

нейтронных детекторов. Отношение площади пика к фону в зависимости от положения каждого сцинтиллятора в диагностической аппаратуре показало достаточную эффективность исследуемой конструкции. Полученные данные позволят восстановить энергетическое распределение нейтронов плазмы в телесном угле выбранного коллиматора. Комбинация нейтронных спектров всех коллиматоров даст возможность определить интенсивность и энергию нейтронов в плазме ИТЭРа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vayakis G., Hodgson E., Voitsenya V., Walker C. Chapter 12: Generic diagnostic issues for a burning plasma experiment. — *Fus. Sci. Technol.*, 2008, v. 53, p. 699—750.
2. Pampin R., Loughlin M., Walsh M. Radiation transport analyses for optimisation of the ITER core LIDAR system design. — *Technol. Fus. Energy*, 2008, v. 56, p. 751—755.
3. Walsh M., Beurskens M., Carolan P. Design challenges and analysis of the ITER core LIDAR Thomson scattering system. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, v. 77, p. 10.
4. Phillips G., Krivchenkov Y., Davis S. Engineering of diagnostic equatorial port plugs for ITER. — *Fus. Engng Design*, 2009, v. 84, p. 1510—1514.
5. Serikov A., Fischer U., Leichtle D., Pitcher C. Monte Carlo radiation shielding and activation analyses for the diagnostic equatorial port plug in ITER. — *Ibid.*, 2012, v. 87, p. 690—694.
6. Serikov A., Fischer U., Henderson M. Neutronics for equatorial and upper ports in ITER. — *Ibid.*, 2013, v. 88, p. 1965—1968.
7. Marocco D., Esposito B., Moro F. Combined unfolding and spatial inversion of neutron camera measurements for ion temperature profile determination in ITER. — *Nucl. Fus.*, 2011, v. 51, p. 53.
8. Salasca S., Esposito B., Corre Y. Development of equatorial visible/infrared wide angle viewing system and radial neutron camera for ITER. — *Fus. Engng Design*, 2009, v. 84, p. 1689—1696.

Поступило в Редакцию 4.03.19

УДК 621.039.51

ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В МЕТОДЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Суслов И.Р., Тормышев И.В. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail: itormyshev@ippe.ru

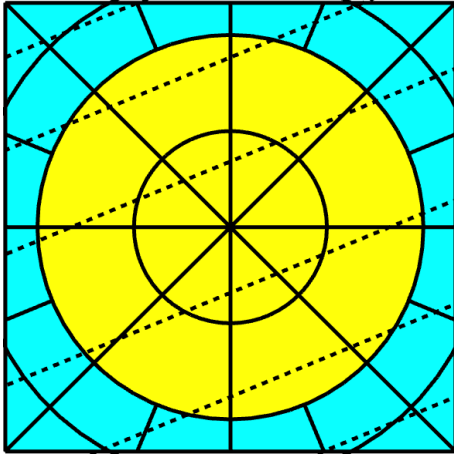
Теория возмущений широко применяется для оценки чувствительности реакторных характеристик к отклонению коэффициентов уравнения переноса. Она может применяться при оценке критических экспериментов, оптимизации систем констант для улучшения описания заданной совокупности интегральных экспериментов, оценке влияния погрешностей ядерных данных и технологических допусков на реакторные функционалы в проектных расчетах, формулировке требований к ядерным данным и технологическим неопределенностям, обеспечивающим необходимые отклонения реакторных характеристик [1]. Теоретической основой для разработки расчетных кодов оценки возмущений реакторных характеристик являются прямое и сопряженное уравнения переноса. Расчетные программы используют численные решения уравнения переноса в разных геометриях и приближениях: TRIGEX [2] — трехмерная геометрия, диффузионное приближение, SUS3D [3] — трехмерная геометрия, S_N -метод, пакет TSUNAMI системы SCALE [4, 5] — одно-, двух-, трехмерная геометрия, методы дискретных ординат, коротких характеристик, Монте-Карло.

Одним из интенсивно развиваемых в настоящее время прецизионных методов решения уравнения переноса является метод длинных характеристик,

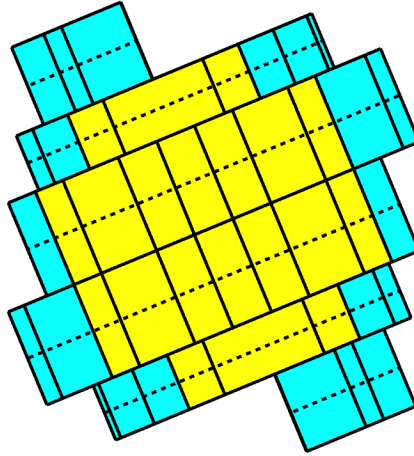
преимущество которого состоит в отсутствии численной дисперсии, гибкости описания нерегулярной геометрии, возможности получения эталонного решения уравнения переноса [6—8].

В настоящей работе представлена методика расчета коэффициентов чувствительности K_{ϕ} разноточающей системы к макроскопическим сечениям материалов на базе программы метода характеристик MCCG3D [9]. Приведены формулы теории возмущений в непрерывном виде, дискретные аналоги формул теории возмущений, основанные на разностной схеме программы MCCG3D, формулы для расчета коэффициентов чувствительности K_{ϕ} к коэффициентам уравнения переноса. С использованием полученных формул проведены тестовые расчеты, результаты которых показывают совпадение получаемых коэффициентов чувствительности с прямыми расчетами и сходимость коэффициентов чувствительности к точным значениям.

Расчет коэффициентов чувствительности на основе программы метода характеристик MCCG3D. Программа MCCG3D решает уравнение переноса методом характеристик в произвольной геометрии. Система (1) — пример условно-критической задачи с вакуумными граничными условиями и изотропным рассеянием:



а



б

Пример аппроксимации расчетной модели методом характеристик для одного направления: *а* — модель, разбитая на пространственные ячейки с построенными характеристиками; *б* — конечно-разностное представление расчетной модели; —, — — — границы пространственных ячеек и характеристики соответственно

$$\begin{cases} \Omega \nabla \psi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \psi(\mathbf{r}, \Omega, E) = \\ = \iint \Sigma_s(\mathbf{r}, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) \psi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE' + \\ + \frac{\lambda \chi(\mathbf{r}, E)}{4\pi} \iint v \Sigma_f(\mathbf{r}, E') \psi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE'; \\ \psi(\mathbf{r}, \Omega, E) = 0 \text{ при } \mathbf{r} \in \Gamma, (\Omega, \mathbf{n}) < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\psi(\mathbf{r}, \Omega, E)$ — поток нейтронов; $\Sigma_t(\mathbf{r}, E)$ — полное сечение взаимодействия; $\mathbf{r}, \Omega, E$ — координаты нейтрона в фазовом пространстве; $\Sigma_s(\mathbf{r}, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E)$ — сечение рассеяния; $\lambda = 1/K_{\text{эф}}$; $K_{\text{эф}}$ — коэффициент размножения; $\chi(\mathbf{r}, E)$ — спектр нейтронов деления; $v \Sigma_f(\mathbf{r}, E')$ — произведение сечения деления на число вторичных нейтронов.

Угловая зависимость нейтронного потока в программе MCCG3D аппроксимируется методом дискретных ординат. Пространственная дискретизация уравнения переноса выполняется путем разбиения расчетной области на набор ячеек, в каждой из которых источник нейтронов предполагается постоянным. Далее в пространстве строится набор прямых — характеристик. Направления характеристик соответствуют выбранным для аппроксимации угловой зависимости нейтронного потока. Вдоль каждой характеристики решается уравнение переноса в конечно-разностной формулировке, совпадающей с геометрией плоского слоя. Расчетные ячейки для оценки потока вдоль характеристики определяются как ее теоретико-множественное пересечение с пространственными ячейками (см. рисунок). Усредненный по пространственной ячейке угловой поток вычисляется как взвешенная сумма потоков по отрезкам характе-

ристик, пересекающим ячейку в данном направлении. Энергетическая зависимость нейтронного потока аппроксимируется с помощью многогруппового приближения. Ценность нейтронов в программе MCCG3D рассчитывается стандартным способом — решением уравнения переноса, в котором переставлены местами $v \Sigma_f$ и χ и транспонирована матрица рассеяния нейтронов.

Известно, что решение сопряженной задачи, построенной таким образом, может не совпасть с решением алгебраически сопряженной задачи, полученной путем алгебраических преобразований дискретной формы прямой задачи. В

частности, известно, что эти решения не совпадают для S_N -метода в криволинейной геометрии [10].

Применительно к методу длинных характеристик данная проблема исследована в работе [11], где на примере одногрупповой двумерной задачи показано, что ценность, рассчитанная при решении сопряженной задачи, сходится к решению алгебраически сопряженной задачи при учащении пространственной сетки характеристик.

Общая формула для расчета возмущения собственного числа условно-критической задачи с помощью теории малых возмущений может быть записана в виде [1]

$$\delta \lambda = \frac{\langle \psi^*, \delta \hat{L} \psi \rangle - \langle \psi^*, \delta \hat{S} \psi \rangle - \lambda \langle \psi^*, \delta \hat{F} \psi \rangle}{\langle \psi^*, \hat{F} \psi \rangle}. \quad (2)$$

Здесь ψ, ψ^* — поток и ценность, рассчитанные для невозмущенной задачи, соответственно; $\hat{L} \psi = \Omega \nabla \psi(\mathbf{r}, \Omega, E) + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) \psi(\mathbf{r}, \Omega, E)$ — оператор переноса и поглощения нейтрона; $\hat{S} \psi = \iint \Sigma_s \times (\mathbf{r}, \Omega', E' \rightarrow \Omega, E) \psi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE'$ — оператор рассеяния нейтрона; $\hat{F} \psi = \chi(\mathbf{r}, E)/4\pi \iint v \Sigma_f(\mathbf{r}, E') \times \psi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE'$ — оператор рождения нейтрона при делении. Угловыми скобками обозначены интегралы по фазовому пространству так, $\langle \psi^*, \hat{F} \psi \rangle = 1/4\pi \iint \iint \psi^*(\mathbf{r}, \Omega, E) \chi(\mathbf{r}, E) d\mathbf{r} d\Omega dE \iint v \Sigma_f(\mathbf{r}, E') \times \psi(\mathbf{r}, \Omega', E') d\Omega' dE'$.

Соотношение (2) дает возможность рассчитать производные $\partial K_{\text{эф}}/\partial \alpha$, где α — коэффициенты уравнения переноса (1).

Коэффициент чувствительности коэффициента размножения к параметру α определяется следующим образом:

$$P_{\alpha} = \alpha / K_{\text{эф}} \partial K_{\text{эф}} / \partial \alpha. \quad (3)$$

Дискретные аналоги формул (2), (3), записанные с использованием разностной схемы программы MCG3D, были реализованы в программе расчета коэффициентов чувствительности коэффициента размножения.

Результаты тестовых расчетов критической сборки VENUS. Для тестирования методики и программы использовали двумерную модель сборки VENUS с гомогенизированными твэльными ячейками [12].

Для сравнения возмущений $K_{\text{эф}}$, полученных прямым расчетом и по теории возмущений, рассчитывали возмущения коэффициента размножения при изменении следующих сечений: транспортное сечение $\Sigma_{\text{tr}}^{2,1}$ стенки центральной емкости с водой (зона № 2) в первой группе, сечение деления $\nu \Sigma_f^{3,1}$ ячейки с ураном обогащением 3,3%, сечение перехода из группы 1 в группу 2 $\Sigma_s^{3,1 \rightarrow 2}$ в той же зоне (табл. 1). Результаты показывают хорошее согласие коэффициентов чувствительности, оцененных прямыми расчетами и по теории возмущений.

Т а б л и ц а 1. Отклонения коэффициента размножения критической сборки VENUS при возмущениях сечений

Возмущаемый параметр	Возмущение, %	Прямой расчет	Расчет по теории возмущений	Отклонение, %
$\Sigma_{\text{tr}}^{2,1}$	5	–0,001587	–0,00169	6,5
	1	–0,000332	–0,000338	1,8
	0,5	–0,0001681	–0,000169	0,6
$\nu \Sigma_f^{3,1}$	100	0,0350	0,0323	7,7
	50	0,0166	0,0161	2,8
	10	0,00324	0,00323	0,4
$\Sigma_s^{3,1 \rightarrow 2}$	10	0,0301	0,02908	3,3
	5	0,0148	0,0145	1,8
	1	0,00292	0,002908	0,4

Сходимость коэффициентов чувствительности при уточнении параметров конечно-разностной аппроксимации (шаг между характеристиками, число направлений по полярному и азимутальному углу)

приведена в табл. 2 на примере коэффициентов чувствительности к транспортному сечению и сечению деления ячейки с ураном обогащением 3,3%. При уточнении параметров конечно-разностной аппроксимации приращения, получаемые коэффициентом чувствительности, убывают, что свидетельствует об их сходимости к точным значениям. Кроме того, следует отметить слабую зависимость коэффициентов чувствительности от параметров конечно-разностной аппроксимации. Изменение при переходе от самой грубой к самой подробной аппроксимации, как правило, не превышает 0,1%, что позволяет рассчитывать коэффициенты чувствительности на сравнительно грубых сетках.

Т а б л и ц а 2. Изменение коэффициентов чувствительности при варьировании параметров конечно-разностной аппроксимации

Варьируемый параметр	$P_{\Sigma_{\text{tr}}^{3,1}}$	$P_{\nu \Sigma_f^{3,2}}, 10^{-2}$
Шаг между характеристиками:		
0,1	–0,63165	0,44560
0,05	–0,63099	0,44555
0,025	–0,63158	0,44556
0,01	–0,63158	0,44556
Число направлений по полярному углу:		
1	–0,63158	0,44556
2	–0,63253	0,44433
4	–0,63282	0,44440
6	–0,63286	0,44442
Число направлений по азимутальному углу:		
2	–0,63282	0,44440
4	–0,63289	0,44442
6	–0,63288	0,44441

Разработанная методика позволяет анализировать чувствительность коэффициента размножения, не прибегая к процедурам гомогенизации расчетной модели, как правило, использующимся при расчете реакторных характеристик в рамках диффузионного приближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г.И. Методы расчета ядерных реакторов. М.: Госатомиздат, 1961.
2. Серегин А.С., Кислицына Т.С. Аннотация комплекса программ TRIGEX—CONSYST—БНАБ-90: Препринт ФЭИ-2655, 1997.

3. **Kodeli I.** Multidimensional deterministic nuclear data sensitivity and uncertainty code system: Method and application. — Nucl. Sci. Engng, 2001, v. 138, № 1, p. 45—66.
4. **Williams M., Rearden B.** SCALE-6 Sensitivity/Uncertainty Methods and Covariance Data. — Nucl. Data Sheets, 2008, v. 109, № 12, p. 2796—2800.
5. **SCALE** Code System. Vers. 6.2.2. Rearden B., Jessee M. Eds. ORNL/TM-2005/39, 2017.
6. **Суслов И.Р.** Метод характеристик в областях со сложной геометрией. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 1, с. 57—58.
7. **Marin-Lafleche A., Smith M., Lee Ch.** PROTEUS-MOC: a 3D deterministic solver incorporating 2D method of characteristics. — In: Intern. Conf. Mathematics and Computation Methods Applied to Nuclear Science and Engineering, Sun Valley, Idaho, 5—9 May, 2013, ID 7525.
8. **Boyd W., Smith K., Forget B., Siegel A.** Parallel performance results for the OpenMOC method of characteristics code on multi-core platforms. — In: Intern. Conf. PHYSOR 2014. Japan, Sept. 28 — October 3, 2014, ID 1104798.
9. **Suslov I.R.** Improvements in the long characteristics method and their efficiency for deep penetration problems. — Progress Nucl. Energy, 2001, 39, № 2, p. 223—242.
10. **Greenspan H., Kelber C., Okrent D.** Computing Methods in Reactor Physics. New York: Gordon & Breach Sci. Pub. Ltd, 1968.
11. **Тормышев И.В., Суслов И.Р.** Анализ сопряженности конечно-разностных уравнений метода характеристик на основе линейно-алгебраической формулировки. — Атомная энергия, 2017, т. 122, вып. 6, с. 303—308. // **Tormyshev I.V., Suslov I.R.** Conjugacy analysis of the finite difference equations of the method of characteristics on the basis of a linear algebraic formulation. — Atomic Energy, 2017, 122, № 6, p. 369—376.
12. **Benchmark** on the VENUS-2 MOX Core Measurements. OECD/NEA Rep., 2000.

Поступило в Редакцию 11.04.19

УДК 574:621.039.7+550.8+550.84

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОРПУСА Б АО «ВНИИНМ»

Кузнецов А.Ю. (СГИК Росатома, г. Москва),

Анциферова Е.Ю., Белоусов С.В., Хлебников С.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),

Бочаров К.Г. (Госкорпорация «Росатом», г. Москва)

e-mail: andyurkuznetsov@rosatom.ru

Особое внимание при работах на объектах использования атомной энергии уделяется мониторингу радиационной обстановки, проводимому Госкорпорацией «Росатом». Его основными целями являются регулярные наблюдения в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения, своевременное выявление изменений, прогноз и минимизация негативных последствий воздействия на население и окружающую среду. Вывод из эксплуатации является завершающей стадией жизненного цикла объектов использования атомной энергии, состав и частота радиоактивных выбросов будут изменяться с течением времени и в конечном итоге прекратятся. В то же время дезактивация, демонтаж, обращение с отходами могут приводить к выбросу радиоактивных веществ. При выводе из эксплуатации возможно появление поверхностных рассредоточенных источников радиоактивного загрязнения, которые сложно контролировать, поэтому мониторинг окружающей среды приобретает дополнительное значение.

В АО «ВНИИНМ» при выводе из эксплуатации имеются следующие особенности: расположение в черте плотной городской застройки города Москвы, санитарно-защитная зона ограничена периметром

забора, основными загрязнителями являются изотопы трансурановых элементов (плутоний, америций) [1]. Они предъявляют жесткие требования и делают качественный мониторинг радиационной обстановки обязательным условием.

Вывод из эксплуатации корпуса Б осуществлялся в три этапа [2]. На подготовительном этапе была создана инфраструктура, включая дополнительную систему контроля радиационной безопасности. Основным этапом включал дезактивацию и демонтаж технологического оборудования, трубопроводов, инженерных коммуникаций, дезактивацию строительных конструкций корпуса, удаление отходов. На заключительном этапе демонтировали строительные конструкции и фундамент здания, реабилитировали территорию.

До начала работ дополнительно была создана и введена в эксплуатацию автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО), включающая:

стационарный автоматический пост метеонаблюдения на территории института для измерения температуры, силы и направления ветра, давления и влажности воздуха;