

УДК 621.039.665

**РАДИАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ НА УЗЕЛ ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА  
ДИАГНОСТИКИ СВЛ В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОРТУ ИТЭР № 12***Р.С. Афанасенко<sup>1,2,3</sup>, А.Г. Алексеев<sup>1,2</sup>, Б.В. Кутеев<sup>1,3</sup>, А.А. Морозов<sup>1,2</sup>, Д.К. Вуколов<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия<sup>2</sup>Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты», Москва, Россия<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

С использованием новейшей нейтронной модели ИТЭР C-Model и разработанной с помощью кода SuperMC высокодетализированной конструкторской модели выполнены расчёты трёхмерных профилей нейтронного и гамма-потоков, а также радиационных повреждений в элементах диагностики ИТЭР «Спектроскопия водородных линий и примесей», расположенных в экваториальном порту ИТЭР № 12. Показано, что при использовании для описания нейтронной обстановки программ MCNP и FISPACT-II различия в оценке радиационных повреждений не превышают 10%. Наибольшие радиационные нагрузки приходятся на переднюю стенку корпуса узлов входных зеркал. За расчётное время работы ИТЭР на номинальной мощности (FPY = 0,54 лет) среднее радиационное повреждение составляет ~0,22 сна.

**Ключевые слова:** ИТЭР, оптическая диагностика, узел входного зеркала, радиационные нагрузки.

**RADIATION LOADS ON THE FIRST MIRROR UNIT OF H-ALPHA DIAGNOSTIC  
IN THE ITER EQUATORIAL PORT № 12***R.S. Afanasenko<sup>1,2,3</sup>, A.G. Alekseev<sup>1,2</sup>, B.V. Kuteev<sup>1,3</sup>, A.A. Morozov<sup>1,2</sup>, D.K. Vukolov<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia<sup>2</sup>International Fusion Projects Coordinating Centre, Moscow, Russia<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

3D profiles of radiation loads were derived for the first mirror unit (FMU) of H-alpha and visible spectroscopy diagnostic located in ITER equatorial port № 12, including neutron/gamma fluxes, and radiation damage levels in the FMU components, using the latest ITER neutronic C-Model and highly detailed FMU models. Good conformity between the results obtained by MCNP and FISPACT-II codes had been demonstrated with the discrepancy within 10%. The highest radiation loads and ~0.22 dpa radiation damage are derived for the front wall of the FMU (at 0.54 FPY — by the end of the ITER operation).

**Key words:** ITER, optical diagnostic, first mirror unit, radiation loads.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-39-45

**ВВЕДЕНИЕ**

Спектроскопия является неотъемлемой частью для измерения важнейших параметров плазмы (плотность атомов водорода и примесей в SOL, ионная температура, топливное отношение, индикатор перехода, L—H-мода и т.д.). Имея опыт разработки спектроскопической диагностики на отечественных токамаках Т-10, Т-11, Глобус-М, российские учёные принимают участие в проектировании аналогичного оборудования для ИТЭР. В частности, диагностика «Спектроскопия водородных линий и примесей» (СВЛ) представлена двумя каналами в экваториальном порту (ЭП) № 11 для наблюдения верхней и нижней частей внутренней стенки камеры (полоидальный обзор) и одним каналом в ЭП № 12, дающим тангенциальный обзор внутренней и внешней стенок ИТЭР.

Основным входным функциональным компонентом оптических диагностик ИТЭР являются узлы входных зеркал (УВЗ), расположенные в вакуумных портах в непосредственной близости от плазмы, что приводит к значительным радиационным нагрузкам, в том числе и к повреждениям зеркал УВЗ. В диагностике СВЛ использование небольшого входного зрачка в конструкции УВЗ обеспечивает эффективную защиту первого зеркала от прямого воздействия потоков частиц с малой глубиной поглощения (УФ, мягкий рентген, нейтральные атомы) [1]. Наряду с оптическим каналом диагностики СВЛ в диагностическом защитном модуле (ДЗМ) № 1 ЭП ИТЭР № 12 расположены также три оптических канала системы широкоугольного обзора (Wide Angle View System (WAVS)) [2].

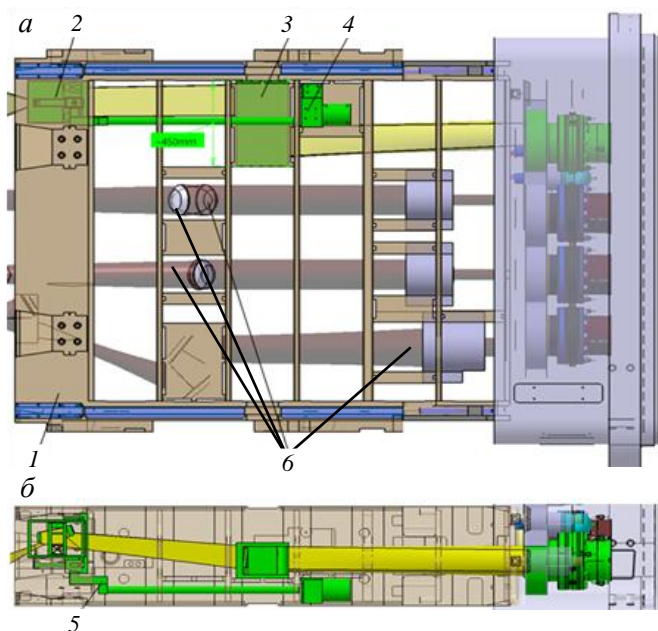


Рис. 1. Модель CAD основных компонентов диагностик СВЛ и WAVS в ДЗМ № 1 ЭП № 12 (а — вертикальное сечение; б — горизонтальное сечение): 1 — ДЗМ; 2 — УВЗ; 3 — узел промежуточного зеркала (УПЗ); 4 — блок привода защитной шторки; 5 — рычаг привода защитной шторки; б — оптические компоненты диагностики WAVS

Вертикальное и горизонтальное сечение модели CAD, описывающей компоновку корпусных компонентов диагностик СВЛ и WAVS, размещённых в модульном ДЗМ ЭП, показано на рис. 1. На рисунке изображены только внутривакуумные компоненты этих двух диагностических систем и их вырезы для транспортировки пучка света. Свободное пространство в ДЗМ № 1 заполнено защитным материалом из стали и карбида бора (на рисунке не показан).

Работа посвящена расчётам радиационных нагрузок, которым будут подвержены зеркала М1 и М2 и корпусные элементы УВЗ, необходимым для проведения прочностного анализа конструктивных элементов. На рис. 2 представлены 3D-модель CAD и вертикальное сечение  $PY$  нейтронной модели УВЗ диагностики СВЛ.

С использованием кода переноса излучения MCNP5v-1.6 [3] получены локальные пространственные профили и спектры нейтронных и гамма-потоков, а также оценены радиационные повреждения в конструктивных элементах УВЗ диагностики СВЛ в ЭП № 12. Проведена верификация полученных уровней радиационных повреждений с помощью программного кода FISPACT-II [4].

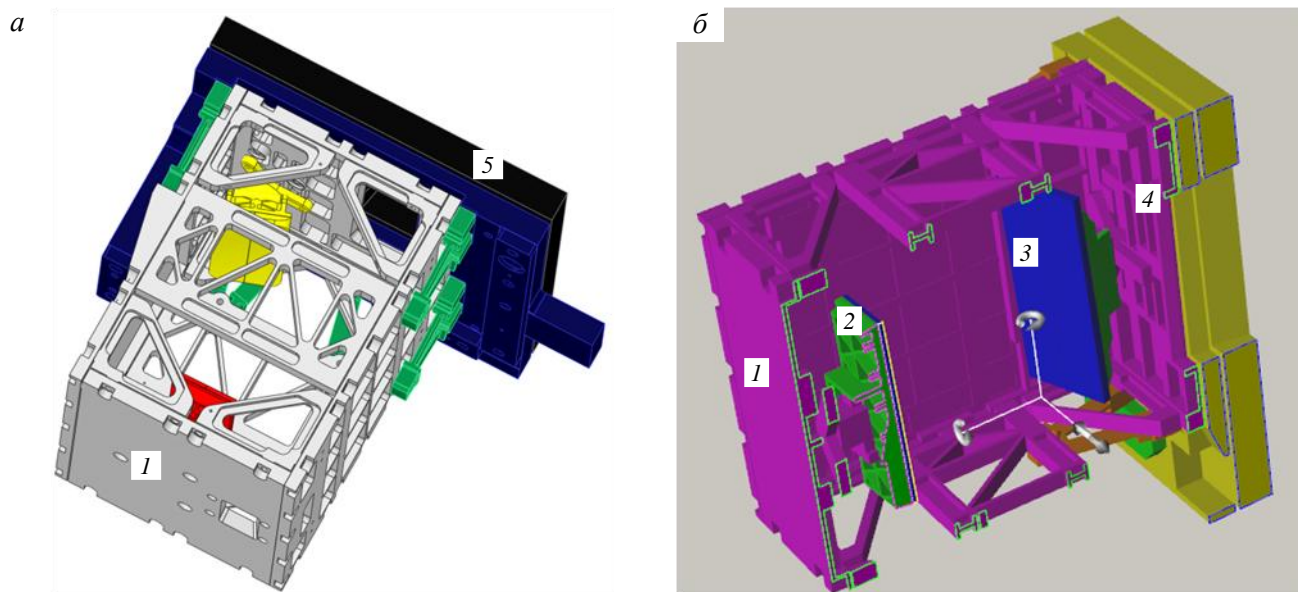


Рис. 2. Модель CAD УВЗ (а) и вертикальное сечение  $PY = -46$  см (б) её нейтронной модели: 1 — передняя стенка корпуса УВЗ; 2 — зеркало М2; 3 — зеркало М1; 4 — задняя стенка корпуса УВЗ; 5 — стальная пластина

## НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ

Для анализа нейтронных полей с помощью MCNP используется 40-градусный тороидальный сектор трёхмерной модели ИТЭР «С-Model R181031 REV. 190110 issued 10.01.2019» [5] (далее С-Model). Заданный в С-Model экваториальный порт был модифицирован с учётом параметров реальной конструкции компонентов диагностики СВЛ. Программа Super MC [6] — программный код конвертации CAD-файлов использовалась для создания модели MCNP внутривакуумных компонентов СВЛ. Расчёты нейтронных и гамма-нагрузок проводились с помощью метода Монте-Карло с использова-

нием ядерных констант FENDL 3.1d [7] (библиотека нейтронных сечений от  $10^{-11}$  до 55 МэВ, библиотека для  $\gamma$ -квантов от 1 кэВ до 50 МэВ). Процесс переноса частиц моделируется отражающими граничными условиями для области, обратной модельному сектору, и периодическими граничными условиями на боковых плоскостях, ограничивающих тороидальный сектор модели. Для моделирования сложных и мелких частей конструкции была выбрана кубическая сетка с шагом решётки 5 мм, что, в свою очередь, вызывает большие нагрузки на вычислительные ресурсы. Для набора статистики расчёта была использована программная утилита ADVANTG [8], которая позволяет генерировать файл весовых окон, что существенно ускоряет процесс моделирования. Результаты расчёта нормированы на термоядерную мощность 500 МВт при стандартном дейтерий-тритиевом (DT) источнике ИТЭР с интенсивностью  $1,9718 \cdot 10^{19}$  нейтронов в секунду [9].

На рис. 3 показано вертикальное сечение упрощённой модели ДЗМ № 1, использованной для анализа радиационных нагрузок. Весь ЭП, за исключением пространства размещения диагностики СВЛ, заполнен смесью стали SS316L(N)-IG, карбида бора и воды. Объёмные доли материалов в гомогенной защитной смеси определены в проекте ЭП и составляют 31% сталь с примесями Co 0,03 мас. %, Nb 0,01 мас. %, Ta 0,01 мас. %, 41% карбид бора, 1% — вода и 27% — пустоты. Детализированная модель оптических компонентов диагностики (УВЗ, УПЗ, привод защитной шторки и вакуумное окно) дополнена точными вырезами в защитном материале, предназначенными для транспортировки светового луча от диагностической первой стенки (ДПС) до герметизирующей плиты. Никакие другие диагностики или соответствующие системы в защитном модуле не приняты во внимание.

В дальнейшем в расчётную модель необходимо будет добавить вырезы для компонентов соседней диагностики WAVS, расположенной в том же ДЗМ № 1 и в ДПС № 1, откуда высокоэнергичные нейтроны и  $\gamma$ -кванты будут рассеиваться в сторону канала диагностики СВЛ. Также, возможно, потребуется учёт вырезов в соседних защитных модулях ДЗМ № 2, 3.

Для оценки радиационных нагрузок на конструкционные материалы были рассчитаны профили удельных повреждений в единицах сна (смещение на атом), которые показывают, сколько раз атом будет смещаться в кристаллической решётке материала за всё время работы ИТЭР ( $1,7 \cdot 10^7$  с = 0,54 года при полной мощности синтеза (FPY)).

Метод, используемый для расчёта сна нагрузок, основан на модели NRT (Norgett — Robinson — Torrens) [10], которая является стандартной моделью для расчёта повреждений в материалах, вызванных столкновениями с ионами или нейтронами. В макроскопической модели радиационных повреждений число смещений на атом зависит от поглощённой энергии и от энергии, необходимой для смещения атома из его положения в кристаллической решётке:

$$\text{сна} = 0,8 \frac{E_a}{2E_d}, \tag{1}$$

где  $E_a$  — полная поглощённая энергия, передаваемая атомам решётки, вычисленная с помощью библиотеки микросечений FENDL;  $E_d$  — энергия, необходимая для смещения атома из его положения в кристаллической решётке. В расчётах принимались значения  $E_d = 90, 60$  и  $40$  эВ [11] для вольфрама, молибдена и стали соответственно.

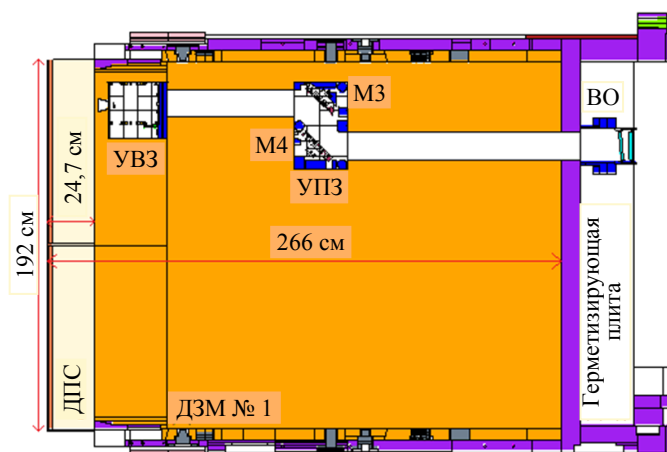


Рис. 3. Вертикальное сечение XZ ЭП № 12 в зоне ДЗМ № 1 с диагностикой СВЛ; М3, М4 — алюминиевые зеркала; ВО — вакуумное окно

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 показаны полные нейтронные и гамма-поток в зоне УВЗ диагностики СВЛ в ЭП № 12. На рисунках представлены изометрические сечения, где обозначены контуры элементов конструкции СВЛ (корпус УВЗ из сплава TZM [12], стальная пластина и молибденовые зеркала М1, М2). Детальный расчёт профилей проводился для ограниченной области модели. Кубическая сетка с шагом 0,5 см использовалась от края ДПС со стороны плазмы ( $X = 844$  см в системе координат порта) до стальной пластины крепления УВЗ ( $X = 904$  см).

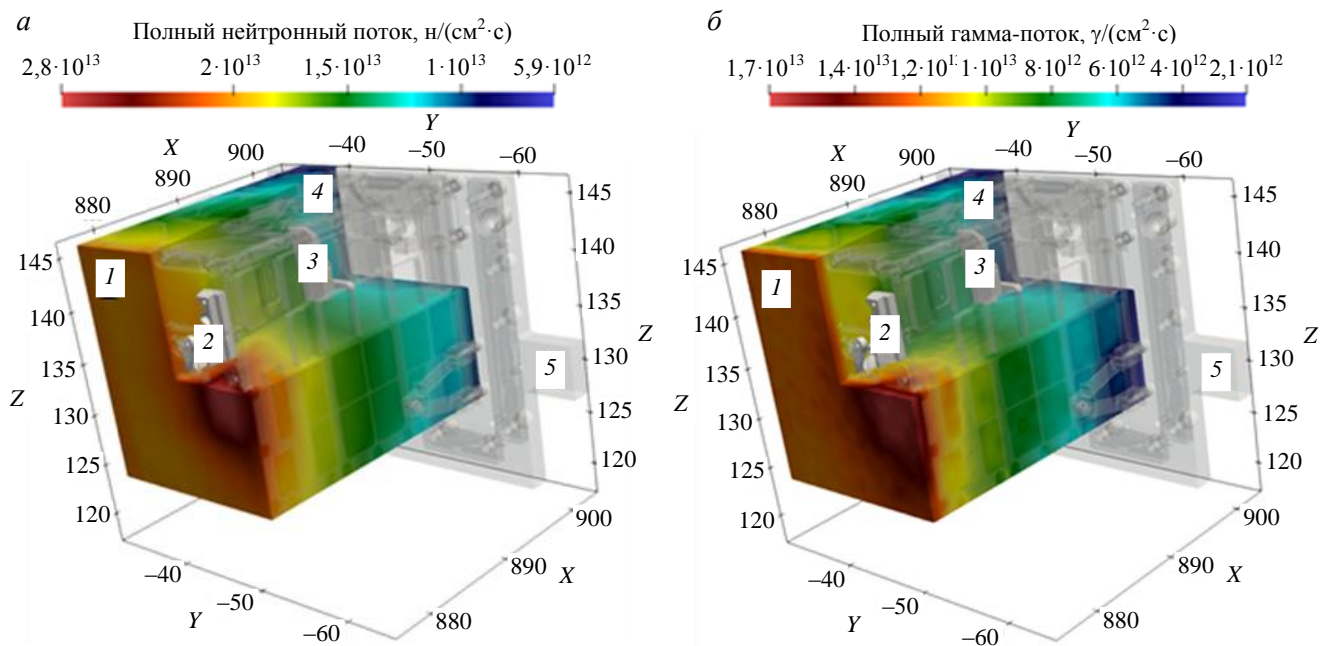


Рис. 4. Профиль полного нейтронного (а) и гамма-поток (б) в сечении  $PY = -41$  см: 1 — передняя стенка корпуса УВЗ; 2 — зеркало М2; 3 — зеркало М1; 4 — задняя стенка корпуса УВЗ; 5 — стальная пластина

Передняя стенка защитного корпуса УВЗ на рис. 4 является наиболее нагруженным элементом диагностики вследствие её близкого расположения к плазме и прямого попадания высокоэнергетических ДТ-нейтронов через вырез в ДПС для входного светового пучка. Средние значения потоков нейтронов и гамма-квантов в элементах конструкции СВЛ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Полный нейтронный и гамма-поток в основных элементах УВЗ диагностики СВЛ в ЭП № 12

Элемент конструкции УВЗ	Материал	Нейтронный поток, $n/(cm^2 \cdot c)$	$\gamma$ -поток, $\gamma/(cm^2 \cdot c)$
Зеркало М1	Mo	$2,3 \cdot 10^{13}$	$8,5 \cdot 10^{12}$
Зеркало М2	Mo	$2,8 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
Передняя стенка корпуса УВЗ	TZM	$3,5 \cdot 10^{13}$	$1,5 \cdot 10^{13}$
Задняя стенка корпуса УВЗ	TZM	$1,7 \cdot 10^{13}$	$5,8 \cdot 10^{12}$
Левая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	TZM	$2,4 \cdot 10^{13}$	$9,8 \cdot 10^{12}$
Правая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	TZM	$2,2 \cdot 10^{13}$	$8,3 \cdot 10^{12}$
Стальная плита крепления УВЗ	SS316	$1,5 \cdot 10^{13}$	$4,9 \cdot 10^{12}$

Полученные результаты показывают, что полные потоки нейтронов и  $\gamma$ -квантов в области ДПС отличаются незначительно:  $1,9 \cdot 10^{14} n/(cm^2 \cdot c)$  и  $1,1 \cdot 10^{14} \gamma/(cm^2 \cdot c)$  соответственно. Высокоэнергетичные ДТ-нейтроны хорошо замедляются охлаждающей водой и рассеиваются сталью в ДПС. Этот состав материалов известен своей эффективностью для построения радиационной защиты от радиационных нагрузок и смягчения спектра нейтронов. Благодаря этому в зоне следом за ДПС доминируют нейтроны энергией от 1 до 3 МэВ. На рис. 5 показан спектр нейтронов, распределённый по 175 энергетическим группам (от 19,6 МэВ до 0,1 эВ). Для удобства показаны одни и те же данные в разных масштабах по энергии нейтронов: логарифмическом и линейном. Красные кривые — усреднённый спектр в ДПС, синяя и зелёная кривые — в фронтальной и тыловой части УВЗ.

Из рис. 5 видно, что спектр нейтронов в зоне УВЗ весьма неоднороден и в нём наблюдается снижение полного потока нейтронов в 2—3 раза от передней к задней стенке корпуса УВЗ. Падающий на поверхность ДПС поток нейтронов в области УВЗ снижается на порядок. При этом средняя энергия гамма-квантов в области УВЗ варьируется от 3 МэВ (передняя стенка УВЗ) до 1 МэВ (задняя стенка УВЗ).

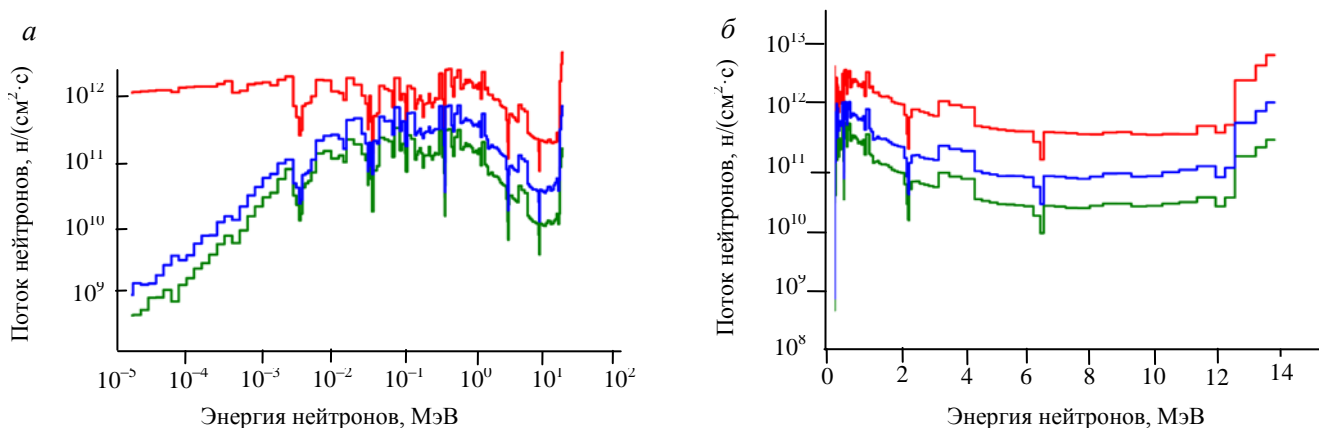


Рис. 5. Спектр нейтронов в зоне УВЗ диагностики СВЛ с логарифмической (а) и линейной шкалой (б) по энергии нейтронов: — ДПС; — задняя стальная плита; — передняя плита корпуса УВЗ

Уровень радиационных повреждений варьируется от 0,09 до 0,3 сна при 0,54 FPY. Среднее значение для передней стенки корпуса УВЗ 0,22 сна. Локально оно увеличивается до 0,3 сна в зоне выреза для оптического пучка. Для сравнения аналогичные расчёты были проведены для различных материалов УВЗ: титан—цирконий—молибден (TZM), вольфрам и нержавеющая сталь (SS316). В табл. 2 приведены средние значения сна в элементах защитного корпуса УВЗ диагностики СВЛ, изготовленных из различных материалов. Также рассчитаны повреждения нейтронами (сна) в молибденовых зеркалах М1 и М2.

Таблица 2. Радиационные повреждения элементов конструкции УВЗ диагностики СВЛ, сна/0,54FPY

Расчётная точка	Элемент конструкции УВЗ	Радиационные повреждения, сна /0,54 FPY		
		TZM	Вольфрам	SS316
1	Стальная плита крепления УВЗ	0,07	0,02	0,09
2	Передняя стенка корпуса УВЗ	0,22	0,07	0,3
3	Задняя стенка корпуса УВЗ	0,09	0,03	0,13
4	Левая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	0,14	0,04	0,19
5	Правая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	0,12	0,04	0,16
	Зеркала УВЗ:		Молибден	
6	М1		0,15	
7	М2		0,19	

Все полученные результаты были проверены с помощью программного комплекса FISPACT-II. Выходной файл MCNP содержит спектр нейтронов для интересующего элемента конструкции УВЗ (передняя, задняя, левая, правая стенки корпуса, а также оптические зеркала М1, М2) со 175 энергетическими группами, что позволяет использовать его в FISPACT-II. Сравнение полученных радиационных нагрузок сна/0,54 FPY для компонентов СВЛ с помощью кодов MCNP и FISPACT-II представлено на рис. 6.

Расхождение результатов расчётов, проведённых с помощью кодов MCNP и FISPACT-II, составляет менее 10%.

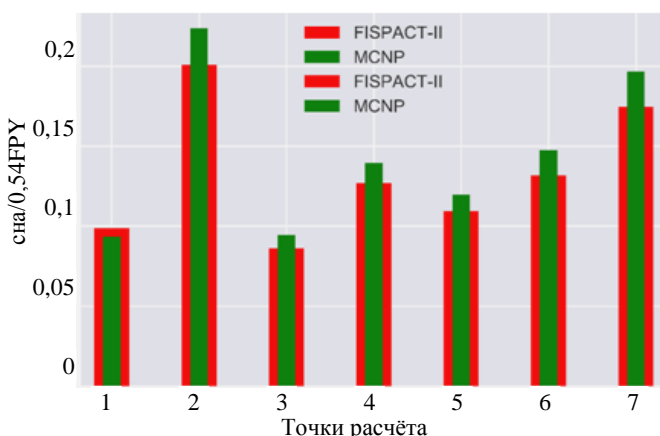


Рис. 6. Сравнение данных кодов MCNP и FISPACT-II по результатам расчёта сна/0,54 FPY нагрузок для компонентов диагностики СВЛ в ЭП № 12 (точки расчёта указаны в табл. 2)

## ВЫВОДЫ

С помощью кодов MCNP и FISPACT-II проведены моделирование переноса нейтронов в модели экваториального порта ИТЭР № 12 и расчёт радиационных нагрузок на компоненты узла входного зеркала диагностической системы СВЛ. Оба метода дают расхождение менее 10% в оценке радиационного повреждения материалов УВЗ. Результаты расчётов свидетельствуют о значительном градиенте потоков в зоне УВЗ с двукратным снижением нагрузок от передней к задней стенке УВЗ. Средний поток нейтронов в зеркале М1 составляет  $2,3 \cdot 10^{13}$  н/(см<sup>2</sup>·с), что близко к значению, полученному для аналогичного положения молибденового зеркала М1, диагностики томсоновского рассеяния в ЭП № 10 [13]. Однако более крупный вырез для конуса обзора диагностики СВЛ позволяет высокоэнергетичному нейтронному потоку проникать глубже в ДЗМ.

Передняя стенка корпуса УВЗ в ЭП № 12 подвержена наибольшему радиационному повреждению — в среднем 0,22 сна/0,54 ФРУ (для молибдена). Локальный максимум достигает ~0,3 сна в небольшой области вокруг выреза для входного зрачка в передней стенке корпуса УВЗ.

Стоит отметить, что при использовании детальной модели внутривакуумной части диагностики СВЛ не наблюдалось проблем с «потерянными частицами» в процессе проведения расчёта. Кроме того, использование детальной модели позволяет получить уточнённую картину нейтронных и гамма-полей в области УВЗ с более высоким разрешением по сравнению с результатами аналогичных работ для ИТЭР [13, 14]. В дальнейшем по мере обновления дизайна конструкции ЭП № 12 в расчётную модель планируется добавить модель всех трёх ДЗМ с сопутствующими диагностиками.

## REFERENCES

1. **Orlovskiy I., Andreenko E., Alekseev A.** Estimation of neutral fluxes on the first mirror of H-alpha diagnostics in ITER. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, Part A, pp. 827—830; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.091>.
2. **Letellier L., Guillon C. et al.** System level design of the ITER equatorial visible/infrared wide angle viewing system. — *Ibid.*, 2017, vol. 123, pp. 650—653; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.06.005>.
3. **X-5 Monte Carlo Team, MCNP.** A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5, vol. I, MCNP Overview and Theory, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
4. **Flemming M. et al.** The FISPACT-II User Manual, UKAEA (18)001. Issue January 2018.
5. **Polunovskiy E.** C-model R181031 (Revision 190110) (ITER\_D\_XEU24H\_v2). Private communication.
6. **Wu Y., Song J., Zheng H. et al.** CAD-based monte carlo program for integrated simulation of nuclear system super MC. — *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 82, pp. 161—168.
7. **Forrest R., Capote R., Otsuka N., Kawano T., Koning A., Kunieda S., Sublet J.-C., Watanabe Y.** FENDL-3 Library Summary Documentation, INDC(NDS)-0628, Dec. 2012.
8. **ADVANTG.** An Automate Variance Reduction Generator ORNL/TM-2013/416.
9. **Colling B., Eade T., Joyce M.J., Pampin R., Seyvet F., Turner A., Udintsev, V.** Neutronics analysis for integration of ITER diagnostics port EP10. — *Fusion Engineering and Design*, 2016, vol. 109—111, pp. 1109—1113; [doi:10.1016/j.fusengdes.2016.01.013](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.01.013).
10. **Nordlund K., Sand A.E., Granberg F., Zinkle S.J., Stoller R., Averback R.S., Suzudo T., Malerba L., Banhart F., Weber W.J., Willaime F., Dudarev S., Simeone D.** Primary Radiation Damage in Materials, OCEC 2015.
11. **Was G.S.** Fundamentals of Radiation Materials Science Metals and Alloys, 2017; [doi: 10.1007/978-1-4939-3438-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3438-6).
12. <https://www.plansee.com/en/materials/molybdenum.html>.
13. **Mota F., Suarez A.** Equatorial Port Plug Core Thomson Scattering Diagnostics Neutronics Evaluations. ITER\_D\_Q8XGBC, version 1.3.
14. **Colling B. et al.** Neutronics analysis for integration of ITER diagnostics port EP10. — *Fusion Eng. Des.*, 2016; <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.01.013>.

## AUTHORS

**Afanasenko R.S.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; [Aphanasenko\\_RS@nrcki.ru](mailto:Aphanasenko_RS@nrcki.ru)

**Alekseev A.G.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Alekseev\_AG@nrcki.ru

**Kuteev B.V.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Kuteev\_BV@nrcki.ru

**Morozov A.A.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Morozov\_AA@nrcki.ru

**Vukolov D.K.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; vukolov\_dk@fc.iterru.ru

Received 29 November 2019

Revised 25 December 2019

Accepted 30 December 2019

Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 1, pp. 39—45