

РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В РЕАКТОРНОМ ЗАЛЕ ИТЭР, СОЗДАВАЕМАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ КАНАЛОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА № 11

А.А. Борисов

Описана модель для расчета переноса излучения по программе MCNP из плазмы за биологическую защиту в реакторный зал здания токамака. В ней были размещены прямые и ломаные каналы четырех диагностических систем (NPA, XCS, VUV, рефлектометрия) экваториального порта № 11. Проведена оценка вклада излучения каждой из них в радиационную обстановку в помещениях реакторного зала. Показано, что средний уровень полного потока нейтронов в боксах первичного вакуума превышает величину $2 \cdot 10^7$ н/(см²·с) и определяется излучением канала NPA.

RADIATION ENVIRONMENT IN A REACTOR HALL OF ITER CREATED BY RADIATION OF DIAGNOSTIC SYSTEMS CHANNELS OF EQUATORIAL PORT № 11. A.A. BORISOV. The MCNP model for the calculation of radiation streaming from plasma into reactor hall of tokamak building behind bio-shield is described. A direct and broken channels of four diagnostic systems (NPA, XCS, VUV, Reflectometry) of equatorial port № 11 was placed there. The evaluation of radiation contribution from every of it to radiation environment in a reactor hall was carried out. It is shown that the average level of a total neutron flux in the first vacuum box exceeds the value $2 \cdot 10^7$ n/(cm²·s) and is defined by the radiation of NPA channel.

ВВЕДЕНИЕ

Элементом некоторых диагностических систем, разрабатываемых для реактора ИТЭР, является прямой канал, который соединяет плазменную камеру с измерительной аппаратурой, вынесенной за биологическую защиту. На всем протяжении этот канал имеет собственную защиту от нейтронного излучения, что, однако, не может препятствовать переносу нейтронов и γ -квантов непосредственно из плазмы в реакторный зал. Для оценки вклада излучения этих каналов в радиационную обстановку за биологической защитой подготовлена трехмерная модель здания токамака на уровне экваториальных портов с реактором под формат программы MCNP. Она позволила смоделировать перенос излучения плазмы на расстояния, превышающие десятки метров, по узким каналам и на примере диагностических систем, предполагаемых для размещения в порте № 11, оценить их вклад в формирование радиационной обстановки за биологической защитой реактора.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА

Трехмерная модель здания токамака с реактором выполнена на весь угол 360° относительно центра реактора в горизонтальной плоскости и включает описание восемнадцати портов с соответствующими проходами в криостате и биологической защите. Модель ориентирована на расчет радиационной обстановки в здании реак-

тора по программе MCNP-4b [1] как суммарный эффект независимых расчетов переноса излучения по каналам отдельных портов.

Особенностью данной модели является упрощенное описание реактора в областях, ограниченных вакуумным корпусом, – от плазмы до дверей портов и детальное – от портов к криостату, и в помещениях за биологической защитой. Такой подход объясняется тем, что величина ослабления излучения по каналу на глубину более 10 м определяется, в основном, двумя факторами: мощностью источника излучения на входе в канал и геометрией прямого канала.

Предлагаемая модель имеет пятизонное описание источника в объеме плазмы, как определено в стандартной модели реактора, сохраняет общие черты конструкции реактора – его размеры в области между дверью порта и биологической защитой, и детально воспроизводит конфигурацию помещений за биологической защитой в зале реактора ИТЭР.

Расположение элементов здания реактора и их размеры были взяты из распространенного итогового документа ИТЭР (Design Description Document [2, 3]). Здание реактора представляет собой параллелепипед размером $\sim 66 \times 76 \times 30$ м. Толщина его бетонных стен равна 200 см. Внутри здания размещена биологическая защита, имеющая форму усеченного цилиндра с внешним радиусом 16,8 м. Область между стенами биологической защиты и стенами здания токамака поделена на этажи. Для целей поставленной задачи в модели выделено лишь два этажа (рис. 1), которые соответствуют уровню экваториальных и верхних портов. Диверторный уровень здания, как и другие, ничем не заполнялся. Наибольшее внимание уделено экваториальному уровню, для которого будут проводиться первые нейтронные расчеты.

Толщина перекрытий этажей равна 100 см. Высота от пола до потолка на экваториальном уровне составляет 438 см, а на верхнем – 418 см. На экваториальном уровне прописаны опоры, между которыми находится область пространства, примыкающая к дверям в биологической защите, отводимая для размещения технологическо-

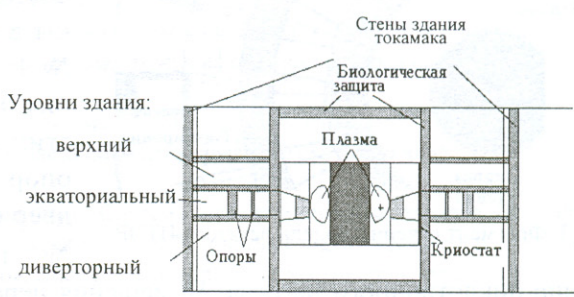


Рис. 1. Вертикальное сечение модели реактора ИТЭР

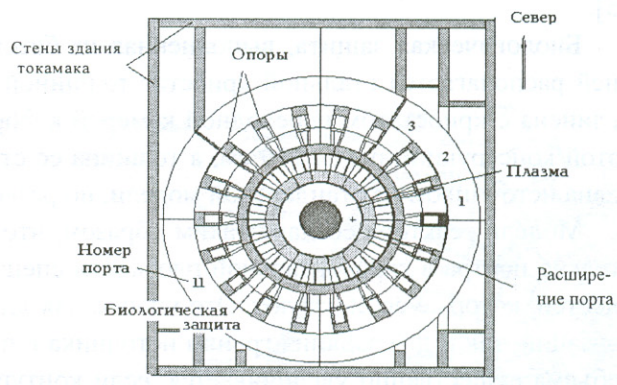


Рис. 2. Горизонтальное сечение модели реактора ИТЭР на экваториальном уровне

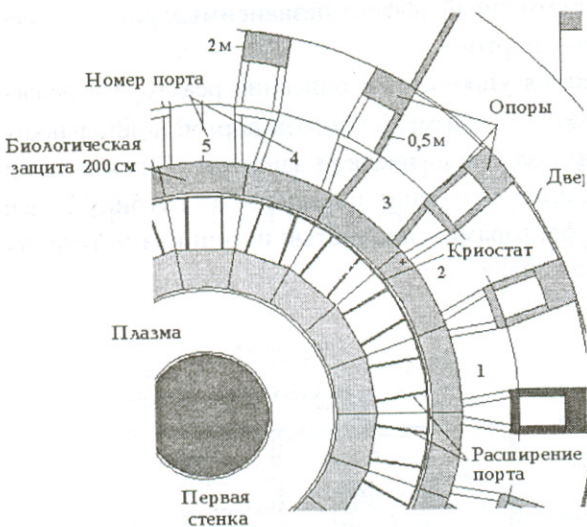


Рис. 3. Фрагмент сечения модели реактора ИТЭР

электронно-циклотронного нагрева. Помещения перед остальными портами предназначены для размещения аппаратуры. Краткий перечень возможных диагностических систем по портам экваториального уровня приведен в материалах работ [4, 5].

Биологическая защита, выполненная из бетона, имеет толщину 200 см. Перед ней располагается стальной криостат толщиной 10 см. Дверь в каждом порту соединена с криостатом переходной камерой в форме цилиндра. Внутренний радиус этой конструкции равен 110 см, а толщина ее стальной стенки — 10 см. Плазма задана источником из стандартной модели, но развернутым на 360° .

Модель реактора создана таким образом, что допускает свое вращение относительно центра в горизонтальной плоскости специальным преобразованием поверхностей, которые ее образуют. Это удобно как для выполнения сечений и их визуализации, так и для задания границ источника в плазме. Эффективность выборки из объема существенно увеличивается, если контур источника сориентировать вдоль одной из осей координат X или Y .

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ПОРТ № 11

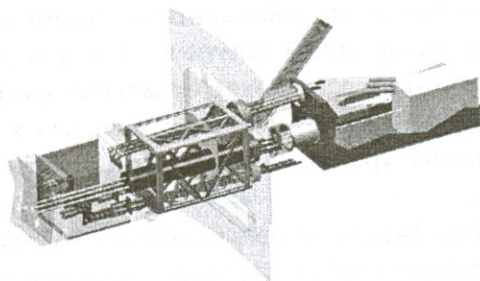


Рис. 4. Изомерный вид диагностических систем порта № 11

го и диагностического оборудования порта. Задняя стенка опор имеет толщину 200 см, а боковая и передняя — по 50 см. Для ряда опор боковые стенки, примыкающие к биологической защите, на всю высоту этажа удалены (рис. 2, 3).

Порты № 4–7 предназначены для инжекторов и поэтому выделены в отдельное помещение. Порты № 1, 2, 18 отведены для размещения испытательных модулей. Для этих портов на внешней границе опор предусмотрены стальные двери толщиной 10 см. В портах № 13–14 размещается система

В порту № 11 реактора ИТЭР устанавливаются пять диагностических систем. Список и краткое описание их приведены в табл. 1. Изомерный вид этих диагностических систем, интегрированных для данного порта, показан на рис. 4. Они были внесены в ту часть модели реактора (рис. 5), которая соответствует порту № 11.

Таблица 1. Описание диагностических систем, размещаемых в модели порта № 11 реактора ИТЭР

№	Комментарий	Аббревиатура
E.03	Монитор примесей в основной плазме включает две системы: VUV-E (диагностика в области вакуумного ультрафиолета) – представляет трубу диаметром 5 см, проходящую от первой стенки до анализатора VUV-D – описания нет. Принимаем внутренний диаметр каждой трубы 14 см	VUV-E VUV-D
E.05	Рентгеновские кварцевые спектрометры включают две системы: XCS-S – свет по прямому каналу диаметром 7 см проходит от первой стенки до бокса с первичным вакуумом XCS-A – имеет пять прямых каналов диаметром 2,5 см, в области за биологической защитой они делают излом, уменьшая прямой прострел на кристалл и детектор	XCS-S XCS-A
E.08	NPA – анализаторы нейтральных частиц. Прямой конический канал. На первой стенке внешнего бланкета диаметр канала – 20 см, около входа в анализатор – 5 см	NPA
F.02	Рефлектометрия основной плазмы. Система состоит из ломаных каналов. В систему входят две пары подсистемы LFS-X и четыре пары подсистемы LFS-O, т.е. всего 12 каналов. Диаметр каналов 9 см. Они группируются в нижней части порта в области криостата.	Рефлектометрия
F.03	Рефлектометрия для определения положения плазмы. Система состоит из четырех пар антенн. Они совмещены с F.02. Описания конструкции нет.	Рефлектометрия

Для систем NPA, XCS-S, VUV-D и VUV-E в области между опорами в двух метрах от двери в биологической защите смоделированы боксы первичного вакуума, имеющие толщину стальной стенки 1 см. Они были объединены под корпусом, поддерживающим вторичный вакуум (рис. 6), у которого стальная стенка имеет толщину 0,3 см. На оси каналов размещены рассеивающие центры, имитирующие зеркала из стали толщиной 2 см и размером с диаметр канала, или детекторы из стекла. Некоторые данные о координатах осей каналов, их количестве, размерах, а также габаритные размеры боксов по диагностическим системам сведены в табл. 2.

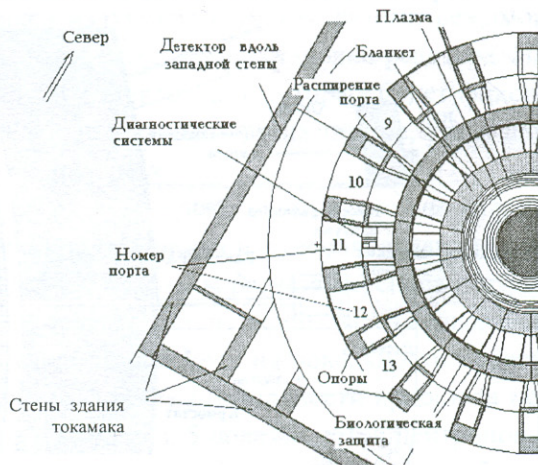


Рис. 5. Фрагмент горизонтального сечения модели реактора ИТЭР с портом № 11 (повернуто на -30°)

Таблица 2. Геометрические параметры каналов диагностических систем в модели экваториального порта № 11 реактора ИТЭР (размеры и координаты в см)

Диагностика	Координата на оси		Число каналов × диаметр	Толщина стенки канала	Габаритный размер бокса первичного вакуума – $X \times Y \times Z$
	Y	Z			
NPA	40	30	$1 \times \varnothing 20 (X=850)$ $\varnothing 5 (X=1990)$	1	$60 \times 27 \times 41$
XCS-S	25	39	$1 \times \varnothing 7$	1	$80 \times 24 \times 20$
VUV-E	25	21	$1 \times \varnothing 5$	1	$60 \times 52 \times 21$
VUV-D	$Y_1=20$ $Y_2=0$ $Y_3=-20$	В плоскости $Z=70$	$3 \times \varnothing 14$	1	$61 \times 110 \times 20$
XCS-A	В плоскости $Y=-60$	$Z_i=(40, 50, 60, 70, 80)$	$5 \times \varnothing 3$	Нет	Нет
Рефлектометрия	$Y_i=70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 0, -10, -20, -30, -40$	В плоскости $Z=-30$	$12 \times \varnothing 9$	Нет	Нет

Для удобства задания источника нейтронов при расчете диагностических систем экваториального порта № 11 модель реактора повернута на угол -30° , как это видно на рис. 5. На западной и северной бетонных стенах зала реактора выделены под детекторы 5-сантиметровые слои, обращенные в сторону порта. Ширина детекторов составляет 200 см, высота – 438 см (на всю высоту помещения в экваториальном уровне). Для детализации вкладов в радиационную обстановку за биологической защитой отдельных диагностических систем порта № 11 детектор напротив порта разделен на несколько мелких детекторов. На каждый такой детектор проецируются отверстия каналов одной системы.

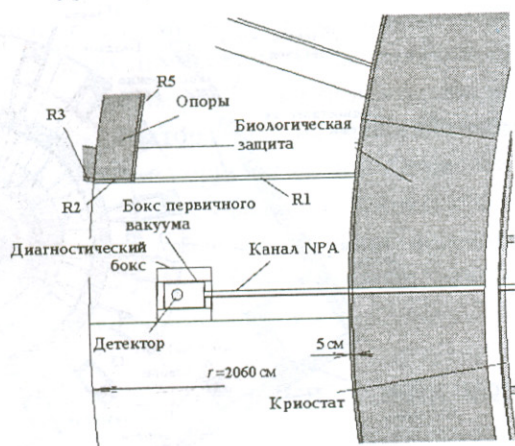


Рис. 6. Горизонтальное сечение диагностической системы NPA за экваториальным портом № 11

На рис. 7 показано взаимное расположение каналов на внешней границе биологической защиты и границы детекторов ($d1-d5$) в проекции на плоскость нормальной оси X .

Расчет радиационной обстановки за биологической защитой выполнялся поэтапно, оценивая отдельно вклад каждой диагностической системы. При расчете прямых каналов

источник был задан в объеме плазмы, на которую смотрит канал, и на поверхности первой стенки внутреннего blankets напротив канала.

В первом варианте нейтроны источника имели параметры термоядерных нейтронов, во втором – их энергия соответствовала энергетическому спектру рассеянных нейтронов на данном участке blankets.

Нейтронно-физический расчет пяти диагностических систем выполнен по программе MCNP-4b с использованием поточечных констант FENDL-2. Представляемые результаты нормированы на 500 МВт термоядерной мощности реактора ИТЭР.

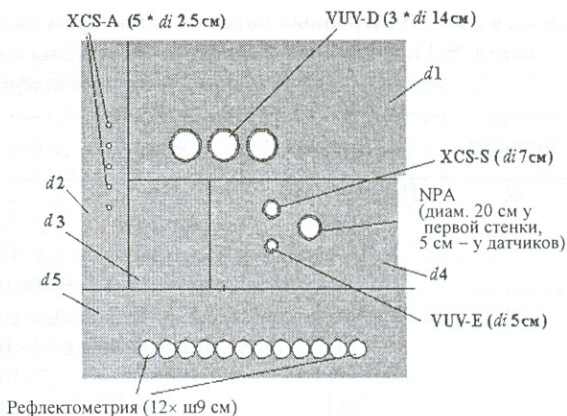


Рис. 7. Вертикальное сечение модели реактора ИТЭР в биологической защите напротив экваториального порта № 11

РЕЗУЛЬТАТЫ НЕЙТРОННОГО РАСЧЕТА

Проведенный расчет с диагностическими каналами экваториального порта № 11 является первым этапом оценки вклада в излучение реактора за биологическую защиту. Радиационная обстановка в этой области должна определяться как сумма вкладов всех возможных источников излучения с учетом разных режимов работы реактора с целью правильно рассчитать дозу после остановки реактора. На примере данного порта был составлен список детекторов, в которых будет фиксироваться нейтронный поток как для определения вклада других портов, так и для последующего расчета в них источников γ -излучения.

Как было сказано, расчет излучения по каналам проведен отдельно для каждого диагностического канала порта № 11 и типа источника излучения, являющегося определяющим для него. В табл. 3 приведены результаты расчета переноса излучения для объемного источника нейтронов плазмы по четырем диагностикам. В табл. 4 даны результаты для источника, сформированного на поверхности первой стенки внутреннего blankets для прямых каналов и на поверхности криостата перед последним коленом для ломаных каналов. В табл. 5 показан поток нейтронов в детекторах, суммированный по всем каналам, но с выделением вкладов от объемного и поверхностного типа источника. В этих таблицах приводится как полный нейтронный поток, так и нейтронный поток в трех энергетических интервалах, первый из которых ($>13,5$ МэВ) соответствует термоядерным нейтронам. Детектор d0 является объединением детекторов d1–d5, показанных на рис. 7.

а б л и ц а 3. Нейтронный поток по детекторам на западной стене зала здания ИТЭРа напротив порта № 11, созданный излучением из плазмы (объемный источник) по диагностическим каналам, нормированный на термоядерную мощность реактора 500 МВт

Детектор	ΔЕ, МэВ	NPA	XCS-S	VUV-E	XCS-A	Все системы
d0	Полный поток	$2,04 \times 10^6$	$5,5 \times 10^5$	$4,32 \times 10^5$	$2,88 \times 10^5$	$3,34 \times 10^6$
	>13,5	$0,99 \times 10^6$	$3,2 \times 10^5$	$2,57 \times 10^5$	$1,74 \times 10^5$	$1,74 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$0,55 \times 10^6$	$1,5 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$	$0,84 \times 10^5$	$0,87 \times 10^6$
	<0,1	$0,49 \times 10^6$	$0,79 \times 10^5$	$0,60 \times 10^5$	$0,29 \times 10^5$	$0,66 \times 10^6$
d1	Полный поток	$5,13 \times 10^5$	$9,1 \times 10^4$	$2,7 \times 10^4$	$7,0 \times 10^3$	$6,38 \times 10^5$
	>13,5	$0,3 \times 10^5$	$0,85 \times 10^4$	$0,17 \times 10^4$	$1,1 \times 10^3$	$0,41 \times 10^5$
	0,1 – 13,5	$1,4 \times 10^5$	$3,7 \times 10^4$	$0,67 \times 10^4$	$2,5 \times 10^3$	$1,86 \times 10^5$
	<0,1	$3,5 \times 10^5$	$4,6 \times 10^4$	$1,84 \times 10^4$	$3,4 \times 10^3$	$4,17 \times 10^5$
d2	Полный поток	$4,74 \times 10^5$	$5,4 \times 10^4$	$1,4 \times 10^4$	$11,3 \times 10^5$	$1,67 \times 10^6$
	>13,5	$0,3 \times 10^5$	$0,71 \times 10^4$	$0,12 \times 10^4$	$6,94 \times 10^5$	$0,73 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$1,3 \times 10^5$	$1,1 \times 10^4$	$0,26 \times 10^4$	$3,29 \times 10^5$	$0,47 \times 10^6$
	<0,1	$3,1 \times 10^5$	$3,6 \times 10^4$	$0,98 \times 10^4$	$1,04 \times 10^5$	$0,46 \times 10^6$
d3	Полный поток	$7,6 \times 10^5$	$3,92 \times 10^5$	$3,03 \times 10^5$	$1,76 \times 10^4$	$1,47 \times 10^6$
	>13,5	$0,51 \times 10^5$	$0,08 \times 10^5$	$0,01 \times 10^5$	$0,10 \times 10^4$	$0,06 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$2,8 \times 10^5$	$2,0 \times 10^5$	$1,57 \times 10^5$	$0,53 \times 10^4$	$0,64 \times 10^6$
	<0,1	$4,4 \times 10^5$	$1,9 \times 10^5$	$1,45 \times 10^5$	$1,2 \times 10^4$	$0,80 \times 10^6$
d4	Полный поток	$1,28 \times 10^7$	$3,83 \times 10^6$	$3,14 \times 10^6$	$7,0 \times 10^3$	$1,98 \times 10^7$
	>13,5	$0,79 \times 10^7$	$2,54 \times 10^6$	$2,10 \times 10^6$	$1,7 \times 10^3$	$1,25 \times 10^7$
	0,1 – 13,5	$0,35 \times 10^7$	$1,00 \times 10^6$	$0,78 \times 10^6$	$3,1 \times 10^3$	$0,53 \times 10^7$
	<0,1	$0,14 \times 10^7$	$0,29 \times 10^6$	$0,26 \times 10^6$	$2,2 \times 10^3$	$0,20 \times 10^7$
d5	Полный поток	$4,3 \times 10^6$	$3,39 \times 10^5$	$1,35 \times 10^5$	$3,3 \times 10^4$	$4,81 \times 10^6$
	>13,5	$0,26 \times 10^6$	$0,26 \times 10^5$	$0,06 \times 10^5$	$0,16 \times 10^4$	$0,29 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$0,89 \times 10^6$	$0,72 \times 10^5$	$0,45 \times 10^5$	$0,85 \times 10^4$	$1,01 \times 10^6$
	<0,1	$3,2 \times 10^6$	$2,41 \times 10^5$	$0,84 \times 10^5$	$2,30 \times 10^4$	$3,55 \times 10^6$

Т а б л и ц а 4. Нейтронный поток по детекторам на стене зала здания ИТЭРа напротив порта № 11, созданный излучением с первой стенки внутреннего бланкета и криостата по каналам отдельных диагностических систем (поверхностный источник), нормированный на термоядерную мощность реактора 500 МВт

Детектор	ΔЕ, МэВ	NPA	XCS-S	VUV-E	XCS-A	VUV-D	Рефлектометрия	Все системы
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d0	П. ¹ поток	$1,49 \times 10^5$	$3,8 \times 10^4$	$5,96 \times 10^4$	$3,53 \times 10^4$	$6,53 \times 10^1$	$8,60 \times 10^1$	$2,82 \times 10^5$
	>0,1	$0,83 \times 10^5$	$2,63 \times 10^4$	$2,94 \times 10^4$	$1,64 \times 10^4$	$2,26 \times 10^1$	$2,85 \times 10^1$	$1,55 \times 10^5$
	<0,1	$0,66 \times 10^5$	$1,17 \times 10^4$	$3,02 \times 10^4$	$1,89 \times 10^4$	$4,27 \times 10^1$	$5,75 \times 10^1$	$1,27 \times 10^5$
d1	П. поток	$4,5 \times 10^4$	$8,2 \times 10^3$	$3,15 \times 10^3$	$1,33 \times 10^3$	$9,90 \times 10^1$	$9,20 \times 10^0$	$5,77 \times 10^4$
	>0,1	$0,85 \times 10^4$	$1,8 \times 10^3$	$0,55 \times 10^3$	$0,18 \times 10^3$	$3,56 \times 10^1$	$1,1 \times 10^0$	$1,05 \times 10^4$
	<0,1	$3,7 \times 10^4$	$6,4 \times 10^3$	$2,6 \times 10^3$	$1,15 \times 10^3$	$6,34 \times 10^1$	$8,2 \times 10^0$	$4,72 \times 10^4$
d2	П. поток	$7,0 \times 10^4$	$7,6 \times 10^3$	$2,1 \times 10^3$	$1,37 \times 10^5$	$4,12 \times 10^1$	$1,86 \times 10^1$	$2,17 \times 10^5$
	>0,1	$1,3 \times 10^4$	$0,9 \times 10^3$	$0,3 \times 10^3$	$0,65 \times 10^5$	$1,37 \times 10^1$	$0,49 \times 10^0$	$0,79 \times 10^5$
	<0,1	$5,7 \times 10^4$	$6,7 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$	$0,72 \times 10^5$	$2,75 \times 10^1$	$1,37 \times 10^1$	$1,38 \times 10^5$
d3	П. поток	$4,9 \times 10^4$	$2,93 \times 10^4$	$3,07 \times 10^4$	$3,8 \times 10^3$	$1,62 \times 10^2$	$1,76 \times 10^2$	$1,13 \times 10^5$
	>0,1	$0,1 \times 10^4$	$1,44 \times 10^4$	$1,00 \times 10^4$	$0,2 \times 10^3$	$0,59 \times 10^2$	$0,51 \times 10^2$	$0,26 \times 10^5$
	<0,1	$4,8 \times 10^4$	$1,49 \times 10^4$	$2,07 \times 10^4$	$3,6 \times 10^3$	$1,04 \times 10^2$	$1,25 \times 10^2$	$0,87 \times 10^5$

¹ Полный.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
d4	П. поток	$8,14 \times 10^5$	$2,47 \times 10^5$	$4,45 \times 10^5$	$1,2 \times 10^3$	$8,15 \times 10^1$	$1,76 \times 10^2$	$1,51 \times 10^6$
	>0,1	$6,17 \times 10^5$	$2,00 \times 10^5$	$2,30 \times 10^5$	$0,1 \times 10^3$	$2,70 \times 10^1$	$0,56 \times 10^2$	$1,05 \times 10^6$
	<0,1	$1,92 \times 10^5$	$0,48 \times 10^5$	$2,15 \times 10^5$	$3,6 \times 10^3$	$5,45 \times 10^1$	$1,20 \times 10^2$	$0,46 \times 10^6$
d5	П. поток	$5,3 \times 10^5$	$4,35 \times 10^4$	$2,00 \times 10^4$	$5,3 \times 10^3$	$3,3 \times 10^1$	$2,40 \times 10^2$	$6,00 \times 10^5$
	>0,1	$0,89 \times 10^5$	$0,72 \times 10^4$	$0,33 \times 10^4$	$0,6 \times 10^3$	$0,19 \times 10^1$	$0,82 \times 10^2$	$1,01 \times 10^5$
	<0,1	$4,41 \times 10^5$	$3,63 \times 10^4$	$1,67 \times 10^4$	$4,7 \times 10^3$	$3,1 \times 10^1$	$1,58 \times 10^2$	$4,99 \times 10^5$

Т а б л и ц а 5. Соотношение вкладов в полный нейтронный поток в детекторах напротив порта № 11 излучения по всем каналам от объемного и поверхностного источников, нормированные на 500 МВт термоядерной мощности реактора

Детектор	ΔE , МэВ	Тип источника нейтронного излучения		
		Объемный в плазме	Поверхностный	Полный источник
1	2	3	4	5
d0	Полный поток	$3,34 \times 10^6$	$2,82 \times 10^5$	$3,62 \times 10^6$
	>13,5	$1,74 \times 10^6$		$1,74 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$0,87 \times 10^6$	$1,55 \times 10^5$	$1,12 \times 10^6$
	<0,1	$0,66 \times 10^6$	$1,27 \times 10^5$	$0,78 \times 10^6$
d1	Полный поток	$6,38 \times 10^5$	$5,77 \times 10^4$	$7,00 \times 10^5$
	>13,5	$0,41 \times 10^5$		$0,44 \times 10^5$
	0,1 – 13,5	$1,86 \times 10^5$	$1,05 \times 10^4$	$1,96 \times 10^5$
	<0,1	$4,17 \times 10^5$	$4,72 \times 10^4$	$4,63 \times 10^5$
d2	Полный поток	$1,67 \times 10^6$	$2,17 \times 10^5$	$1,89 \times 10^6$
	>13,5	$0,73 \times 10^6$		$0,74 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$0,47 \times 10^6$	$0,79 \times 10^5$	$0,55 \times 10^6$
	<0,1	$0,46 \times 10^6$	$1,38 \times 10^5$	$0,60 \times 10^6$
d3	Полный поток	$1,47 \times 10^6$	$1,13 \times 10^5$	$1,58 \times 10^6$
	>13,5	$0,06 \times 10^6$		$0,06 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$0,64 \times 10^6$	$0,26 \times 10^5$	$0,66 \times 10^6$
	<0,1	$0,80 \times 10^6$	$0,87 \times 10^5$	$0,88 \times 10^6$
d4	Полный поток	$1,98 \times 10^7$	$1,51 \times 10^6$	$2,13 \times 10^7$
	>13,5	$1,25 \times 10^7$		$1,25 \times 10^7$
	0,1 – 13,5	$0,53 \times 10^7$	$1,05 \times 10^6$	$0,64 \times 10^7$
	<0,1	$0,20 \times 10^7$	$0,46 \times 10^6$	$0,24 \times 10^7$
d5	Полный поток	$4,81 \times 10^6$	6×10^5	$5,45 \times 10^6$
	>13,5	$0,29 \times 10^6$		$0,29 \times 10^6$
	0,1 – 13,5	$1,01 \times 10^6$	$1,01 \times 10^5$	$1,11 \times 10^6$
	<0,1	$3,55 \times 10^6$	$4,99 \times 10^5$	$4,05 \times 10^6$

Основной вклад в нейтронный поток создает источник, связанный с прямым каналом диагностической системы NPA. В детекторе d0 на западной стене здания, которому соответствует проекция проходного сечения порта № 11, 63% всего излучения создано этим каналом. 16 и 14% излучения по нейтронам добавляют в этот детектор прямые каналы систем XCS-S и VUV-E соответственно. Излучение по последним коленам ломаных каналов составляет незначительную добавку в любом из рассмотренных детекторов. Следует обратить внимание, что даже на таком большом детекторе, как d0, доля нейтронов с энергией выше 13,5 МэВ составляет половину полного потока, т.е. спектр нейтронов напротив порта жесткий. На участке западной стены зала, охватывающем три прямых канала NPA, XCS-S и VUV-E (детектор d4),

полный поток нейтронов составит $2,13 \cdot 10^7$ н/(см²·с), а быстрый (выше 0,1 МэВ) – $1,9 \cdot 10^7$ н/(см²·с). Как видно из табл. 5, вклад поверхностного нейтронного источника по всем детекторам регистрации (d0–d5) не превышает 11%. Основной вклад в радиационную обстановку в реакторном зале дает излучение нейтронов из плазмы.

Максимальный поток за биологической защитой $3,96 \cdot 10^9$ н/(см²·с) зафиксирован в детекторе радиусом 5 см на оси канала NPA. В четыре раза меньше ($1,05 \cdot 10^9$ н/(см²·с) – поток в аналогичном детекторе d0 на оси канала XCS-S. Эти значения полного потока нейтронов приведены в табл. 6. Здесь также дается изменение полного потока для различных участков зала реактора ИТЭР в радиальном направлении от биологической защиты к стенам здания, а также для соседних с портом № 11 портов № 8–13.

Таблица 6. Полный нейтронный поток за биологической защитой на стенах помещений, созданный излучением диагностических каналов экваториального порта № 11 реактора ИТЭР, нормированный на 500 МВт термоядерной мощности

	NPA	XCS-S	VUV-E	VUV-D + Рефлектометрия	XCS-A	Все системы
1	2	3	4	5	6	7
Боковые стены левой опоры (№ 12–11) от выхода из порта № 11						
L1	5,80E+06 ¹	4,09E+05	8,09E+04	8,11E+01	2,08E+04	6,31E+06
L2	5,60E+06	4,01E+05	8,44E+04	6,27E+01	1,57E+04	6,10E+06
L3	3,31E+06	2,47E+05	5,07E+04	3,13E+01	9,21E+03	3,61E+06
L4	1,78E+06	1,28E+05	2,92E+04	1,56E+01	6,30E+03	1,94E+06
L5	4,07E+06	2,79E+05	5,81E+04	5,56E+01	1,37E+04	4,42E+06
L6	2,83E+05	2,62E+04	9,51E+03	5,05E+00	4,70E+03	3,23E+05
Боковые стены правой опоры (№ 11–10) от выхода из порта № 11						
R1	8,34E+06	4,50E+05	8,53E+04	7,03E+01	1,11E+04	8,88E+06
R2	8,31E+06	5,22E+05	8,63E+04	5,65E+01	1,15E+04	8,93E+06
R3	4,00E+06	2,55E+05	5,11E+04	2,96E+01	7,49E+03	4,31E+06
R4	1,89E+06	1,23E+05	2,82E+04	1,49E+01	5,46E+03	2,04E+06
R5	5,78E+06	3,03E+05	5,80E+04	4,88E+01	7,45E+03	6,14E+06
R6	3,38E+05	2,40E+04	8,67E+03	4,34E+00	2,39E+03	3,73E+05
Пол перед портом по портам № 8–12: в радиальных границах 1680–2060 см (дет. A1)						
№ 8	2,31E+03	2,49E+01	3,98E+00	5,28E-02	0,00E+00	2,34E+03
№ 9	3,67E+05	2,36E+04	3,67E+03	2,27E+00	2,87E+02	3,94E+05
№ 10	1,74E+06	8,76E+04	1,78E+04	1,29E+01	2,65E+03	1,85E+06
№ 11	9,39E+06	5,50E+05	1,14E+05	9,38E+01	1,73E+04	1,01E+07
№ 12	4,70E+04	3,86E+03	1,27E+03	2,62E-01	5,85E+01	5,22E+04
Пол перед портом по портам № 8–12: в радиальных границах 2060–2560 см (дет. A2)						
№ 8	6,38E+02	2,07E+02	1,77E+01	2,71E-03	0,00E+00	8,62E+02
№ 9	1,31E+05	7,28E+03	1,22E+03	9,78E-01	2,77E+02	1,40E+05
№ 10	5,27E+05	3,06E+04	6,62E+03	4,83E+00	1,10E+03	5,65E+05
№ 11	3,31E+06	2,07E+05	4,88E+04	2,56E+01	8,38E+03	3,58E+06
№ 12	2,08E+04	2,36E+03	3,51E+02	9,65E-02	1,84E+02	2,37E+04
Пол перед портом по портам № 8–12: в радиальных границах 2560–3200 см (дет. A3)						
№ 8	1,12E+04	6,57E+02	1,40E+02	9,09E-02	5,81E+01	1,20E+04
№ 9	6,05E+04	4,00E+03	9,65E+02	5,59E-01	1,90E+02	6,56E+04
№ 10	2,24E+05	1,37E+04	3,96E+03	2,31E+00	1,07E+03	2,42E+05
№ 11	7,86E+05	5,60E+04	1,58E+04	8,13E+00	4,46E+03	8,62E+05
№ 12	1,08E+05	1,01E+04	3,35E+03	1,80E+00	1,74E+03	1,23E+05

¹E+06=10⁶.

1	2	3	4	5	6	7
Пол в границах опор, соседних с портами: в радиальных границах 1680–2060 см (дет. S1)						
№ 9–10	6,44E+05	3,46E+04	7,67E+03	4,97E+00	1,74E+03	6,88E+05
№ 10–11	4,72E+06	2,35E+05	4,94E+04	3,50E+01	5,47E+03	5,01E+06
№ 11–12	3,16E+06	2,42E+05	4,79E+04	4,28E+01	1,07E+04	3,46E+06
№ 12–13	6,76E+03	2,54E+02	1,09E+02	3,31E-02	0	7,12E+03
Пол в границах опор, соседних с портами: в радиальных границах 2060–2560 см (дет. S2)						
№ 9–10	4,76E+04	1,73E+03	1,04E+03	4,77E-01	2,59E+01	5,04E+04
№ 10–11	1,98E+05	1,21E+04	1,84E+03	1,25E+00	4,21E+02	2,13E+05
№ 11–12	1,52E+05	1,10E+04	2,46E+03	1,25E+00	7,43E+02	1,67E+05
№ 12–13	1,52E+03	2,26E+02	6,39E+01	1,86E-02	0	1,81E+03
Пол в границах опор, соседних с портами: в радиальных границах 2560–3200 см (дет. S3)						
№ 9–8	1,23E+05	6,63E+03	1,49E+03	1,12E+00	5,76E+02	1,32E+05
№ 10–9	3,86E+05	2,53E+04	7,86E+03	3,85E+00	2,24E+03	4,22E+05
№ 11–10	3,23E+05	2,64E+04	8,63E+03	4,68E+00	3,91E+03	3,62E+05
№ 12–11	3,80E+04	3,16E+03	1,51E+03	7,48E-01	9,77E+02	4,37E+04
Биологическая защита – внешний слой 5 см						
d1+d3+d4	1,34E+07	7,13E+05	1,43E+05	1,73E+02	1,71E+04	1,43E+07
d2	4,60E+06	3,42E+05	6,64E+04	6,24E+01	4,00E+04	5,05E+06
d5	7,95E+06	4,29E+05	1,03E+05	1,25E+02	1,47E+04	8,50E+06
Криостат – внешний слой 2 см						
d1+d3+d4	7,22E+07	5,95E+06	1,88E+06	3,36E+04	1,04E+06	8,11E+07
d2	3,08E+07	3,05E+06	1,16E+06	6,58E+03	2,91E+06	3,79E+07
d5	3,36E+07	2,60E+06	1,14E+06	2,30E+04	4,56E+05	3,78E+07
Криостат – внутренний слой 8 см						
d1+d3+d4	8,71E+07	6,84E+06	2,21E+06	1,44E+04	9,75E+05	9,71E+07
d2	4,22E+07	3,69E+06	1,42E+06	3,15E+03	3,51E+06	5,08E+07
d5	4,07E+07	3,00E+06	1,32E+06	9,16E+03	4,75E+05	4,55E+07
Стенки диагностического бокса вторичного вакуума						
Передняя	2,64E+07	1,65E+06	3,20E+05	3,28E+02	3,30E+04	2,84E+07
Задняя	1,61E+07	1,49E+06	8,54E+05	2,56E+02	1,95E+04	1,85E+07
Боковые	1,49E+07	1,02E+06	1,72E+05	9,39E+01	3,55E+04	1,61E+07
Верх/низ	1,23E+07	9,39E+05	1,44E+05	1,01E+02	2,01E+04	1,34E+07
Стенки камеры первичного вакуума диагностической системы NPA						
Передняя	9,86E+07	4,81E+06	4,10E+05	1,29E+02	1,01E+04	1,04E+08
Задняя	1,55E+08	1,80E+06	4,68E+05	4,99E+01	1,29E+04	1,57E+08
Боковые	5,35E+07	1,91E+06	4,39E+05	6,62E+01	1,08E+04	5,58E+07
Верх/низ	4,56E+07	1,98E+06	3,08E+05	7,44E+01	6,19E+03	4,78E+07
d0	3,96E+09	2,86E+06	3,29E+05	6,00E+01	1,00E+04	3,96E+09
Стенки камеры первичного вакуума диагностической системы XCS-E						
Передняя	3,54E+07	8,18E+06	5,74E+05	2,31E+02	4,08E+04	4,42E+07
Задняя	2,48E+07	3,96E+07	4,19E+05	1,12E+02	4,84E+04	6,48E+07
Боковые	3,78E+07	1,21E+07	3,27E+05	1,09E+02	7,55E+04	5,03E+07
Верх/низ	2,09E+07	9,93E+06	4,81E+05	1,88E+02	2,56E+04	3,14E+07
d0	3,51E+07	1,05E+09	5,43E+05	1,03E+02	2,00E+04	1,05E+09
Стенки камеры первичного вакуума диагностической системы VUV-E						
Передняя	2,60E+07	5,00E+06	1,13E+06	9,97E+01	1,35E+04	3,22E+07
Задняя	2,53E+07	1,53E+06	6,08E+07	6,83E+01	6,28E+03	8,76E+07
Боковые	2,06E+07	2,99E+06	7,32E+05	9,08E+01	1,95E+04	2,44E+07
Верх/низ	2,60E+07	5,00E+06	1,13E+06	9,97E+01	1,35E+04	3,22E+07
d0	3,11E+07	2,93E+06	9,08E+06	9,00E+01	1,00E+04	7,84E+07

1	2	3	4	5	6	7
Стенки камеры первичного вакуума диагностической системы XCS-A						
Передняя	1,98E+07	2,53E+06	2,21E+05	3,64E+02	6,77E+04	2,26E+07
Задняя	1,41E+07	2,16E+06	2,24E+05	2,80E+03	2,63E+04	1,65E+07
Боковые	1,64E+07	2,15E+06	1,45E+05	1,81E+02	6,96E+04	1,87E+07
Верх/низ	1,68E+07	3,26E+06	2,16E+05	2,73E+02	3,52E+04	2,03E+07

Уровень потока на правой (от выхода из порта № 11 – детекторы R1–R4) боковой стенке в 1,5 раза выше, чем на левой стенке, и равен $\sim 9 \cdot 10^6$ н/(см²·с). На участках опоры, обращенных к стенам зала (L6, R6), поток составит $\sim 3,5 \cdot 10^5$ н/(см²·с), а на участках, обращенных к биологической защите (L5, R5), – $\sim (4,4\text{--}6,1) \cdot 10^6$ н/(см²·с). Для перекрытий этажа нейтронный поток приводится для пола (слой бетона 5 см) в трех радиальных зонах: свободных от опор, напротив портов № 8–12, а также зонах, находящихся в створе опор (см. рис. 4). За дверью биологической защиты порта № 11 полный нейтронный поток (в радиальных границах 1680–2060 см) составит $1 \cdot 10^7$ н/(см²·с), а у соседнего порта № 10 – $1,9 \cdot 10^6$ н/(см²·с). К портам № 8 и 12 поток ослабевает из-за наличия перегородок, отделяющих эти порты. В третьей радиальной зоне (2560–3200 см), находящейся за внешней частью опор, поток изменяется от $1 \cdot 10^4$ н/(см²·с) для порта № 8 до $8,6 \cdot 10^5$ н/(см²·с) для порта № 11.

Для внешнего слоя биологической защиты ниже уровня $Z=0$ (детектор d5) поток нейтронов составит $8,5 \cdot 10^6$ н/(см²·с), а выше, где выходят главные прямые каналы, – $1,4 \cdot 10^7$ н/(см²·с). В аналогичных областях на криостате полный нейтронный поток составит $(4\text{--}9) \cdot 10^7$ н/(см²·с).



Координаты детекторов по западной стене токамака

Рис. 8. Изменение полного нейтронного потока, созданного излучением диагностических каналов порта № 11 реактора ИТЭР, по детекторам на западной стене здания токамака



Координаты детекторов по южной стене токамака

Рис. 9. Изменение полного нейтронного потока, созданного излучением диагностических каналов порта № 11 реактора ИТЭР, по детекторам на южной стене здания токамака

Наибольшему уровню облучения подвергаются приемные устройства и боксы рассмотренных диагностических систем. Канал диагностики NPA создает средний на задней стенке своего бокса первичного вакуума нейтронный поток $1,57 \cdot 10^8$ н/(см²·с) (см. табл. 6, строка «Задняя»), а на передней – $1,0 \cdot 10^8$ н/(см²·с). Излучение по этому каналу дает основной (подавляющий) вклад в конструктивные элементы диагностических систем порта № 11. Уровень среднего полного потока нейтронов в стальных стенках камер не опускается ниже $2 \cdot 10^7$ н/(см²·с).

Излучение каналов, не имея на своем пути преграды, попадает на стены реакторного зала. Характер его изменения от координаты, исчисляемой от центральных плоскостей симметрии здания токамака, на западной стене показан на рис. 8, а на южной – на рис. 9 (максимальное плюсовое значение координаты для западной стены соответствует северо-западному углу стены). Напротив порта № 11 уровень потока в слое бетона 5 см, высотой 4,4 м и шириной 2 м составит $2,53 \cdot 10^6$ н/(см²·с), ослабевая к юго-западному углу (координата –2400 см) здания до уровня $1,69 \cdot 10^5$ н/(см²·с), а к линии симметрии здания (координата 0/+200 см) – до значения $1,48 \cdot 10^5$ н/(см²·с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на сведениях о конструкции комплекса реактора ИТЭР, распространенных в итоговых документах центральной команды, создана модель главного здания токамака с термоядерным реактором и его защитой для трехмерных расчетов переноса излучения. В модели реактора размещены оборудование и каналы для четырех диагностических систем (NPA, XCS, VUV, рефлектометрия) экваториального порта № 11.

Проведен расчет переноса излучения по прямым и ломаным каналам за пределы биологической защиты реактора в область реакторного зала по программе MCNP-4b с поточечными константами FENDL-2. Оценена радиационная обстановка в помещениях экваториального уровня зала реактора, учитывая вклад излучения каналов одного порта. Согласно результатам расчетов, нормированных на 500 МВт термоядерной мощности, на западной стене здания полный поток нейтронов изменился от значения $2,53 \cdot 10^6$ н/(см²·с) на участке напротив порта № 11 до $1,7 \cdot 10^5$ н/(см²·с) в области юго-западного угла и $1 \cdot 10^4$ н/(см²·с) – в северо-западном углу. Основным источником излучения за биологической защитой является канал диагностической системы NPA. На его оси в области опор здания полный поток нейтронов достигает величины $4 \cdot 10^9$ н/(см²·с). Излучение этого канала вместе с каналом системы XCS-S создает в стальных стенках боксов первичного вакуума нейтронный поток на уровне $2 \cdot 10^7$ – $2 \cdot 10^8$ н/(см²·с), а на боковых стенах опор порта № 11 – $6 \cdot 10^6$ н/(см²·с).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **MCNP-4B** Monte-Carlo N-Particle Transport Code System.
2. **Design** Description Document, Tokamak complex, 6.2 A.01.
3. **Design** Description Document, Diagnostic and TF Fast Discharge Resistors and Capacitors Building(74), 6.2 A.06.
4. **Technical** basis for the ITER final design report, G A0 FDR 1 01-03-05 W 0.2, ch. 3.6.
5. **Plant** description document, G A0 FDR 1 00-11-16 W 0.1.
6. **Design** Description Document, Diagnostic System Engineering, 5.5N, Annex 102.
7. **Design** Description Document, Diagnostics, 5.5E Spectroscopic and NPA Systems (DDD 5.5E).
8. **Design** Description Document, Diagnostics, 5.5F Microwave (DDD 5.5F).

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2003 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 1, с. 36–47.