

УДК 533.9.082.79

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР*А.О. Ковалев, Р.Н. Родионов, Д.В. Портнов, В.А. Воробьёв, Ю.Г. Высоких, С.Ю. Обудовский, Ю.А. Кашук**Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия*

В статье приведены результаты анализа радиационных условий детекторных модулей диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП) токамака-реактора ИТЭР. Диагностика ДМНП предназначена для измерения полного выхода нейтронов и термоядерной мощности ИТЭР. На заключительной стадии проектирования системы ДМНП принято решение об изменении места размещения детекторных модулей диагностики, что потребовало проведения уточняющих расчётов энергетического распределения плотности потока нейтронов в зоне расположения детекторов диагностики, скорости реакции деления урана в камерах деления ДМНП и функции Грина скорости реакции деления. Проведено исследование отклика системы на пространственное распределение выхода DT-нейтронов из плазмы ИТЭР для стандартного сценария 500 МВт термоядерной мощности. Моделирование выполнено в рекомендованной трёхмерной модели токамака-реактора ИТЭР с использованием кода MCNP. На основании результатов нейтронно-физического анализа и требований, предъявляемых к диагностике Международной организацией ИТЭР, подтверждены ожидаемые рабочие характеристики диагностики ДМНП.

Ключевые слова: нейтронная диагностика плазмы, радиометр потока термоядерных нейтронов, характеристики радиационных полей, ИТЭР.

RADIATION CONDITIONS ANALYSIS OF DNFM ITER DIAGNOSTIC TOOL*A.O. Kovalev, R.N. Rodionov, D.V. Portnov, V.A. Vorobiev, Yu.G. Vysokih, S.Yu. Obudovsky, Yu.A. Kashchuk**Project Center ITER, Moscow, Russia*

This paper presents the results of radiation conditions analysis of the detector modules of diagnostic tool «Divertor Neutron Flux Monitor» (DNFM) of the ITER tokamak-reactor. Diagnostic tool is designed to measure neutron yield and fusion power of ITER. At the final design stage of the DNFM system it was decided to change the location of the detector modules of diagnostic tool, which required a refinement of calculations of the energy distribution of neutron flux in the area of the detectors, the fission rate of uranium in the fission chambers of the DNFM and the Green's function of fission rate. A study of the response of the system to the neutron yield spatial distribution of 500 MW DT ITER plasma was carried out. Modeling is performed with the three-dimensional model of ITER tokamak-reactor using MCNP code. The expected performance characteristics of DNFM system based on the results of neutron transport analysis and requirements to diagnostics from ITER Organization have been confirmed.

Key words: plasma neutron diagnostics, fusion neutron flux monitor, characteristics of radiation fields, ITER.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-18-26

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика ДМНП предназначена для измерения полного выхода нейтронов (нейтр./с) и термоядерной мощности плазмы ИТЭР в широком динамическом диапазоне измерений системы. В качестве детекторов нейтронного излучения применены ионизационные камеры деления (ИКД) типа КНТ-30 с ^{235}U (~90%) и высокочистым ^{238}U (99,9999%) [1].

В табл. 1 приведены требования, предъявляемые Международной организацией ИТЭР, к типу измеряемых параметров горения плазмы, диапазону измерений и их погрешности. Временное разрешение диагностики ДМНП 1 мс [2].

Таблица 1. Требования к измерениям диагностики ДМНП

Параметр	Сценарий плазмы	Диапазон	Погрешность, %
Выход нейтронов, нейтр./с	DD	10^{14} — 10^{17}	20
	DT	10^{17} — $3,2 \cdot 10^{20}$	10
Термоядерная мощность, МВт	DT	0,1—900	10

Нейтронно-физический анализ — один из ключевых этапов разработки всех систем токамака-реактора ИТЭР [2]. Такой анализ включает в себя моделирование нейтронного источника, транспорта нейтронов и порождаемого ими мгновенного γ -излучения в конструкционных материалах токамака и его системах, расчёт абсолютных значений энергетического распределения потоков ионизирующего излучения в местах расположения исследуемых компонентов. Данные о радиационных полях используют для расчёта энерговыделения в элементах конструкций, радиационных повреждений и активации мате-

риалов для заданного сценария работы установки. Также в анализ входит моделирование динамики мощности дозы наведённого γ -излучения вокруг конструкции установки в период выдержки после завершения эксплуатации реактора. Для нейтронных диагностик проводится анализ абсолютной чувствительности детекторов к нейтронному и γ -излучению в месте расположения детекторов. В статье представлены результаты нейтронно-физического анализа работы детекторных модулей диагностики ДМНП токамака-реактора ИТЭР. Выполнен сравнительный анализ отклика диагностики к рекомендованному Международной организацией ИТЭР нейтронному профилю DT-плазмы ИТЭР (ток 15 МА, термоядерная мощность 500 МВт, соотношение ионов D:T = 1:1) для текущей и предыдущей версий конструкции детекторных модулей диагностической системы. Другие результаты анализа, такие как активация конструкционных материалов диагностики и динамика спада наведённой активности, представлены в работе [3].

С целью исследования особенностей работы диагностической системы в условиях нестационарного источника нейтронов [4] авторами разработан алгоритм, представленный в работах [5–7]. Ключевым элементом алгоритма является анализ функции Грина [8] и соответствующей скорости реакции деления урана в ИКД ДМНП. Достоверность результатов моделирования функции Грина подтверждается совпадением скоростей реакции деления от нейтронного источника с известным распределением, рассчитанных как с использованием функции Грина, так и с помощью прямого моделирования переноса нейтронов. Под прямым моделированием авторы статьи подразумевают расчётную задачу MCNP [9], в которой реалистичная трёхмерная модель источника DT-нейтронов ИТЭР описана непосредственно во входном файле.

Использованная функция Грина аналогична предложенной в [8]. В качестве функции Грина берётся плотность потока нейтронов в точке наблюдения, создаваемая элементарным точечным источником. Элементарный точечный источник определён как источник, испускающий 1 нейтр./с из единицы объёма. Результатом интегрирования произведения функции Грина и пространственного распределения удельной интенсивности источника нейтронов по всему объёму источника является плотность потока нейтронов, создаваемая объёмным источником нейтронов. Если ввести функцию Грина как скорость реакции деления в точке наблюдения от элементарного точечного источника, то результатом интегрирования аналогичного произведения будет скорость реакции деления, создаваемая объёмным плазменным источником нейтронов.

Результаты нейтронно-физического анализа позволяют обосновать принятую конструкцию диагностики, подтвердить соответствие возможностей системы предъявляемым к ней требованиям (динамический диапазон измерений, временное разрешение, погрешность).

ОПИСАНИЕ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ДМНП

Расчётная модель транспорта нейтронов для диагностики ДМНП вставлена в трёхмерную модель токамака-реактора ИТЭР «C-Model» [10]. Детекторные модули диагностики расположены под диверторной кассетой на нижней внутренней поверхности вакуумной камеры токамака-реактора ИТЭР. Размещение модулей ДМНП показано на рис. 1. Модуль ДМНП состоит из детекторных блоков двух типов: ИКД с ^{235}U и ^{238}U . В каждом блоке расположены по три ИКД. В табл. 2 приведены массы оксида урана, нанесённые на электроды ИКД ДМНП.

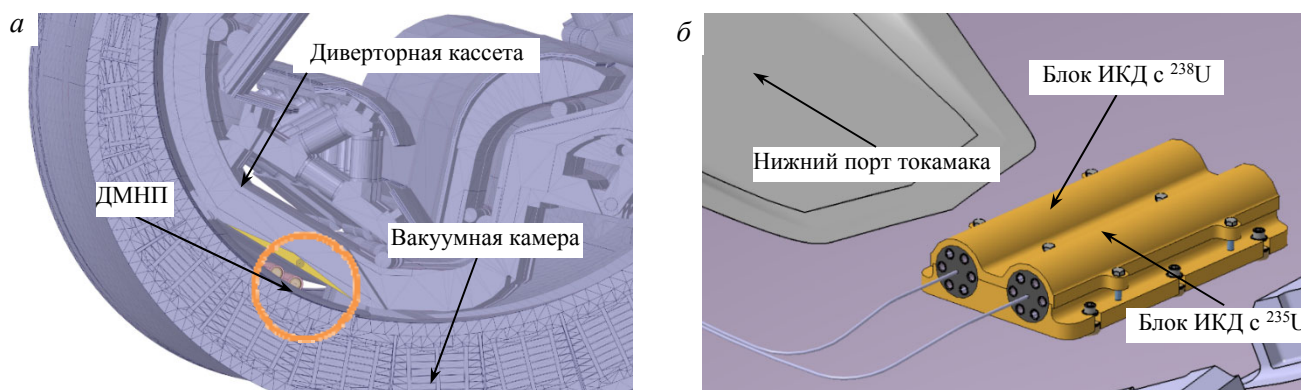


Рис. 1. Расположение диагностики ДМНП на вакуумной камере ИТЭР (а), под диверторной кассетой (б)

Т а б л и ц а 2. Характеристики ИКД модуля ДМНП

№ ИКД	Основной нуклид урана	Массовая доля основного нуклида, %	Масса оксида урана, мг
1	^{235}U	95	500
2			50
3			5
4	^{238}U	99,9999	500
5			5
6			50

Проведены два вида моделирования: прямой расчёт и расчёт с помощью функции Грина по методу [6]. В решении прямой задачи используется источник, повторяющий геометрию и полоидальный профиль излучения нейтронов DT-плазмы с термоядерной мощностью 500 МВт [4]. При расчёте функции Грина в качестве источника DT-нейтронов рассмотрен набор кольцевых источников, расположенных в различных позициях (R , Z) внутри вакуумной камеры токамака-реактора. Результаты моделирования скорости реакции деления, полученные при решении прямой задачи, использованы для проверки результатов моделирования функции Грина.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе прямого моделирования, которое выполнено в программе MCNP, рассчитаны плотности потока нейтронов и мгновенных γ -квантов в конструкционных материалах ДМНП. Энергетические групповые распределения плотности потока нейтронов и мгновенных γ -квантов в зоне расположения детекторов показаны на рис. 2 (номера ИКД соответствуют принятым в табл. 2). В табл. 3 представлены плотности потока нейтронов и скорости реакции деления урана в ИКД ДМНП. Плотность потока нейтронов и энергетическое распределение нейтронов в различных ИКД практически одинаковы.

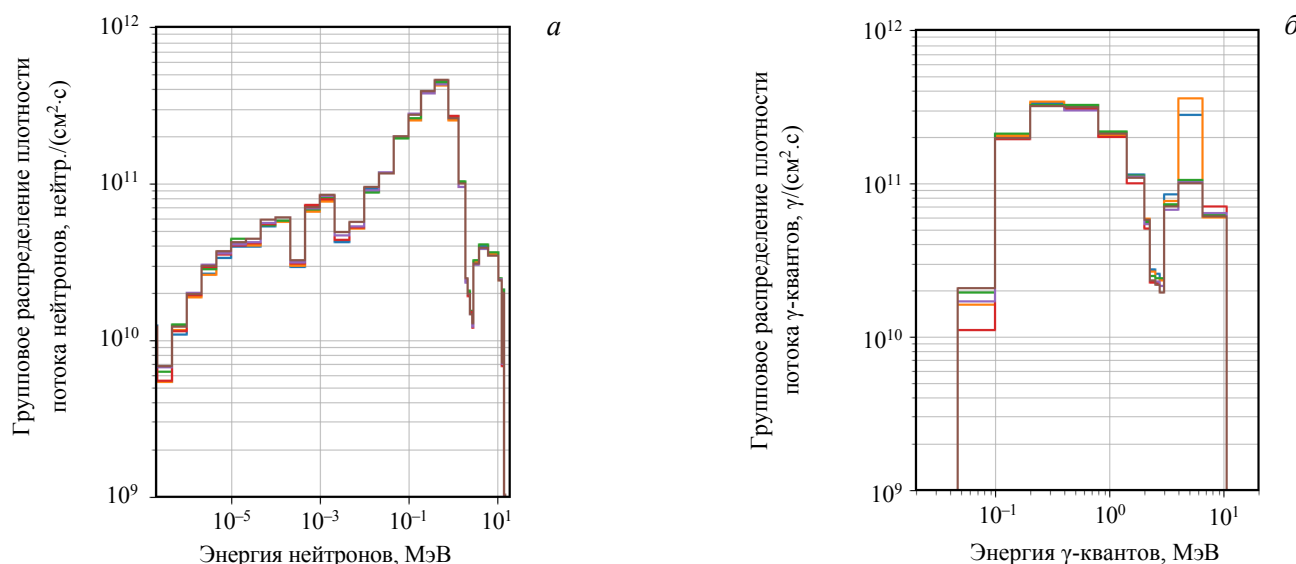


Рис. 2. Групповые распределения плотности потока нейтронов (а) и мгновенных γ -квантов (б) в ИКД ДМНП № 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—), 6 (—) для стандартного источника нейтронов ИТЭР мощностью 500 МВт

Т а б л и ц а 3. Результаты прямого моделирования для ИКД модуля ДМНП

№ ИКД	Основное делящееся вещество ИКД	Плотность потока нейтронов, 10^{12} нейтр./см ² ·с)	Скорость реакции деления, 10^8 дел./с
1	^{235}U	2,42	206,0
2		2,41	19,00
3		2,50	1,88
4	^{238}U	2,52	2,51
5		2,50	0,0251
6		2,55	0,254

Значения скорости реакции деления при одинаковых массах ^{235}U и ^{238}U в ИКД различаются на два порядка из-за различий в величинах сечений реакции деления нейтронами. ^{235}U эффективно делится тепловыми ($E_n < 1$ эВ) нейтронами, ^{238}U — быстрыми ($E_n > 1$ МэВ). При этом среднее по энергии сечение реакции деления ^{235}U тепловыми нейтронами составляет ~ 580 барн, сечение реакции деления ^{238}U быстрыми нейтронами ~ 2 барна. Статистическая погрешность результатов моделирования не превышает $\sim 5\%$.

Рассчитанная величина скорости реакции деления позволяет оценить абсолютную чувствительность ИКД ДМНП к источнику нейтронов. Величина абсолютной чувствительности детекторов использована для оценки динамического диапазона измерений полного выхода нейтронов ИТЭР диагностической системой ДМНП.

ФУНКЦИЯ ГРИНА СКОРОСТИ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА ИКД ДМНП

Для каждого детектора диагностики ДМНП рассчитана функция Грина [8], определённая как скорость реакций деления урана детектора от тороидальных колец с заданным положением (R, Z) в полоидальном сечении токамака, изотропно испускающих 1 ДТ-нейтр./с. Данная функция позволяет рассчитать скорости реакции деления от произвольного пространственно распределённого источника нейтронов, параметры которого изменяются во время импульса токамака-реактора. Знание функции Грина детекторов позволяет исследовать чувствительность диагностики к изменениям положения плазмы, геометрических размеров и распределения удельной интенсивности нейтронов в полоидальном сечении плазменного шнура — профиля источника нейтронов. Подробное описание алгоритма расчёта данной функции и примеры её использования приведены в работах [5—7]. Основным преимуществом метода является качественное уменьшение времени расчёта. Время расчёта скорости реакции деления урана ИКД ДМНП для данного равновесного состояния ДТ-плазмы ИТЭР с помощью программы, написанной на языке FORTRAN, составляет $\sim 0,1$ мс.

На рис. 3 представлен результат моделирования функции Грина скорости реакции деления урана ИКД № 3 (5 мг UO_2 с ^{235}U) и № 6 (50 мг UO_2 с ^{238}U) ДМНП. Функция Грина не зависит от пространственного распределения источника нейтронов в полоидальном сечении плазмы. Тороидальные кольца лишь покрывают геометрическую область, в которой возможно существование плазмы ИТЭР. Значение функции Грина вне данной области принимается равным нулю.

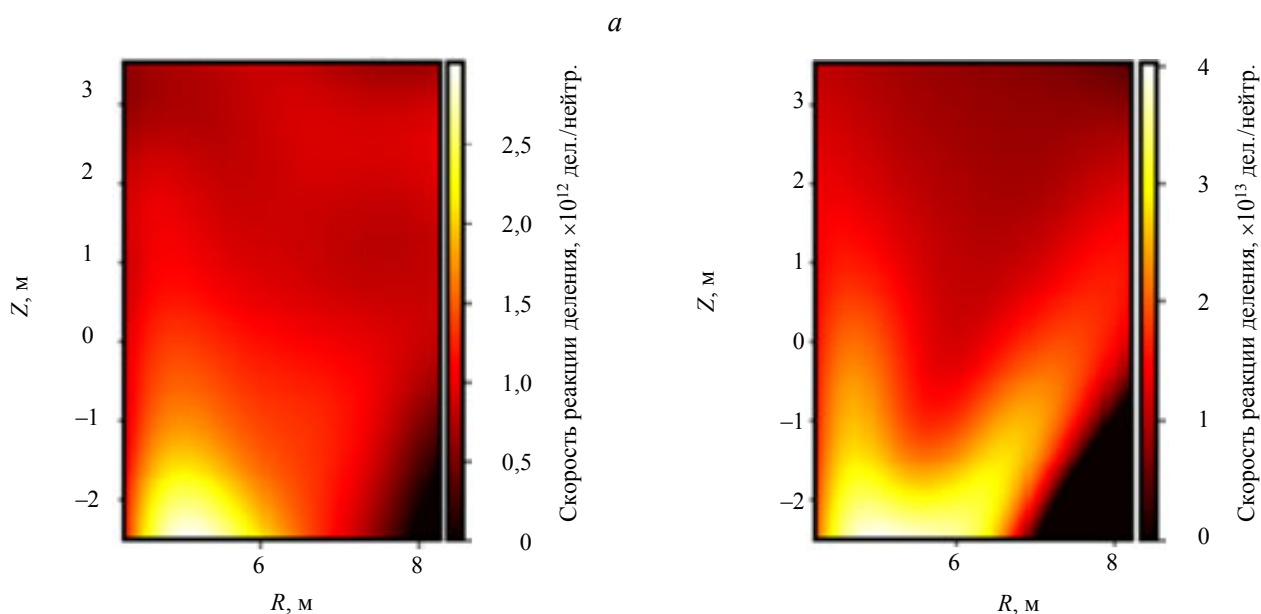


Рис. 3. Функция Грина скорости реакции деления урана ИКД ДМНП: *a* — ^{235}U ; *б* — ^{238}U

Произведение функции Грина скорости реакции деления и профиля источника нейтронов (нейтр./ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$) позволяет проанализировать вклад нейтронов источника из каждой области в скорость реакции деления урана ИКД ДМНП. Произведение функции Грина и профиля источника нейтронов в момент достижения термоядерной мощности 500 МВт ДТ-плазмы ИТЭР [4] представлено на рис. 4. Аналогичные данные для предварительной версии конструкции диагностики ДМНП приведены в работе [5].

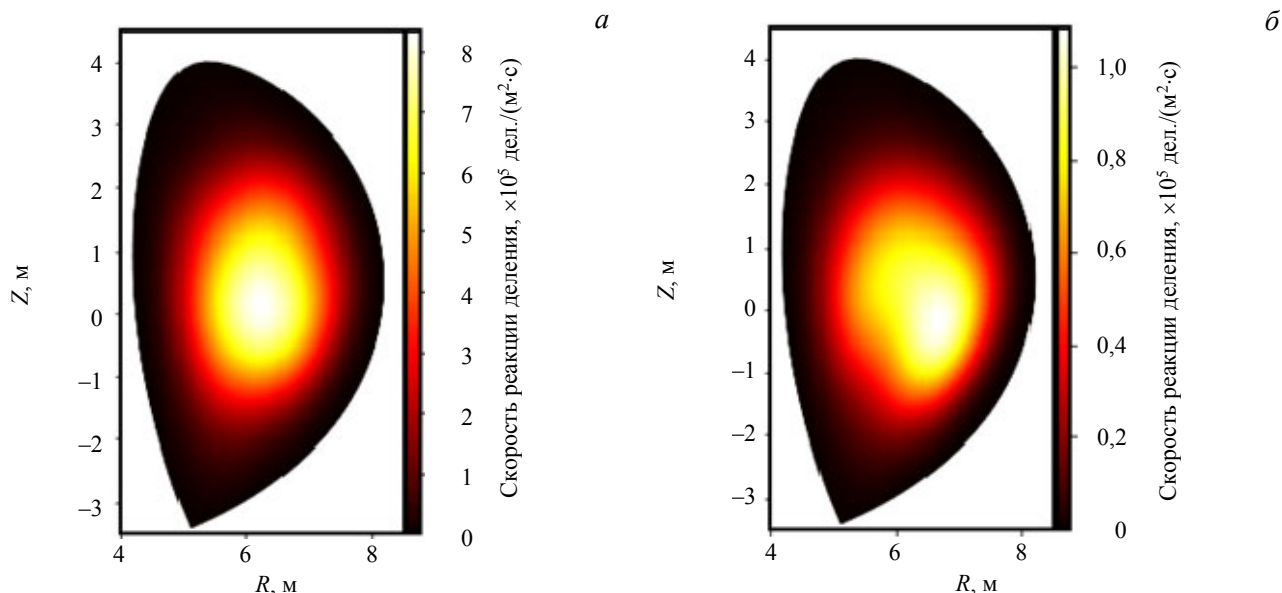


Рис. 4. Произведение профиля 500 МВт ДТ-плазмы ИТЭР и функций Грина скорости реакции деления (см. рис. 3) ИКД ДМНП № 3 с ^{235}U (а), № 6 с ^{238}U (б)

Диагностика ДМНП в предварительной версии конструкции располагалась непосредственно на диверторной каскаде токамака. При этом для ИКД с ^{238}U существовала явно выраженная чувствительность к прямым нейтронам плазмы, попадающим в детекторы через щели дивертора [11]. В финальной версии конструкции диагностики между источником и детекторами в новом положении присутствует дополнительный рассеивающий материал — диверторная каскада токамака, заполненная охлаждающей водой.

Профиль источника нейтронов рассчитан с разрешением $\Delta r/a = 1/109$, где Δr — расстояние между соседними магнитными поверхностями в полоидальном сечении плазмы; a — малый радиус плазменного шнура. В расчёте источника нейтронов предполагается, что концентрация ионов и температура равномерно распределены по магнитной поверхности, в результате чего принято, что удельная скорость ДТ-реакции равномерна для данной магнитной поверхности. Данное предположение означает, что для оценки чувствительности ДМНП можно пренебречь остальными факторами, влияющими на образование нейтронов, такими как быстрые банановые и пучковые ионы [4]. В данном предположении параметры источника нейтронов постоянны внутри объёма, ограниченного двумя соседними (от r/a до $(r + \Delta r)/a$) магнитными поверхностями, — дифференциального объёма ΔV . Проинтегрировав произведение функции Грина $G(R, Z)$ (дел./нейтр.) и профиля источника нейтронов $I(R, Z)$ (нейтр./ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$) по дифференциальному объёму ΔV , мы получаем вклад в полную скорость реакции деления урана ИКД ДМНП от данной области источника.

Распределение источника нейтронов как функция координаты магнитной поверхности $r/a \in [0; 1]$, $Y_n(r/a)$ (нейтр./с) описывается уравнением

$$Y_n(r/a) = 2\pi \iint_{\Delta V} I(R, Z) R dR dZ = I(r/a) \Delta V. \quad (1)$$

А вклад в скорость реакции деления — пространственный отклик $R_f(r/a)$ (дел./с) — уравнением

$$R_f(r/a) = 2\pi \iint_{\Delta V} I(R, Z) G(R, Z) R dR dZ = I(r/a) G(r/a) \Delta V. \quad (2)$$

Для предварительной и финальной версий конструкции диагностики пространственные отклики ИКД ДМНП показаны на рис. 5. Для наглядности распределение выхода источника нейтронов $Y_n(r/a)$ нормировано на интеграл распределения по объёму плазмы, а пространственный отклик $R_f(r/a)$ нормирован на интеграл скорости реакции деления ИКД.

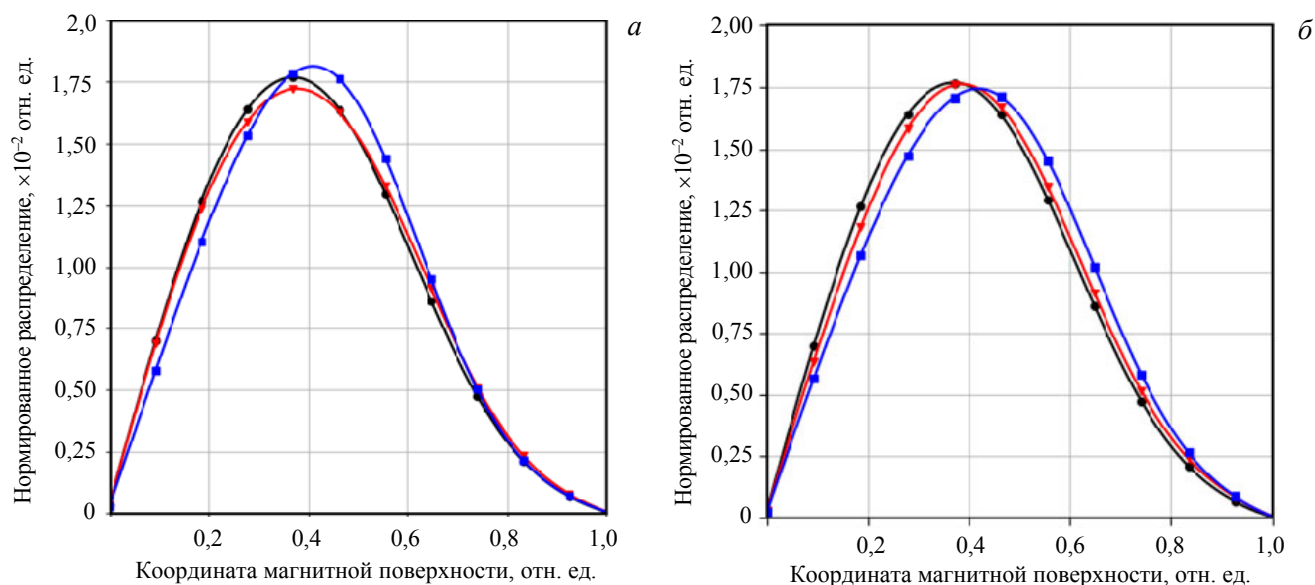


Рис. 5. Пространственный отклик ИКД ДМНП ^{235}U (—▼—), ^{238}U (—■—) для предварительной (а) и финальной (б) версии конструкции и распределение выхода нейтронов 500 МВт DT-плазмы ИТЭР (—●—)

С точки зрения минимизации чувствительности измерений диагностики к изменению распределения нейтронов в полоидальном сечении плазмы важно, чтобы распределение $R_f(r/a)$ повторяло по форме пространственное распределение выхода источника нейтронов $Y_n(r/a)$. Анализируя данные, представленные на рис. 5, можно заключить, что изменение положения диагностики ДМНП не привело к существенным изменениям пространственного отклика. Однако пространственный отклик ИКД с ^{238}U стал менее пикированным, что обусловлено более мягким спектром нейтронов, приходящих на чувствительные элементы детекторов.

В табл. 4 представлены результаты сравнения скоростей реакции деления урана ИКД ДМНП (см. табл. 2), полученные при прямом моделировании (см. табл. 3) и рассчитанные с помощью функций Грина [5]. Относительное отклонение величин лежит в пределах статистической погрешности результатов прямого моделирования, что свидетельствует о достаточности величины шага интерполяционной сетки (25 см) и достоверности результатов моделирования функции Грина скорости реакции деления.

Т а б л и ц а 4. Проверка достоверности расчёта функции Грина скорости реакции деления

№ ИКД	Основное делящееся вещество ИКД	Скорость реакции деления по методу функции Грина, 10^8 дел./с	Относительное отклонение от результатов решения прямой задачи, %
1	^{235}U	196,0	4,9
2		18,80	1,1
3		1,88	0
4	^{238}U	2,59	–3,2
5		0,0259	–3,2
6		0,262	–3,1

ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛНОГО ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ

Абсолютная чувствительность детектора к данному типу частиц — отношение зарегистрированной скорости счёта к полному выходу частиц источника [12]. Абсолютная чувствительность детекторов диагностики ДМНП оценена как отношение скорости реакции деления урана ИКД ДМНП к выходу нейтронов источника.

Зная абсолютную чувствительность ИКД s (имп./нейтр.), можно оценить скорость счёта C (имп./с) детекторов диагностики при данном уровне выхода нейтронов плазмы Y_n (нейтр./с) по формуле

$$C = sY_n. \quad (3)$$

Алгоритм моделирования зарегистрированной скорости счёта представлен в работах [5, 7] и основан на описании работы измерительных трактов [12]. Зная временное разрешение диагностики и требования к погрешности измерений (см. табл. 1), можно определить нижнюю границу диапазона измерения для всех сигналов, поступающих из измерительных трактов. Верхняя граница измерения определена, исходя из технического предела реализуемых измерительных трактов системы сбора данных (10^6 имп./с, 10^8 имп./с и 10^9 имп./с для счётного, флуктуационного и токового трактов соответственно).

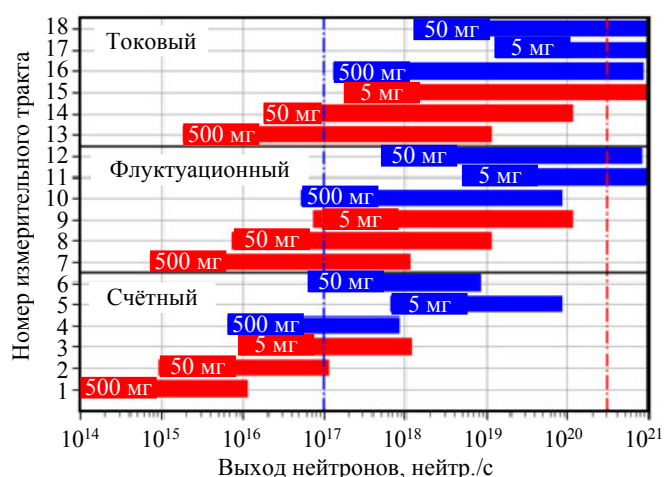


Рис. 6. Диапазоны измерения полного выхода нейтронов различными детекторами ДМНП: — ^{235}U ; — ^{238}U

На рис. 6 показаны диапазоны измерения выхода нейтронов для измерительных трактов диагностики ДМНП. Массы урана в ИКД подобраны таким образом, чтобы покрыть требуемый динамический диапазон работы диагностики от 10^{14} до $3,2 \cdot 10^{20}$ нейтр./с. Важно отметить, что перекрытие диапазонов работы различных детекторов происходит в пределах одного порядка изменения выхода нейтронов. Столь широкий диапазон перекрытия обеспечивает надёжную «кросс-калибровку» измерительных трактов. Калибровка счётного измерительного тракта ИКД № 1 будет осуществляться с помощью нейтронного генератора типа НГ-24 [13], перемещаемого внутри вакуумной камеры токамака-реактора. При известных диапазонах перекрытия остальные измерительные

тракты будут «кросс-калиброваны» во время плазменных разрядов с известными параметрами.

На основании представленных данных (см. рис. 6) можно заключить, что выбранные массы урана в ИКД ДМНП вместе с реализуемыми в системе сбора данных измерительными трактами удовлетворяют предъявляемым к диагностике требованиям (см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием MCNP-модели токамака-реактора ИТЭР проведён нейтронно-физический анализ работы детекторных модулей диагностики ДМНП. Представлены результаты прямого моделирования скорости реакции деления ИКД ДМНП от источника DT-нейтронов 500 МВт плазмы ИТЭР. Рассчитана и составлена функция Грина скорости реакции деления урана ИКД ДМНП.

Результаты прямого моделирования скорости реакции деления были использованы для проверки достоверности моделирования функции Грина. Скорости реакции деления урана ИКД ДМНП, рассчитанные прямым методом и методом интегрирования с функцией Грина, совпадают в пределах статистической погрешности прямого метода $\sim 5\%$. Это свидетельствует о достаточности величины шага интерполяционной сетки и достоверности результатов моделирования функции Грина скорости реакции деления. Пространственный отклик ИКД ДМНП повторяет по форме пространственное распределение выхода нейтронов DT-плазмы ИТЭР. Из чего следует, что результаты измерений данной системы несущественно зависят от распределения источника нейтронов в полоидальном сечении плазмы.

В соответствии с результатами нейтронно-физического анализа и характеристиками измерительных трактов системы сбора данных ДМНП оценен динамический диапазон измерения выхода нейтронов и термоядерной мощности плазмы ИТЭР.

Показано, что конструкция диагностики ДМНП соответствует предъявляемым к системе требованиям по величине динамического диапазона, временному разрешению и статистической погрешности измерений полного выхода нейтронов и термоядерной мощности.

В продолжение данной работы авторы планируют провести детальное изучение источников и величины погрешности восстановления полного выхода нейтронов и термоядерной мощности нестационарной плазмы ИТЭР, рассмотреть возможные методы компенсации систематической погрешности измерений.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.20.1042 от 21 апреля 2020 г. «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2020 году».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kaschuck Yu.A. et al.** Divertor neutron flux monitor: conceptual design and calibration. — AIP Conf. Proc., 2008, vol. 988, p. 303.
2. **Krasilnikov A.V. et al.** Status of ITER neutron diagnostic development. — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45 p. 1503; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/45/12/005>.
3. **Kumpilov D.A. et al.** Activation of ITER divertor neutron flux monitor. — JINST, 2019, vol. 14, p. C11019.
4. **Polevoi A.R. et al.** Assessment of neutron emission from DD to DT operation of ITER. — In: P4.126, 42th EPS Conference on Plasma Physics. Lisbon, Portugal, 22—26 June 2015; <http://ocs.ciemat.es/EPS2015PAP/pdf/P4.126.pdf>.
5. **Kovalev A.O. et al.** Simulations of fusion power measurements by monitors of neutron flux in evolving ITER plasma. — J. Fusion Energ., 2020, vol. 39, p. 40—52; <https://doi.org/10.1007/s10894-020-00232-x>.
6. **Polevoi A.R. et al.** Fast simulation of local radiation fields for synthetic diagnostics. — In: 45th EPS Conference on Plasma Physics. Prague, Czech Republic, 2—6 July 2018; <http://ocs.ciemat.es/EPS2018PAP/pdf/P4.1009.pdf>.
7. **Ковалёв А.О. и др.** Оценка влияния динамики параметров плазмы ИТЭР на показания радиометра нейтронного потока. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 3, с. 64.
8. **Крючков Э.Ф., Юрова Л.Н.** Теория переноса нейтронов. Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2007. 272 с.
9. **Goorley J. et al.** Initial MCNP6 Release Overview MCNP6 version 1.0. Los Alamos National Lab., United States, 2013.
10. **Leichtle D.** — Fusion Engineering and Design, 2018; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.002>.
11. **Борисов А.А., Дерябина Н.А., Марковский Д.В.** Калибровка нейтронных мониторов мгновенной мощности ИТЭР. Постановка задачи и расчёты модели реактора с точечными источниками нейтронов 14 МэВ. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 3, с. 31—48.
12. **Knoll G.F.**, Radiation Detection and Measurement. 3rd Edition. — New York: Wiley, 2000, ISBN 0-471-07338-5.
13. **Сыромуков С.В. и др.** Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1.



Андрей Олегович Ковалев,
н.с.; Частное учреждение
«ИТЭР-Центр», 123182
Москва, пл. Академика
Курчатова 1, стр. 3, Россия
A.Kovalev@iterrf.ru



Роман Николаевич Родионов,
н.с.; Частное учреждение
«ИТЭР-Центр», 123182 Мо-
сква, пл. Академика Курча-
това 1, стр. 3, Россия
[R.Rodionov@iterrf.ru](mailto>R.Rodionov@iterrf.ru)



Дмитрий Владиславович
Портнов, начальник сек-
тора; Частное учреждение
«ИТЭР-Центр», 123182
Москва, пл. Академика
Курчатова 1, стр. 3, Россия
D.Portnov@iterrf.ru



Вячеслав Анатольевич Воро-
бьев, с.н.с.; Частное учре-
ждение «ИТЭР-Центр»,
123182 Москва, пл. Академи-
ка Курчатова 1, стр. 3, Россия
[V.Vorobiov@iterrf.ru](mailto>V.Vorobiov@iterrf.ru)



Юлия Геннадьевна Высоких, специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
J.Vysokih@iterrf.ru



Сергей Юрьевич Обудовский, н.с.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
S.Obudovsky@iterrf.ru



Юрий Анатольевич Кашук, к.ф.-м.н., начальник отдела; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия
Y.Kashchuk@iterrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2020 г.

После доработки 27 декабря 2020 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 18—26.