

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ИТЭР

Денден О., Афанасьев В.В., Ал-Амин М. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

e-mail: valafa@yandex.ru

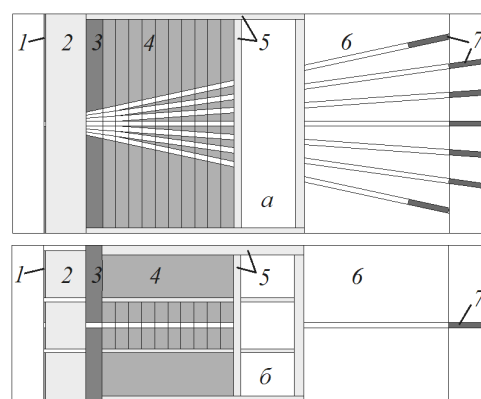
Многие параметры функционирования плазмы ИТЭРа, такие, как мощность реактора, температура, плотность ионов и их пространственное распределение в плазме, можно диагностировать с помощью разных нейтронных систем диагностики. Нейтронные диагностические системы, разработанные для ИТЭРа, включают радиальные и вертикальные нейтронные камеры, внутренние и внешние мониторы и спектрометры потока нейтронов. Интенсивность нейтронного источника и энергетическое распределение могут быть измерены с помощью радиальных и вертикальных камер.

Доступ к измерительным системам токамака, как правило, ограничен. Разработанный для ИТЭРа доступ включает примерно 40 разных диагностических систем. Диагностическое оборудование интегрировано в 6 экваториальных и 12 верхних портов вакуумного сосуда, 16 диверторных кассет, а также внутри вакуумных сосудов [1]. В настоящее время предложено несколько конструкций экваториального порта ИТЭРа. В работах [2—4] предусматривается цельная конструкция крышки корпуса защитной системы. Внутри стенки экваториального порта, обращенной к плазме, предусмотрена система теплоотвода. Наличие воды под высоким давлением 4,5 МПа с одной стороны первой стенки и вакуума с другой может вызвать разрушение сварных швов. С учетом этого выбор сделан в пользу трубчатой конструкции стенки порта. В качестве материала, поглощающего нейтронов, рассматривается борированная сталь с водой под высоким давлением.

Системы диагностики плазмы предполагается размещать как за защитой, так и непосредственно в полостях внутри нее. В настоящей работе рассматривается функционирование набора детекторов нейтронного излучения со стильбеновыми сцинтилляторами и вольфрамовыми коллиматорами и приводится оценка эффективности. Рассмотрена конструкция, включающая в себя блоки из карбида бора в стальной

оболочке [5, 6]. В полостях блоков расположено необходимое оборудование. Для данной конструкции моделирование проведено методом Монте-Карло.

Расчетная модель. Поскольку плазма окружена вакуумной камерой и мощным магнитом, то доступ к ней возможен только через отверстия в этих двух системах. В ИТЭРе отверстия организованы на трех ярусах: нижнем — диверторном, экваториальном — посередине и верхнем ярусе [7]. Рассматриваемая в настоящей работе экваториальная диагностическая сборка показана на рис. 1 с расположением детекторов нейтронного излучения [8]. Радиальные нейтронные камеры формируют веерообразную структуру, их линии обзора направлены на плазму через вертикальные щели в бланкете. Камеры расположены внутри порта и направлены на верхний и нижний край плазменного шнура под разным углом [7, 8]. Они представляют собой цилиндрические сцинтилляторы со стильбеном длиной 40 см, радиусом 5 см и вольфрамовые коллиматоры со средней длиной ~140 см.



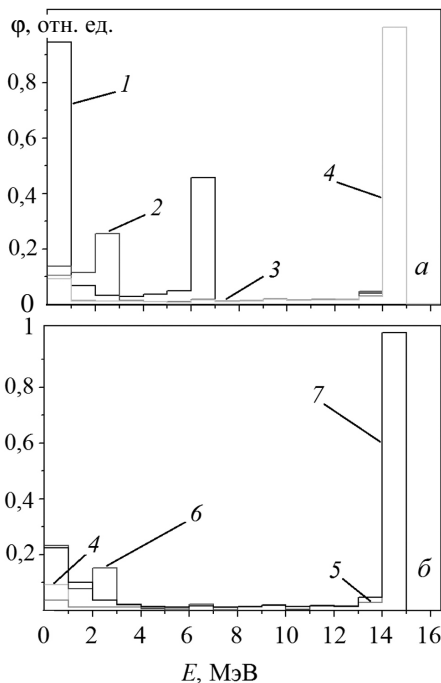
Р и с. 1. Расчетная модель экваториальной диагностической сборки, созданной с помощью программы MCNP: *a*, *б* — плоскость *XZ*, *XY* соответственно; 1 — бериллиевый бланкет; 2 — сталь; 3 — стальной щит с водной системой охлаждения; 4 — карбид бора; 5 — стальной каркас; 6 — вольфрамовый блок с коллиматорами; 7 — стильбеновые сцинтилляторы

В качестве нейтронного излучения моделировали изотропный источник энергией 14,1 МэВ на расстоянии 30 см от порта.

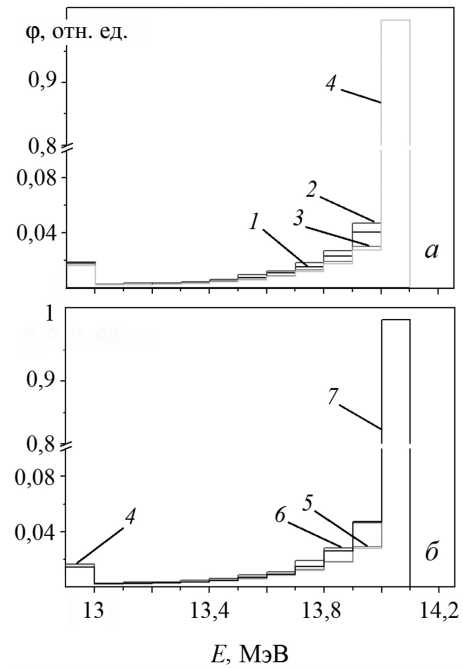
В рассматриваемой модели методом Монте-Карло рассчитывали семь сцинтилляционных детекторов стильбена. Элемент конструкции 2 на рис. 1 содержит полости, необходимые для уменьшения взаимодействия с нейтронами и массы изделия, элемент 3 содержит сталь и воду в пропорции 19:1 соответственно. В полостях щита экваториального порта содержится разное диагностическое оборудование из материалов, слабо влияющих на нейтронный поток, поэтому им пренебрегают [5]. Для уменьшения статистической погрешности при расчете используемая модель была разбита на зоны с весами, увеличивающимися в направлении движения нейтронов от источника к сцинтиллятору. Максимальный вес достигает 16 384.

Результаты и обсуждение. Энергетическое распределение потока нейтронов в семи сцинтилляторах, которые размещены на выходе семи коллиматоров, направленных в плазму, показано на рис. 2. Как показал анализ расчета, вкладом нейтронов энергией ниже 13 МэВ можно пренебречь (рис. 3). Для оценки эффективности рассматриваемой конструкции было рассчитано отношение площади пика к фону (рис. 4).

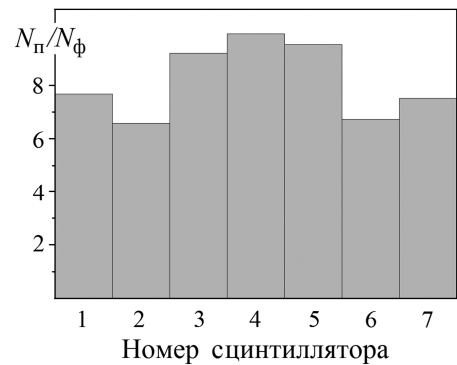
Пики спектров нейтронов в каждом сцинтилляторе расчетной физической модели рассматриваемой



Р и с. 2. Энергетическое распределение потока нейтронов в стильбеновых сцинтилляторах после коллимации под углом в экваториальном диагностическом порте ИТЭРа: 1—7 — сцинтиллятор, соответствующий углу наклона -12 , -8 , -4 , 0 , 4 , 8 , 12° соответственно



Р и с. 3. Энергетическое распределение потока нейтронов, близкое пику (14,1 МэВ) (обозначения см. на рис. 2)



Р и с. 4. Отношение площади пика к фону в каждом сцинтилляторе рассматриваемой экваториальной диагностической сборки

системы хорошо проявились, несмотря на разное пространственное положение сцинтилляторов в порту (расстояние до источника и наклон коллиматоров). Отношение площади пика к фону дает информацию о качестве спектра, поэтому для получения информации о параметрах плазмы термоядерного реактора необходимо принять во внимание положение каждого детектора в диагностической системе. Кроме нейтронов, переносимых наклонным коллиматором на 12 градусов ниже горизонта, появляются нейтроны с низкой энергией относительно энергии пика, обусловленные их рассеянием в конструкционном материале диагностической аппаратуры и на стенке самого коллиматора.

Заключение. Разработана расчетная физическая модель системы нейтронной диагностики плазмы. Получены спектры нейтронов в семи сцинтилляторах

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 $K_{\text{эф}}$ размножающей 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 $K_{\text{эф}}$ 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: