-16}$	$1,121016 \cdot 10^{-16}$ (0,0037)	$5,163564 \cdot 10^{-17}$ (0,0034)
100	$3,825559 \cdot 10^{-21}$	$3,825410 \cdot 10^{-21}$ (0,0049)	$1,762138 \cdot 10^{-21}$ (0,0044)

Таблица 2

Сравнение расчетного и асимптотического решений для $r = 50$ см

$\Phi(r)$		k
асимптотическое	расчетное	
$4,911587 \cdot 10^{-10}$	$4,911333 \cdot 10^{-10}$ (0,017)	$O(10^{13})$

Тестовая задача 2. Рассматривается задача о вычислении выхода нейтронов из полиэтиленового шара радиусом R с плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$. Температура полиэтилена $0,0251 \text{ эВ}$. Источник точечный (в центре шара), изотропный, мгновенный; энергетическое распределение — спектр Уатта $f(E) = Ce^{-E} \sin h\sqrt{2E}$, $E \in [2,5 \cdot 10^{-8}; 15] \text{ МэВ}$.

Учитываются температура среды и химическая связь. В расчете используются константы из библиотек ENDF/B-VI, VII [7]. Применяется смещение распределения энергии частиц источника и техника экспоненциального преобразования с приведением статистического веса.

На рис. 1 приведены значения выхода нейтронов, полученные в аналоговом и неаналоговом расчетах. Для радиуса более 150 см не удалось получить решение аналоговым способом в связи с высокой трудоемкостью задачи.

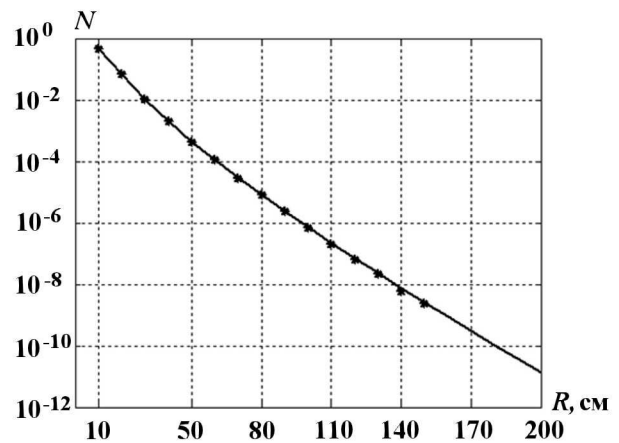


Рис. 1. Зависимость выхода нейтронов N от радиуса шара R : — — неаналоговый расчет; * — аналоговый расчет

Статистическая погрешность в неаналоговом расчете для всех значений радиуса не превышает $0,5\%$. Разность результатов укладывается в рамки соответствующей статистической погрешности (3σ). Для $R = 200 \text{ см}$ получен выигрыш в эффективности $k = O(10^8)$.

Задача об оценке сигналов внеакторных детекторов реактора ВВЭР-1000. Рассматривается трехмерная модель реактора ВВЭР-1000 [4] в подкритическом состоянии с тремя симметрично расположенными источниками. Активная зона окружена отражателем, цилиндрическими слоями воздуха, изоляции и бетона, как показано на рис. 2 (см. также цветную вкладку). Отдельный внеакторный детектор моделируется тонким прямоугольным па-

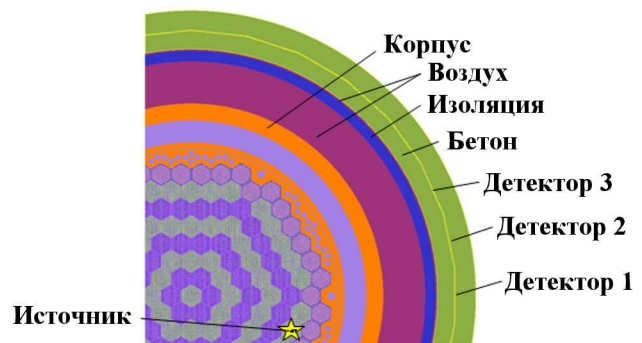


Рис. 2. Фрагмент горизонтального сечения расчетной модели реактора

раллелепипедом, выделяемым в бетонной защите и расположенным на уровне топлива. Рассматривается 30 детекторов, регистрирующих угловую зависимость потока нейтронов в двух энергетических группах: ниже и выше 0,625 эВ. В расчете используются константы из библиотек ENDF/B-V, VII [7]. Учитываются температура и химическая связь.

В рассматриваемой задаче нейтроны источника до попадания в детекторы проходят через среду с большой оптической толщиной. При решении применяется техника экспоненциального преобразования с процедурой приведения статистического веса частиц. Весовая функция задана в цилиндрических координатах как функция расстояния от вертикальной оси реактора. Значения этой функции вычислены таким образом, чтобы передавать ослабление потока нейтронов, проходящих через преграду. Также введены цилиндрические поверхности фиктивных соударений, т. е. поверхности, при пересечении которых осуществляется процедура приведения статистического веса.

Помимо экспоненциального преобразования, для повышения эффективности расчетов применяется метод замены размножения нейтронов на делениях статистическим весом с введением весовой функции, зависящей от номера поколения нейтронов деления. Данный метод позволяет уменьшать размножение моделируемых нейтронов и повышать скорость моделирования историй частиц.

Применение указанных методов позволило получить выигрыш в эффективности по сравнению с аналоговым расчетом порядка 10^2 – 10^3 (здесь он оценивался как отношение F двух расчетов).

На рис. 3 приведено решение, полученное по программе ПРИЗМА. Видно, что оно обладает 120-градусной поворотной симметрией, что соответствует физической постановке задачи. При этом в расчете задавалась полная модель реактора и не осуществлялось усреднения с учетом симметрии.

Отметим, что полученные результаты хорошо согласуются с решением этой задачи по программе MSU [8].

Задача об оценке сигналов внутриреакторных детекторов. Одной из задач, потребовавших развития методики моделирования по ценности, стала оценка показаний родиевых датчиков системы внутриреакторного контроля реактора ВВЭР-1000. Для моделирования работы

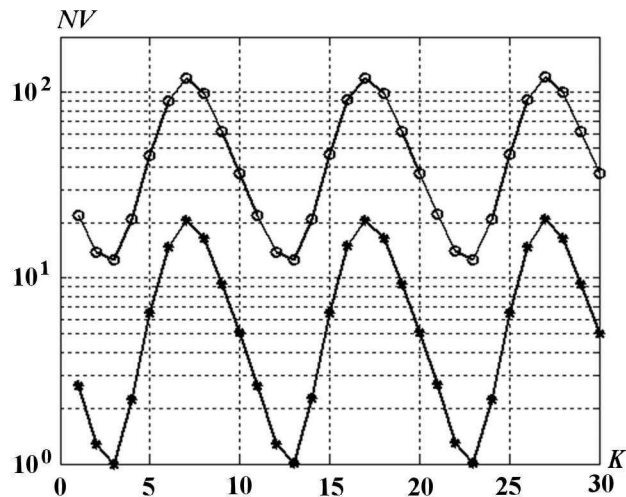


Рис. 3. Зависимость потока NV (в относительных единицах) от номера детектора K в двух энергетических группах: —○— — первая группа; —*— — вторая группа

детекторов необходимо выполнить нейтронно-физический расчет задачи критичности, в котором вычисляется скорость поглощения нейтронов в родии. Особенностью задачи является то, что модель каждого детектора представляет собой конечный прямой круговой цилиндр, радиус r которого очень мал по сравнению с высотой h ($r/h = O(10^{-4})$). Более того, каждый детектор может быть разбит на ячейки по высоте и радиусу. Вычисление скорости поглощения нейтронов в столь малых ячейках аналоговым способом является весьма трудоемкой задачей.

С целью повышения эффективности решения задач такого типа были разработаны алгоритмы углового смещения и вычисления весовой функции для двух новых типов детектора:

- бесконечного прямого кругового цилиндра;
- прямого кругового цилиндра, ограниченного плоскостями.

Рассматривались различные варианты постановки задачи.

Первый вариант — моделирование бесконечной двумерной решетки тепловыделяющих сборок (ТВС) бесконечной длины. Задавалась модель одной ТВС с граничными условиями зеркального отражения (рис. 4, см. также цветную вкладку). Детектор разбит на 10 равнообъемных цилиндрических слоев.

Для решения задачи в такой постановке применялось угловое смещение в бесконечный ци-

цилиндрический детектор с приведением статистического веса частиц к значению функции от координат и направления. Также для уменьшения флуктуаций веса вводились цилиндрические поверхности фиктивного соударения с приведением веса. Применение такой схемы моделирования позволило получить выигрыш (отношение F неаналогового и аналогового расчетов) порядка 10^3 .

Второй вариант задачи представляет собой моделирование показаний детектора одной ТВС в полномасштабной трехмерной модели активной зоны (рис. 5, 6, см. также цветную вкладку). Детектор разбит на 70 равнообъемных ячеек: 7 интервалов по высоте и 10 — по радиусу.

В отличие от первого варианта в этом случае применялось угловое смещение в конечный цилиндрический детектор. Получен выигрыш в эффективности порядка 10^2-10^3 (в зависимости от расположения детектора в активной зоне).

В третьем варианте задачи требуется оценить скорости поглощения нейтронов в детекторах 32 ТВС в полномасштабной трехмерной модели

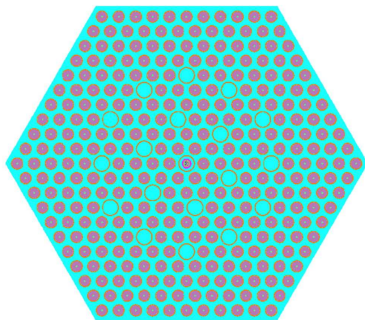


Рис. 4. Модель ТВС с детектором в центральном канале

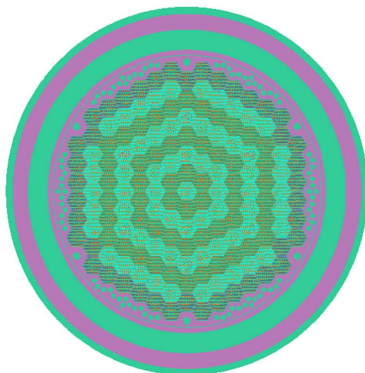


Рис. 5. Горизонтальное сечение модели активной зоны

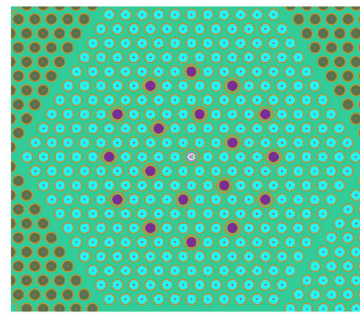


Рис. 6. Фрагмент модели активной зоны. В центре сборки — канал с детектором

активной зоны. Задача осложняется тем, что детекторы распределены в пространстве, и для ее решения требуется более сложная схема моделирования. Для построения такой схемы выделены 32 подзадачи, каждая из которых соответствует одному детектору. Для каждой подзадачи задана простая схема моделирования с применением углового смещения в конечный цилиндр и поверхностей фиктивного соударения. С помощью аппарата управления счетом программы ПРИЗМА задана общая схема для решения исходной задачи в одном расчете. Были проведены два расчета: неаналоговый и аналоговый (с меньшей точностью). Сравнение эффективности показало, что выигрыш в этом случае также имеет порядок 10^2-10^3 .

На рис. 7 представлено распределение скорости поглощения нейтронов по ячейкам одного из детекторов. Статистическая погрешность составляет $\sim 0,5\%$. Во всех расчетах разность результатов, полученных аналоговым и неаналоговым способами, не превышает соответствующей статистической погрешности (3σ).

Заключение

Рассмотренная методика моделирования по ценности позволяет решать по программе ПРИЗМА задачи детектирования и глубокого прохождения в области реакторной физики. При этом существенно повышается эффективность расчетов таких задач.

Корректность усовершенствованной методики подтверждается тестовыми расчетами. Методика применяется для решения задач прохождения и регистрации излучения в полномасштабных моделях ядерных реакторов.

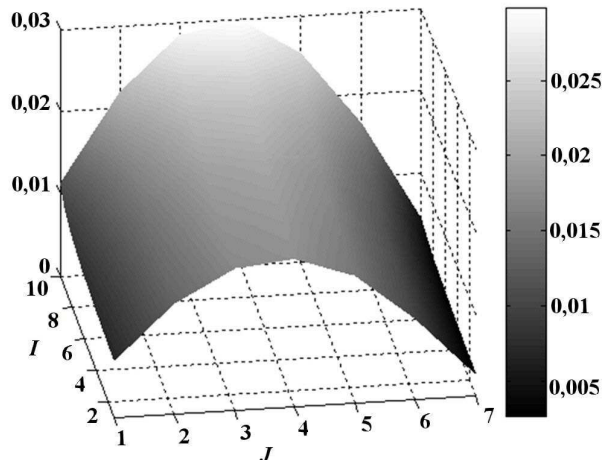


Рис. 7. Распределение скорости поглощения нейтронов по ячейкам детектора (относительные единицы); I — номер ячейки по радиусу; J — номер ячейки по высоте

Список литературы

1. *Arnautova M. A., Kandiev Ya. Z., Lukhminsky B. E., Malyshkin G. N.* Monte Carlo simulation in nuclear geophysics. Incomparision of the PRIZMA Monte Carlo program and benchmark experiments // Nuclear Geophysics. 1993. Vol. 7, No. 3. P. 407—418.
2. *Kandiev Y. Z., Kashaeva E. A., Khatuntsev K. E. et al.* PRIZMA Status // Proceedings "Joint international conference on supercomputing in nuclear applications and Monte Carlo". 27—31 October 2013, Paris, France.

3. *Кандиев Я. З.* Неаналоговое моделирование в программе ПРИЗМА // Тез. докл. 8-го Всесоюз. совещания "Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике". Новосибирск, 19—21 февраля 1991 г. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1991. С. 42—45.
4. *Зацепин О. В., Калугин М. А., Кандиев Я. З. и др.* Полномасштабная математическая модель переноса нейтронов в активной зоне реактора ВВЭР-1000, основанная на методе Монте-Карло и реализованная на многопроцессорных ЭВМ // Тез. межд. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". Подольск, 26—29 мая 2009 г. Подольск: ОКБ "ГИДРОПРЕСС", 2009. С. 77—78.
5. *Кандиев Я. З., Серова Е. В.* Меченые частицы в расчетах переноса излучения методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 5. С. 386—393.
6. *Кейз К., Цвайфель П.* Линейная теория переноса. М.: Мир, 1972.
7. IAEA Nuclear Data Centre. <http://www-nds.iaea.org>.
8. *Алексеев Н. И., Большагин С. Н., Голмин Е. А. и др.* Статус МСУ-5 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2011. Вып. 4. С. 4—23.

Статья поступила в редакцию 11.03.14.

VALUE-BASED MODELING TECHNIQUE FOR REACTOR PHYSICS SIMULATIONS OF DEEP PENETRATION AND DETECTION USING THE "PRIZMA" CODE / O. V. Zatsepin, Ya. Z. Kandiev (FSUE RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Chelyabinsk region).

This paper provides an overview of the methods for deep penetration and detection simulations using the PRIZMA code and describes specific features of some reactor physics problems belonging to these classes and requiring the development of the value-based modeling technique. To prove the validity of the improved technique, benchmark solutions are presented. Applied simulations to estimate signals of out-of-core detectors from neutron sources located in the core of VVER-1000 and in-core detectors of VVER-1000 are considered.

Keywords: particle transport, Monte Carlo method, value-based modeling, deep penetration, detection, PRIZMA code, VVER-1000.