

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В АППАРАТАХ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.Р. Хусаинов, Е.А. Парфентьев

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Производственное объединение «Маяк»
Российская Федерация, 456780, Озерск, пр. Ленина, 31
cpl@po-mayak.ru*

Поступила в редакцию 19 марта 2014 г.,
после исправлений – 28 мая 2014 г.

С целью оценки возможности использования программного кода MCNP для многовариантного расчетного моделирования ядерно-физических измерений при дистанционном аналитическом контроле делящихся материалов проведена его апробация для компьютерного моделирования методом Монте-Карло нейтронных измерений в экспериментах по физическому моделированию распределения плутония в жидкостных многофазных подкритических системах в аппаратах радиохимического производства.

В работе рассмотрена методика расчетного моделирования переноса нейтронного излучения методом Монте-Карло. Обоснован выбор использования программного кода MCNP.

Описаны установки физического моделирования распределения плутония в растворах с концентрацией до несколько единиц г/л и соответствующие им трехмерные компьютерные модели. Физическое моделирование раствора с концентрацией плутония до 1 г/л проводилось на установке, состоявшей из заполненной водой цилиндрической емкости, плутоний-бериллиевого источника быстрых нейтронов типа ИБН и измерительной аппаратуры. Компьютерная модель включала в себя заполненную водой цилиндрическую емкость, гелиевый счетчик и окружавший их воздух. Физическое моделирование распределения плутония в растворах с концентрацией в несколько единиц г/л проводилось на установке, состоявшей из заполненной водой цилиндрической емкости, заполненных азотнокислым раствором плутония специальных кювет и измерительной аппаратуры. Компьютерная модель включала в себя заполненную водой цилиндрическую емкость, кюветы с азотнокислым раствором плутония, гелиевый счетчик и окружавший их воздух.

Приведены результаты сравнения «физических» и «компьютерных» измерений распределения нейтронных полей. Полученная удовлетворительная сходимости расчетных и экспериментальных результатов доказывает возможность использования программного кода MCNP для моделирования нейтронных измерений в многофазных системах с делящимися материалами.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, моделирование, плутоний, скорость счета нейтронов, счетчик медленных нейтронов.

Хусаинов Максим Рафаилович – инженер ФГУП «ПО «Маяк».

Область научных интересов: ядерно-физические измерения, нейтронно-физические расчеты, теплофизические и гидрогазодинамические расчеты.

Автор 20 публикаций, из них 4 статьи.

Парфентьев Евгений Александрович – ведущий инженер ФГУП «ПО «Маяк», д.т.н.

Область научных интересов: ядерная безопасность, нейтронно-физические исследования, дистанционный нейтронный контроль.

Автор более 100 публикаций, из них 20 статей.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционный аналитический контроль (ДАК) делящихся материалов (ДМ) наряду с традиционными методами разрушающего анализа являются основными видами аналитического контроля в атомной отрасли. Наибольшее распространение получили методы, основанные на измерении соб-

ственного α - и γ -излучения, нейтронов спонтанного деления и нейтронов, испускаемых в реакции (α, n), поглощенного фотонного излучения от внешнего источника [1].

Основными задачами ДАК при управлении технологическими процессами являются технологический контроль и контроль параметров ядерной безопасности [2]. Применение в атомной отрасли

новых технологий, а также усложнение состава и радиационных характеристик сред и материалов приводят к тому, что возникают новые задачи по контролю технологического параметров и параметров ядерной безопасности при обращении с ДМ. В этих условиях серьезные требования предъявляются к используемым методам и средствам измерений.

В инженерной практике для эффективной разработки методик измерений и измерительных систем, а также получения прогнозных оценок радиационных полей, формируемых ДМ, в случаях, когда выполнение экспериментов по тем или иным причинам невозможно, проводится многовариантное расчетное моделирование ядерно-физических измерений с использованием численных методов, которые реализованы в различных программных средствах. Использование численных методов сопряжено с необходимостью апробации программных средств и сравнения результатов моделирования с теоретическими или экспериментальными результатами.

На ФГУП «ПО «Маяк» накоплен большой статистический материал по ядерно-физическим измерениям на экспериментальном и технологическом оборудовании. Так, для радиохимического производства были проведены экспериментальные работы по физическому моделированию распределения плутония в жидкостных подкритических системах [3], а также измерению на действующем оборудовании распределения плутония в многофазных системах в ходе технологического процесса. Экспериментальное исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в технологическом оборудовании с плутонием представляет большой практический интерес в связи с тем, что в технологическом аппарате на плотность потока нейтронов, а, следовательно, и на измеряемую скорость счета нейтронов в отличие от гомогенной бесконечной среды, в которой плотность потока нейтронов пропорциональна выходу нейтронов в среде или концентрации плутония, влияют такие факторы, как неоднородность распределения плутония по объему раствора, его размножающие свойства, геометрия аппарата, местоположение блока детектирования. Проведение многовариантных расчетов позволяет лучше понять характер экспериментальных кривых и дает возможность получать прогнозных кривые в тех случаях, когда выполнение соответствующих экспериментов оказывается невозможным.

В данной работе приведены результаты апробации программного кода MCNP [4] для компьютерного моделирования экспериментов по физическому моделированию распределения плутония с использованием точечного источника нейтронов и специальных кювет, заполненных раствором плутония. Программный код MCNP позволяет методом Монте-Карло численно решать в трехмерной постановке уравнение переноса нейтронного излучения в веществе.

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пространственное, энергетическое и угловое распределение нейтронов и других частиц определяется решением стационарного кинетического уравнения Больцмана – уравнения переноса излучения. При описании реальной системы коэффициенты этого уравнения являются сложными функциями энергии и пространственных координат. Для таких задач абсолютно точное решение уравнения переноса практически невозможно. Для решения этого уравнения применяются численные методы [5]: метод сферических гармоник; методы полиномиальных разложений; метод дискретных ординат; метод Монте-Карло; аналитические и полуэмпирические методы расчета переноса излучения.

Наибольшее распространение в настоящее время получил метод Монте-Карло [6, 7]. Моделирование переноса нейтронного излучения методом Монте-Карло осуществляется следующим образом [8, 9]. Нейтрон может быть запущен из определенной заданной точки в выбранном направлении с заданной энергией. Длина пробега нейтрона выбирается, исходя из розыгрыша (случайным образом), в соответствии со средней длиной свободного пробега нейтрона в рассматриваемых материалах. В конце каждого шага вычисляемого отрезка пути нейтрона на основе данных о сечении взаимодействия разыгрывается определенный тип взаимодействия нейтрона с заданной кинетической энергией с веществом. После выбора типа взаимодействия моделируются все последующие события и результаты такого взаимодействия. Когда нейтрон поглощается в веществе или покидает рассматриваемую систему, розыгрыш его истории заканчивается.

Программные коды, реализующие метод Монте-Карло, создаются с начала пятидесятих годов прошлого века. В настоящее время они используют колоссальный объем накопленной информации о взаимодействии различного вида излучений с веществом. С развитием вычислительной техники программные средства, реализующие метод Монте-Карло, находят все более широкое применение, в частности, в области, связанной с проектированием, обоснованием и эксплуатацией ядерных реакторов и других объектов использования атомной энергии. На сегодняшний день существуют большое количество программных кодов, реализующих метод Монте-Карло для моделирования физических процессов прохождения излучения через вещество, оценок по ядерной безопасности, проектирования радиационной защиты, моделирования работы реактора, медицинских приложений: FLUKA [10], GEANT4 [11], MCNP, MCU [12] и другие.

При решении задач моделирования различных ядерно-физических измерений с использова-

нием расчётных кодов появляется ряд вопросов, требующих решения:

- выбор универсального кода для решения задачи;
- создание тестовых верификационных задач.

Для обеспечения возможности решения широкого спектра задач по транспорту частиц программный код должен включать в себя алгоритмы транспорта нейтронов, фотонов и заряженных частиц. Также необходима возможность реализации процедур совпадений в сложных детекторных системах, наличие в коде схем распада радионуклидов. Всем этим критериям в полной мере удовлетворяют два кода – MCNP и GEANT4. Также стоит отметить, что эти два кода непрерывно развиваются в международной коллаборации, уточняются сечения, используемые в них. Российских кодов, полностью удовлетворяющих всем необходимым требованиям, нет.

Для оценки точности расчетных кодов, а также различных экспериментальных методов, существует международный подход создания тестовых экспериментов. Наличие таких экспериментов необходимо для отладки элементов кода и методов. В настоящее время наиболее детально проработанным в этом направлении является программный код MCNP. Для задач ядерной и радиационной безопасности данный код является прецизионным и применяется для сравнительного тестирования новых версий универсальных и специализированных программных кодов.

С учетом указанных выше причин для выполнения расчетного моделирования был выбран программный код MCNP.

В отчетах Лос-Аламосской национальной лаборатории, являющейся разработчиком кода MCNP, можно найти большое количество верификационных задач с применением простейших точечных источников в неразмножающих средах [13]. Однако наибольший интерес представляют результаты моделирования растворов плутония и урана, представляющих собой протяженные источники. Информация о результатах такого моделирования в литературе отсутствует. В связи с этим результаты, представленные в данной работе, представляют большой практический интерес.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Физическое моделирование слаборазмножающего нейтроны раствора (содержание плутония до 1 г/л) проводилось на установке (рис. 1), состоявшей из заполненной водой цилиндрической емкости диаметром 600 мм и высотой 1000 мм, плутоний-бериллиевый источник быстрых нейтронов типа ИБН-7 с полным выходом нейтронов 0.78×10^6 нейтрон/с и измерительной аппаратуры. В центре емкости по всей ее высоте располагалась заглушенная внизу труба, в которой размещался гелиевый счетчик медленных нейтронов СНМ-16.

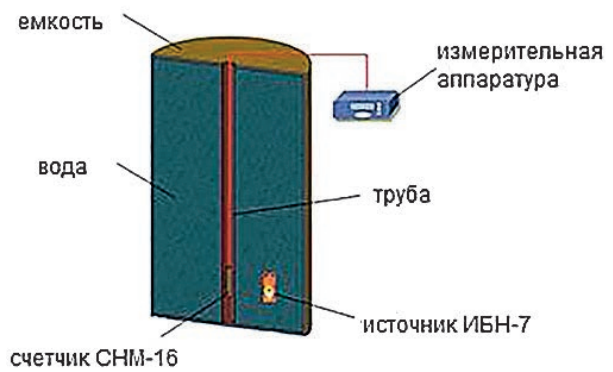


Рис. 1. Экспериментальная установка с точечным источником нейтронов

Для моделирования непрерывно распределенного источника нейтронов источник ИБН-7 перемещали по радиусу и высоте емкости. В результате были получены таблицы экспериментальных значений дифференциальной функции влияния $f(z, r, z_{0i})$ точечного источника нейтронов на скорость счета детектора в фиксированных точках по оси емкости (z_{0i} – координаты центра рабочего объема счетчика). Эти таблицы использовали для составления матрицы значений интегральной функции влияния $F(z, r, z_{0i})$ цилиндрического слоя единичной высоты с равномерно и непрерывно распределенным источником нейтронов. С помощью функции $F(z, r, z_{0i})$ вычисляли скорость счета нейтронов в точке z_{0i} для любого заданного распределения концентрации плутония $c(z)$ по высоте емкости H :

$$N(z_{0i}) = B \cdot \int_0^H F(z, r, z_{0i}) \cdot c(z) dz,$$

где B – коэффициент пропорциональности.

Компьютерная модель (рис. 2) включала в себя заполненную водой емкость, гелиевый счетчик с оболочкой из нержавеющей стали и окружающий их воздух. Состав и характеристики газовой

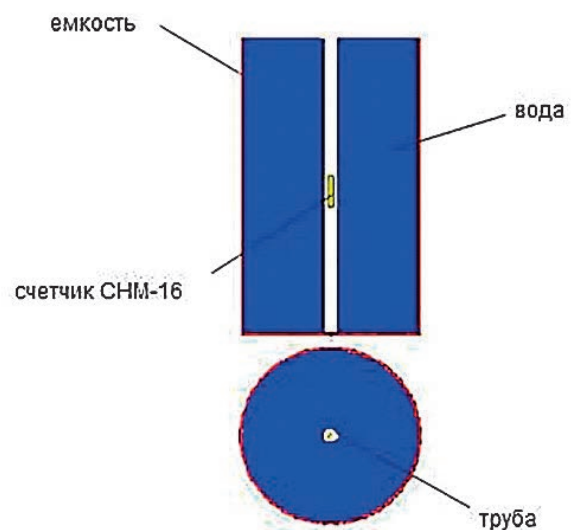


Рис. 2. Компьютерная модель экспериментальной установки с точечным источником нейтронов

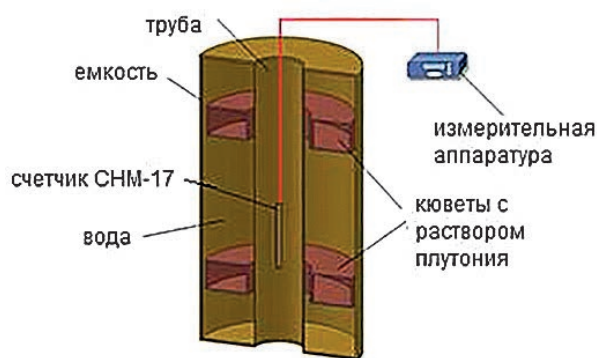


Рис. 3. Экспериментальная установка со специальными кюветами

смеси, заполняющей счетчик, воздуха, воды и нержавеющей стали были взяты из [14-16]. Для получения информации о распределении нейтронного поля по высоте емкости рассчитывали скорость счета от распределенного по объему воды источника быстрых нейтронов при различных положениях гелиевого счетчика в трубе. Скорость счета вычисляли путем оценки скорости реакции ${}^3\text{He} (n, p) {}^3\text{H}$.

Физическое моделирование распределения плутония в растворах с концентрацией в несколько единиц г/л проводили на установке (рис. 3), состоявшей из заполненной водой цилиндрической емкости диаметром 450 мм и высотой 1000 мм, заполненных азотнокислым раствором плутония специальных кювет высотой 50 мм и измерительной аппаратуры. В центре емкости по всей ее высоте располагалась труба, в которой размещался гелиевый счетчик медленных нейтронов СНМ-17. Для моделирования многофазных систем использовали кольцевые кюветы с разной концентрацией плутония. В ходе экспериментов кюветы размещали на различном по высоте емкости расстоянии относительно друг друга. Для каждого положения кювет по высоте емкости производили сканирование по высоте гелиевым счетчиком.

Компьютерная модель (рис. 4) включала в себя заполненную водой емкость, кюветы с азотнокислым раствором плутония, гелиевый счетчик с оболочкой из нержавеющей стали и окружающий их воздух. Состав и характеристики газовой смеси,

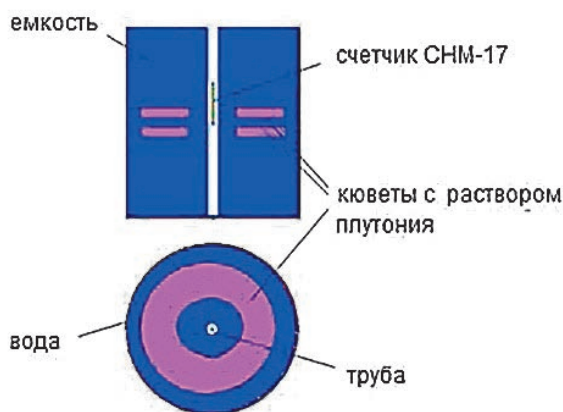


Рис. 4. Компьютерная модель экспериментальной установки со специальными кюветами

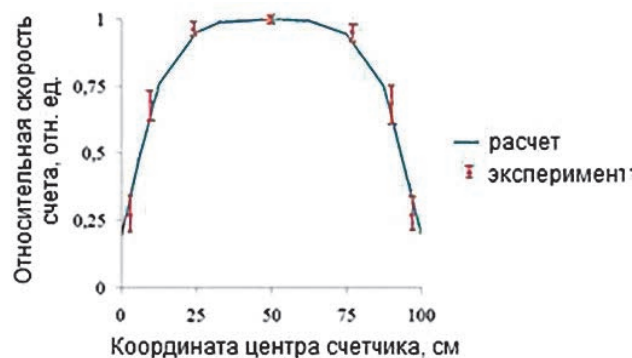


Рис. 5. Относительное изменение скорости счета при перемещении счетчика СНМ-16 по высоте емкости с однородным водным раствором плутония

заполняющей счетчик, воздуха, воды и нержавеющей стали были взяты из [14-16]. Для получения информации о распределении нейтронного поля по высоте емкости рассчитывали скорость счета от раствора плутония в кюветах при различных положениях гелиевого счетчика в трубе. По объему кювет с раствором плутония был распределен источник быстрых нейтронов. Скорость счета вычисляли путем оценки скорости реакции ${}^3\text{He} (n, p) {}^3\text{H}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для однородного распределения плутония экспериментальные и расчетные значения относительной скорости счета (рис. 5), полученные на экспериментальной установке с точечным источником, согласуются удовлетворительно. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений скоростей счета составляет порядка 10 %.

Определенные для трех положений счетчика (расстояние от центра счетчика до дна емкости составляло 4, 12 и 23 см) экспериментальные и расчетные значения относительного изменения скорости счета от массы плутония в торцевом слое (рис. 6) толщиной 5 см (моделирование выпадения плутония в осадок) показывают, что максимальное нарастание соответствует положению счетчика в слое, где происходит концентрирование контролируемого вещества. Имеющееся расхождение в экспериментальных и расчетных значениях отно-

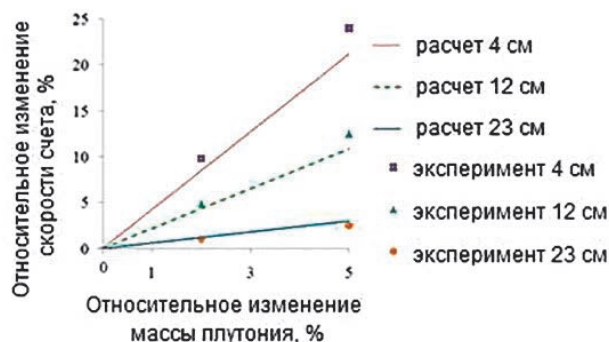


Рис. 6. Изменение скорости счета нейтронов счетчика СНМ-16, расположенного на разной высоте от дна емкости, при выпадении плутония в осадок с толщиной слоя 5 см

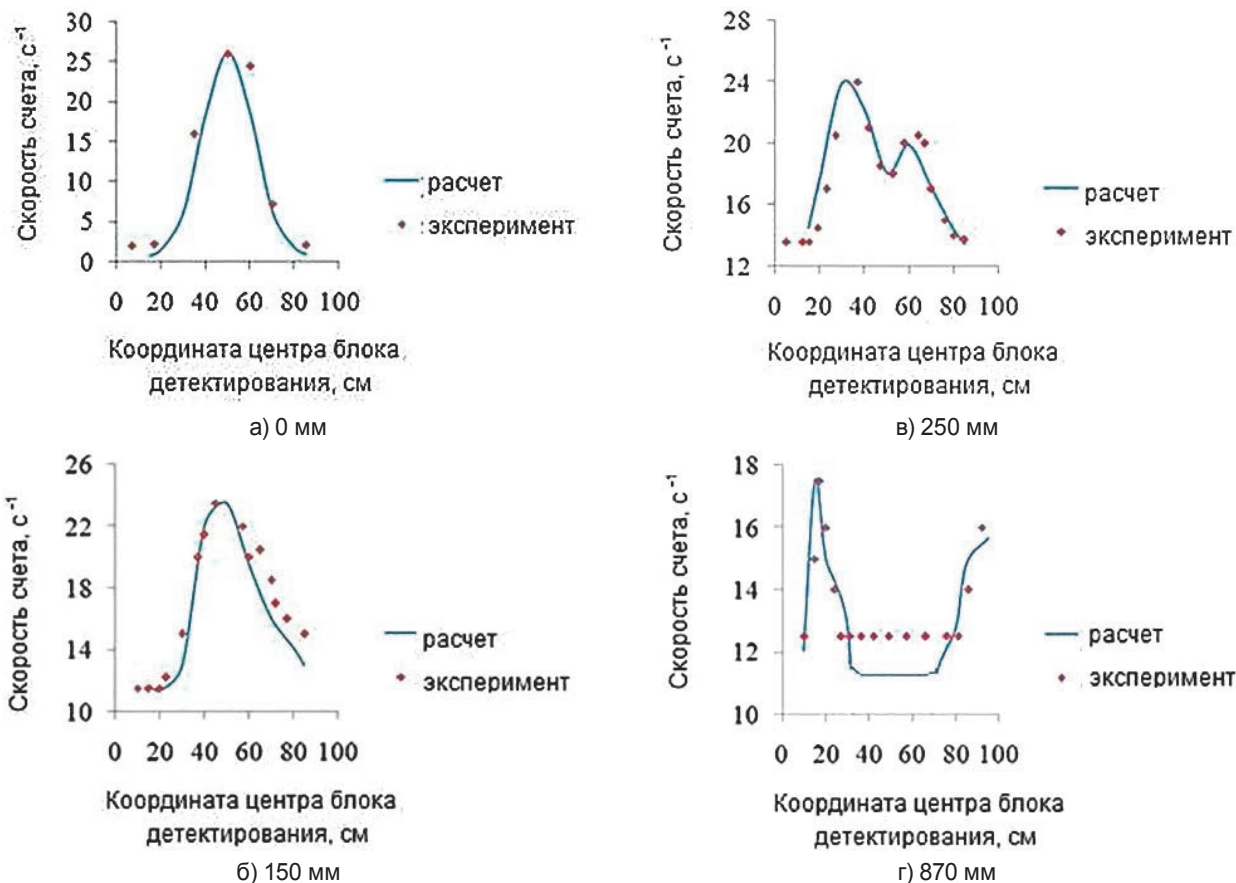


Рис. 7. Распределения скоростей счета нейтронов по высоте емкости от двух кювет с различной концентрацией

сительного изменения скорости счета нейтронов, полученные на экспериментальной установке с точечным источником, объясняется погрешностью определения в эксперименте положения счетчика относительно дна емкости. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений относительного изменения скоростей счета составляет порядка 15 %.

Экспериментальные и расчетные (результаты расчетов были нормированы на экспериментальные в точке, в которой величина скорости счета была максимальной) распределения скоростей счета нейтронов (рис. 7) по высоте емкости от двух кювет при различном расстоянии между ними согласуются удовлетворительно. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных значений скоростей счета для расстояний между кюветами 0, 150, 250 и 870 мм составляет порядка 20, 10, 14 и 14 % соответственно. Имеющееся расхождение в экспериментальных и расчетных значениях скорости счета нейтронов объясняется погрешностью определения концентрации плутония в кюветах и относительного положения кювет.

Из представленных на рисунке данных видно, что при расстоянии между кюветами 50 мм и 150 мм взаимодействие между слоями плутония достаточно сильное и в распределении не наблюдается уменьшение скоростей счета нейтронов между слоями. Уменьшение скоростей счета нейтронов

(появление «провала» в распределении) наблюдается только тогда, когда расстояние между кюветами больше или равно ~ 250 мм. При таком расстоянии можно обнаружить разделение фаз или появление второй фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено компьютерное моделирование методом Монте-Карло экспериментов на моделях технологических аппаратов. Результаты расчетного прогнозирования показаний радиометра удовлетворительно согласуются с результатами измерений распределений скоростей счета нейтронов. Полученный результат доказывает возможность использования программного кода MCNP для моделирования нейтронных измерений в многофазных системах с ДМ. В дальнейшем планируется продолжить работу по апробации программного кода MCNP для компьютерного моделирования ядерно-физических измерений, проводившихся и проводимых на технологических аппаратах радиохимического производства ФГУП «ПО «Маяк».

Авторы благодарят за полезные обсуждения и дискуссии профессора кафедры экспериментальной физики УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, доктора физ.-мат. наук А.В. Кружалова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роджерс. Д.Р. Справочник по методам измерений ядерных материалов: пер. с англ. М.: БИНОМ, 2009. 712 с.
2. Фролов В.В. Ядерно-физические методы контроля деющихся веществ. М.: Энергоиздат, 1989. 184 с.
3. Исследование распределения нейтронов в водных растворах альфа-активных веществ / А.С. Беспятых [и др.] // Атомная энергия. 1977. Т. 42, вып. 6. С. 494.
4. MCNP Monte-Carlo Neutron and Photon Transport Code System. CCC-200 A/B. Los Alamos, 1997.
5. Гусев Н.Г. Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1973. 312 с.
7. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М. Наука, 1975. 472 с.
8. Марчук Г.И. Метод Монте-Карло в проблеме переноса. М.: Атомиздат, 1967. 256 с.
9. Спанье Д., Гельбард Э. Метод Монте-Карло и задачи переноса нейтронов: пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972. 272 с.
10. FLUKA: a multi-particle transport code. SLAC-R-773. Geneva: CERN, 2005. 406 p.
11. Geant4 - a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 2003. V. 506, № 3. P. 250-303.
12. О проекте MCU [Электронный ресурс]: <http://mcuproject.ru/about.html> (дата обращения 20.04.2013).
13. Los Alamos National Security [Электронный ресурс]: <http://www.lanl.gov/index.php> (дата обращения 28.05.2014).
14. Фастовский В.Г., Ровинский А.Е. Инертные газы. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.
15. Никольский Б.П. Справочник химика: В 8 т., Т.1: Основные свойства неорганических и органических соединений. С-Пб.: Химия, 1971. 1168 с.
16. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

COMPUTER SIMULATION OF PHYSICAL MODEL EXPERIMENTS WITH MULTI-PHASE SYSTEMS IN RADIOCHEMICAL VESSELS

M.R. Khusainov, E.A. Parfentiev

*Federal State Unitary Enterprise MAYAK Production Association
ul. Lenina, 31, Ozersk, 456780, Russian Federation*

Manuscript represents results of testing the code MCNP for Monte Carlo simulation of neutron measurements in physical model experiments with plutonium distribution through liquid multi-phase systems with radiochemical vessels. Satisfactory convergence of calculated and experimental data has been demonstrated.

In order to assess applicability of the MCNP code for multivariate calculation modeling of nuclear-physical measurements at remote analytical monitoring of fissile materials its testing was performed for Monte-Carlo computer modeling of neutron measurements in the experiments aimed at physical modeling of plutonium distribution in liquid multiphase subcritical systems in the radiochemical plant tanks.

The work studied calculation modeling of neutron radiation transfer through the use of Monte-Carlo method. The choice of MCNP code for modeling was justified.

The work describes physical modeling facilities of plutonium distribution in solutions with concentration of up to several units g/l and the corresponding three-dimensional computer models. Physical modeling of the solution with plutonium concentration of up to 1 g/l was carried out at the facility consisting of the cylindrical tank filled with water, the plutonium-beryllium fast neutron source of IBN type and the measuring equipment. The computer model incorporated the cylindrical tank filled water, the helium counter tube and the ambient air. Physical modeling of plutonium distribution in the solutions with concentration of several units g/l was performed at the facility consisting of the cylindrical tank filled with water, special cuvettes filled with plutonium nitrate solution and the measuring equipment. The computer model included the cylindrical tank filled with water, the cuvettes with plutonium nitrate solutions, the helium counter tube and the ambient air.

The results of comparison of "physical" and "computer" measurements of neutron field distributions are provided. The obtained satisfactory agreement of the calculated and the experimental results proves applicability of the MCNP code for modeling of neutron measurements in the multiphase systems with fissile materials.

Key words: Monte Carlo method, simulation, plutonium, neutron count rate, slow neutron counter.

REFERENCES

1. Rodzhers D.R., Fellow M. Handbook of nuclear safeguards measurement methods. Miamisburg, Mound Laboratory Monsanto Research Corporation, 1983. 712 p. (Russ. ed.: Rodzhers D.R. *Spravochnik po metodam izmerenii yadernykh materialov*. Moscow, BINOM Publ., 2009. 712 p).
2. Frolov V.V. *Iaderno-fizicheskie metody kontrolya deliashchikh veshchestv* [Nuclear-physical methods of fissile materials control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1989. 184 p. (in Russian).
3. Bespiatykh A.S. Parfent'ev E.A., Peregudov V.A., Tsent'er E.M., Chvankin E.V. [Research of the distribution of neutrons in the aqueous solution of alpha-active substances].

- Atomnaia energiya* [Atomic Energy], 1977, vol. 42, no. 6, P. 494. (in Russian).
4. MCNP Monte-Carlo Neutron and Photon Transport Code System. CCC-200 A/B. Los Alamos, 1997.
 5. Gusev N.G. *Zashchita ot ioniziruiushchikh izluchenii* [Health physics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. (in Russian).
 6. Sobol' I.M. *Chislennye metody Monte-Karlo* [Monte-Carlo method]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 312 p. (in Russian).
 7. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy* [Monte Carlo method and related problems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 472 p. (in Russian).
 8. Marchuk G.I. *Metod Monte-Karlo v probleme perenosy* [Monte Carlo method in the transfer problem]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 256 p. (in Russian).
 9. Spanier J., Gelbard E.M. Monte Carlo Principles and Neutron Transport Problems. Massachusetts, Addison-Wesley, 1969. 272 p. (Russ. ed.: Span'e D., Gel'bard E. *Metod Monte-Karlo i zadachi perenosy neitronov*. Moscow, Atomizdat Publ., 1972. 272 p.).
 10. FLUKA: a multi-particle transport code. SLAC-R-773. Geneva: CERN, 2005. 406 p.
 11. Agostinelliae S., Allisonas J., Amakoe K., Apostolakisa J., Araujoaj H., Arcel P., Asaig M., Axeni D., Banerjeebi S., Barandan G., Behnerl F., Bellagambac L., Boudreaubd J., Brogli-aar L., Brunengoc A., Burkhardta H., Chauviebj S., Chumah J., Chytraceka R., Coopermanaz G., Cosmoa G., Degtyarenkod P., Dell'Acquaa A., Depaolay G., Dietrichaf D., Enamiab R., Feliciellobj A., Fergusonbh C., Fesefeldtl H., Folgera G., Foppianoac F., Fortias A., Garelliac S., Giania S., Giannitrapanibo R., Gibinm D., Gomez Cadenasm J.J., Gonzalezq I., Gracia Abriln G., Greeniausp G., Greinerf W., Grichinef V., Grossheimm A., Guatelliad S., Gumplingerh P., Hamatsubk R., Hashimotoab K., Hasuiab H., Heikkinenah A., Howardaj A. Geant4 - a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 2003. vol. 506, no 3, pp. 250-303.
 12. [About MCU project]. Available at: <http://mcuproject.ru/about.html> (accessed 20 April 2013) (in Russian).
 13. Los Alamos National Security (2014). Available at: <http://www.lanl.gov/index.php> (accessed 28 May 2014).
 14. Fastovskii V.G., Rovinskii A.E. *Inertrnye gazy* [Inert gases]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972. 352 p. (in Russian).
 15. Nikol'skii B.P. *Spravochnik khimika. Kn.1: Osnovnye svoistva neorganicheskikh i organicheskikh soedinenii* [Chemist's Handbook, Vol. 8: Basic properties of inorganic and organic compounds], St. Petersburg: Khimiia Publ., 1971. 1168 p. (in Russian).
 16. Sorokin V.G., eds. *Marochnik stalei i splavov* [Database of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 640 p. (in Russian).