

УДК 621.039.665

ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА УЗЕЛ ВХОДНОГО ЗЕРКАЛА ДИАГНОСТИКИ СВЛ В ЭКВАТОРИАЛЬНОМ ПОРТУ № 12 ИТЭР

Р.С. Афанасенко^{1, 2, 3}, А.Г. Алексеев^{1, 2}, Б.В. Кутеев^{1, 3}, А.А. Морозов^{1, 2}, Д.К. Вуколов^{1, 2}, А.М. Козлов²

¹НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты», Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Для оценки радиационных нагрузок проведено трёхмерное моделирование нейтронно-физических процессов в зоне узла входного зеркала диагностики ИТЭР «Спектроскопия водородных линий и примесей», расположенной в экваториальном порту № 12 ИТЭР. С использованием нейтронной 40° модели токамака C-Model и разработанной с помощью кода SuperMC высокодетализированной конструкторской модели выполнены расчёты трёхмерных профилей нейтронного и гамма-нагревов, а также поглощённой дозы в элементах диагностической системы. Температурный анализ конструкции проводился на основе расчётных данных полного энерговыделения. Наибольший радиационный нагрев приходится на переднюю стенку корпуса УВЗ. За расчётное время работы ИТЭР средний радиационный нагрев составляет ~0,8 Вт/см³. Температурный анализ показал небольшие перепады температур около 50 °С на поверхности всего защитного корпуса УВЗ. Максимальная температура достигает 460 °С на поверхности молибденового зеркала М2.

Ключевые слова: ИТЭР, оптическая диагностика, узел входного зеркала, энерговыделение, поглощённая доза.

NUCLEAR HEAT LOADS TO THE FIRST MIRROR UNIT OF H-ALPHA DIAGNOSTIC IN THE ITER EQUATORIAL #12 PORT

R.S. Afanasenko^{1, 2, 3}, A.G. Alekseev^{1, 2}, B.V. Kuteev^{1, 3}, A.A. Morozov^{1, 2}, D.K. Vukolov^{1, 2}, A.M. Kozlov²

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²International Fusion Projects Coordinating Centre, Moscow, Russia

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

3D modeling of neutron associated processes is performed to assess radiation loads in the area of the first mirror unit (FMU) of H-Alpha and Visible Spectroscopy Diagnostic located in ITER Equatorial port #12, including neutron/gamma and total heating, and absorbed dose rate in the FMU components. A temperature analysis of the structure elements is done being based on the nuclear heating data. Calculations are based on the latest ITER 40° neutronic C-Model and highly detailed FMU model developed using code SuperMC. The highest nuclear heat load 0.8 W/cm³ is derived for the front-end wall of the First Mirror Unit. Thermal analysis shows low temperature gradient around 50 °C in FMU housing area. Maximum temperature obtained does not exceed 460 °C on the front-end wall of the FMU.

Key words: ITER, optical diagnostic, first mirror unit, nuclear heating, absorbed dose.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-24-30

ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия является неотъемлемой частью диагностического комплекса токамаков при измерениях 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.

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

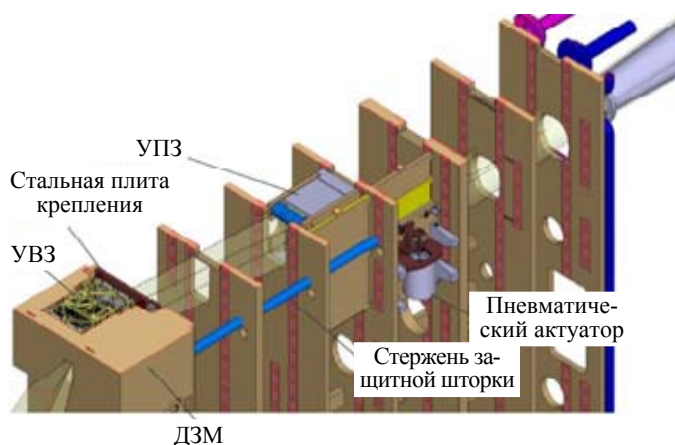


Рис. 1. CAD-модель основных компонентов СВЛ-диагностики в модульном ДЗМ № 1 ЭП № 12

онных элементов. Основываясь на теплофизическом расчёте (расчёт энерговыделения и оценка температурных показателей) в зоне УВЗ, будет приниматься решение о необходимости и целесообразности использования водяного охлаждения для элементов диагностики с критическими температурными показателями.

В связи с ухудшением качества передачи изображения под влиянием радиационного облучения оценка поглощённой дозы в диагностическом оборудовании с элементами, передающими свечение плазмы (зеркала М1 и М2), является одной из приоритетных задач развития диагностики. Поглощённая доза — величина энергии ионизирующего излучения, переданной веществу. Она выражается как отношение энергии излучения, поглощённой в объёме, к массе вещества в этом объёме. В результате захвата электронов или дырок в потенциальных энергетических «ямах», образованных структурными или примесными дефектами, в материале появляются радиационные центры окраски, которые приводят к снижению отражательной способности зеркал с ростом поглощённой дозы. Число образующихся электронно-дырочных пар не всегда пропорционально поглощённой дозе. Их количество зависит от энергии облучаемых заряженных частиц и их типа [3]. Также стоит отметить тот факт, что потери энергии нейтронов на ионизацию вещества (их вклад в поглощённую дозу) значительно меньше, чем у γ -квантов. По предварительным оценкам, уровень мощности поглощённой дозы в диагностической передней стенке (ДПС) будет порядка $2 \cdot 10^3$ Гр/с [4] при условии времени работы ИТЭР $2 \cdot 10^7$ с.

На рис. 2 показаны CAD-модель 3D и вертикальное сечение $PY = -46$ см её нейтронной модели УВЗ СВЛ-диагностики.

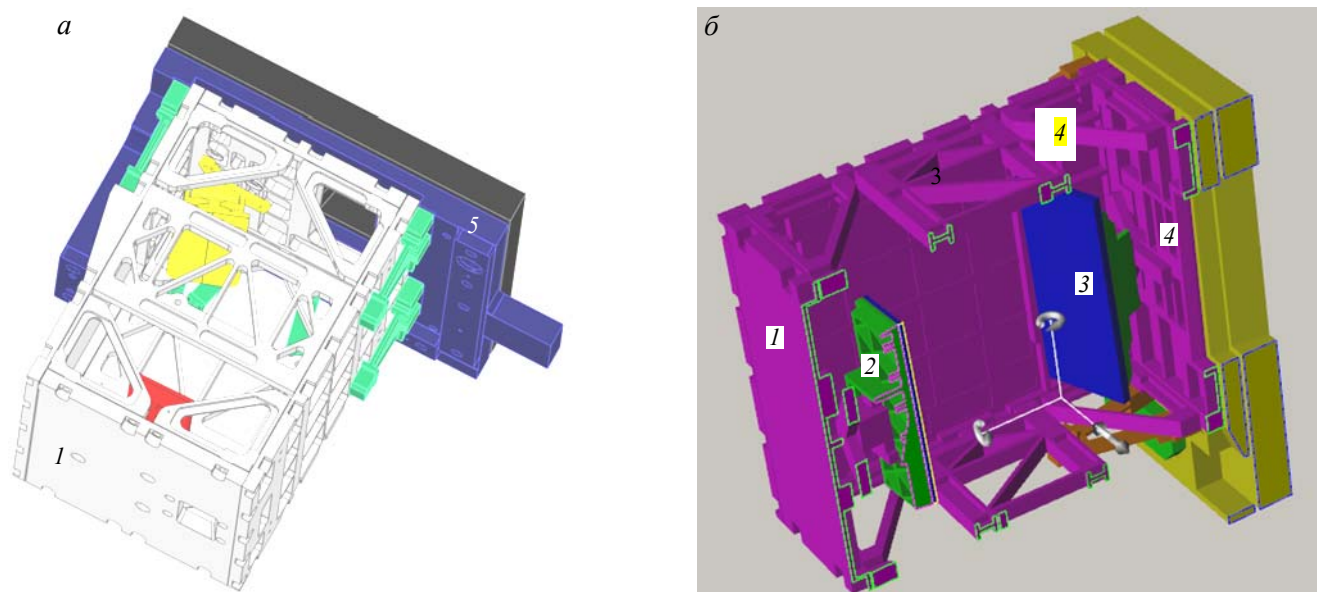


Рис. 2. CAD-модель УВЗ (а) и вертикальное сечение $PY = -46$ см (б) её нейтронной модели: 1 — передняя стенка корпуса УВЗ; 2 — зеркало М2; 3 — зеркало М1; 4 — задняя стенка УВЗ; 5 — стальная пластина

С использованием кода переноса излучения MCNP [5] получены локальные пространственные профили энерговыделения от нейтронов и γ -квантов, а также оценена поглощённая доза в конструкционных элементах УВЗ СВЛ-диагностики в ЭП № 12. На основе данных полного объёмного тепловыделения проведён расчёт температурных показателей на поверхности элементов диагностической системы с помощью универсальной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS [6].

НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ

Для анализа нейтронных полей с помощью MCNP используется 40° тороидальный сектор трёхмерной модели ИТЭР C-Model R181031 REV. 190110 issued 10/01/2019 [7] (далее C-Model). Заданный в C-Model экваториальный порт был модифицирован с учётом параметров реальной конструкции компонентов СВЛ-диагностики. Программа SuperMC [8] — программный код конвертации CAD-файлов использовалась для создания MCNP-модели внутривакуумных компонентов СВЛ. Расчёты нейтронных и γ -нагрузок проводились с помощью метода Монте-Карло с использованием ядерных констант FENDL 3.1d [9] (библиотека нейтронных сечений от 10^{-11} до 55 МэВ, библиотека для γ -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 [10], 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 $1,775 \cdot 10^{20}$ нейтр./с [11].

На рис. 3 показано вертикальное сечение упрощённой модели ДЗМ № 1, использованной для анализа

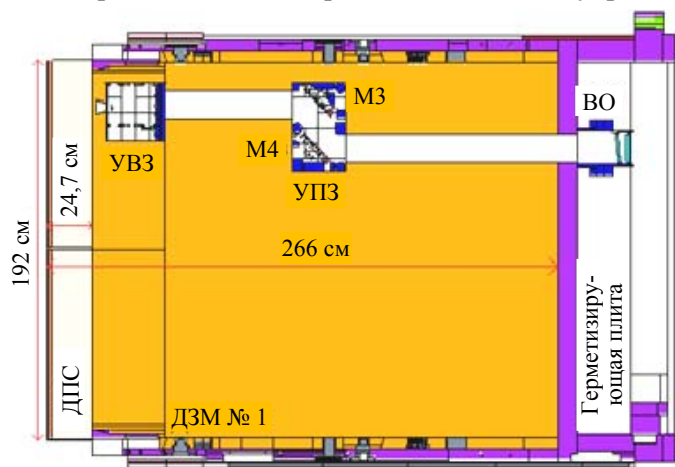


Рис. 3. Вертикальное сечение XZ ЭП № 12 в зоне ДЗМ № 1 с СВЛ-диагностикой: ДПС — диагностическая первая стенка; ДЗМ — диагностический защитный модуль; УВЗ — узел входного зеркала; УПЗ — узел промежуточного зеркала; ВО — вакуумное окно

радиационных нагрузок. Весь ЭП, за исключением пространства размещения СВЛ-диагностики, 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 [12]. Детализированная модель оптических компонентов диагностики (УВЗ, узел промежуточного зеркала (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 γ -кванты будут рассеиваться в сторону канала СВЛ-диагностики. Также, возможно, потребуются учёт вырезов в соседних защитных модулях ДЗМ № 2, 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Тепловые нагрузки, вызванные быстрыми нейтронами и мгновенными γ -квантами, рассчитаны на всём протяжении портовой заглушки в месте, где интегрирована СВЛ-диагностика в ДЗМ № 1. Вклады как нейтронов, так и γ -квантов суммируются, и приводится их общее значение в виде полного энерговыделения.

На рис. 4 показаны полные нейтронные и γ -потоки в зоне УВЗ СВЛ-диагностики в ЭП № 12. Показаны изометрические сечения, где обозначены контуры элементов СВЛ-конструкции (корпус УВЗ из сплава TZM [13], 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).

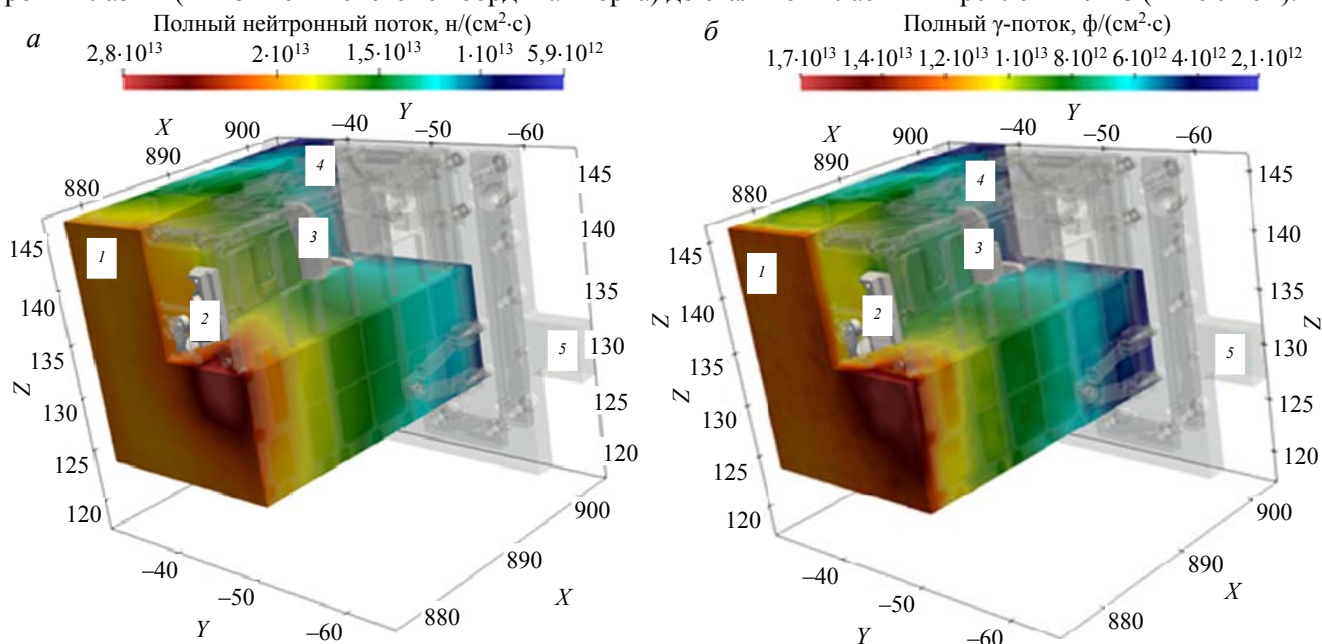


Рис. 4. Профиль полного нейтронного (а) и γ -потоков (б) в сечении $PY = -41$ см: 1 — передняя стенка корпуса УВЗ; 2 — зеркало М2; 3 — зеркало М1; 4 — задняя стенка корпуса УВЗ; 5 — стальная пластина

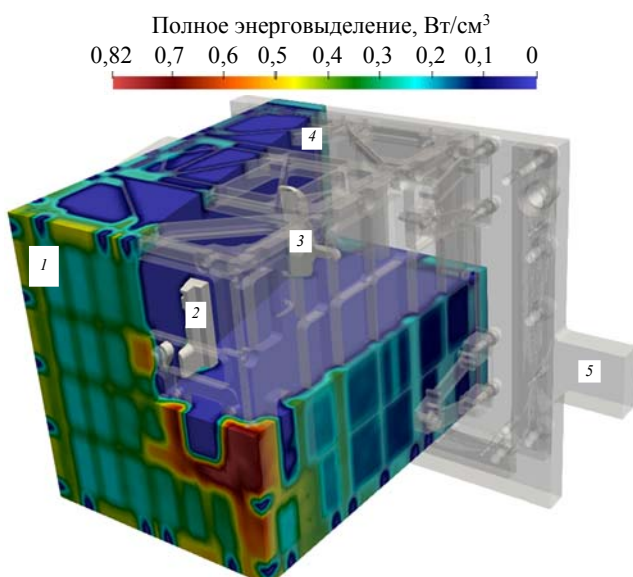


Рис. 5. Профиль полного энерговыделения элементов УВЗ СВЛ-диагностики: 1 — передняя стенка корпуса; 2 — зеркало М2; 3 — зеркало М1; 4 — задняя стенка корпуса УВЗ; 5 — стальная пластина

Для вывода о необходимости водяного охлаждения корпуса УВЗ или его отдельных элементов оценено полное энерговыделение. На рис. 5 показан полный нагрев в элементах УВЗ СВЛ-диагностики.

В таблице приведены значения нейтронного, гамма- и полного энерговыделения в значимых конструктивных элементах СВЛ-диагностики, полученные путём оценки в целом элементе конструкции (не используется сеточный метод расчёта). Наибольший нагрев наблюдается на передней стенке корпуса УВЗ. Это связано со слишком близким расположением к плазме и прямым попаданием высокоэнергетических частиц через вырез в ДПС для светового пучка. Максимальное энерговыделение в зеркале М1 составляет $0,56 \text{ Вт/см}^3$, что по порядку величины совпадает с результатами аналогичного расчёта для диагностики томсоновского рассеяния в ЭП № 10 [14], имеющем схожее положение и материал первого зеркала.

Радиационный нагрев от нейтронов, γ -квантов и суммарный в основных элементах УВЗ СВЛ-диагностики в ЭП № 12, Вт/см^3

Элементы конструкции УВЗ	Материал	Нагрев от нейтронов	Нагрев от γ -квантов	Полный нагрев
Зеркало М1	Мо	0,05	0,36	0,41
Зеркало М2	Мо	0,08	0,48	0,56
Передняя стенка корпуса УВЗ	TZM	0,09	0,81	0,82
Задняя стенка корпуса УВЗ	TZM	0,04	0,26	0,3
Левая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	TZM	0,05	0,41	0,46
Правая стенка корпуса УВЗ (вид со стороны плазмы)	TZM	0,01	0,39	0,4
Стальная плита крепления УВЗ	SS316	0,02	0,12	0,14

Полная мощность поглощённой дозы, Вт/см³
 3,9·10⁶ 3·10⁶ 2,5·10⁶ 2·10⁶ 1,5·10⁶ 1·10⁶ 0,5·10⁶ 1,0·10⁵

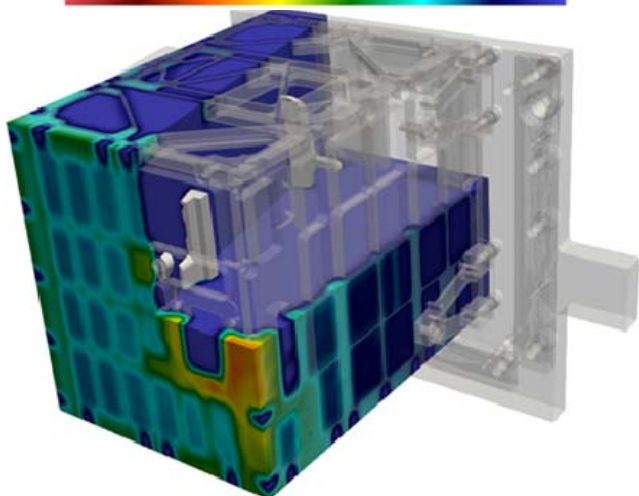


Рис. 6. Профиль полной мощности поглощённой дозы в УВЗ СВЛ-диагностики

Температура, °С

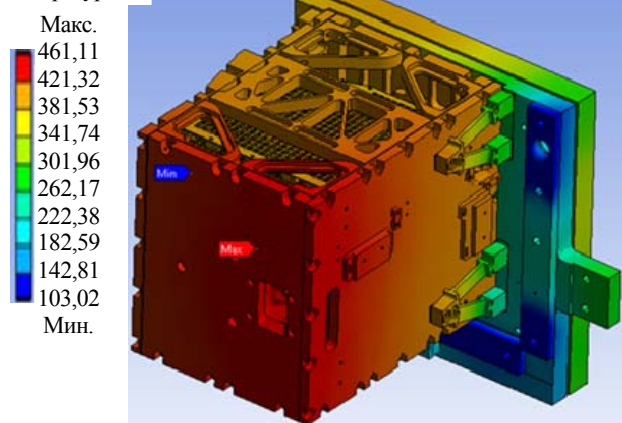


Рис. 7. Профиль температурного распределения в УВЗ СВЛ-диагностики

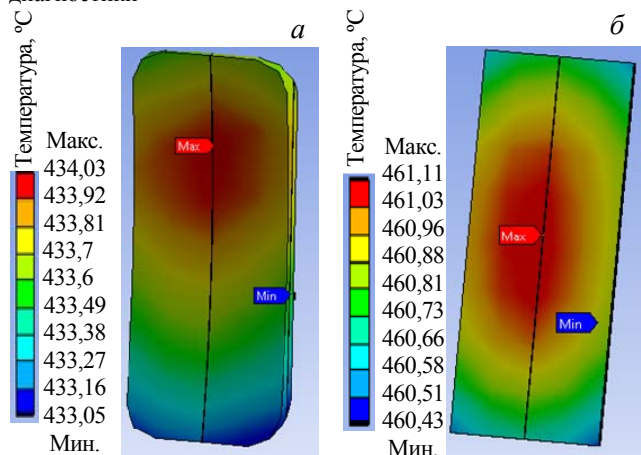


Рис. 8. Профиль температурного распределения в зеркалах М1 (а) и М2 (б) СВЛ-диагностики

Температурный анализ показывает незначительный перепад температур в молибденовом защитном корпусе УВЗ порядка 50 °С. Максимальная температура 461 °С наблюдается на поверхности зеркала М2 (рис. 8).

ВЫВОДЫ

Необходимые условия работы узла входного зеркала СВЛ-диагностики — это высокая температура, сильное магнитное поле, интенсивное радиационное облучение (нейтроны и мгновенные γ -кванты) и

Как видно из таблицы, нейтроны вносят гораздо меньший вклад в нагрев элементов конструкции СВЛ-диагностики, чем γ -кванты. Это вызвано тем, что защитные материалы в данной области представлены химическими элементами с малой атомной массой, такие как железо, вода и карбид бора. Максимальное локальное энерговыделение от нейтронов в отдельных местах конструкции достигает значения 0,09 Вт/см³. В свою очередь, локальный нагрев от γ -квантов достигает значения 0,8 Вт/см³.

На рис. 6 показаны результаты расчёта мощности поглощённой дозы. Аналогично с тепловым взаимодействием вклад в поглощённую дозу от нейтронов в разы ниже (порядка 10 раз), чем от γ -квантов. На рис. 6 показан профиль полной (суммарной от нейтронов и γ -квантов) мощности поглощённой дозы в материалах конструкции УВЗ СВЛ-диагностики.

На рисунке видно, что мощность дозы практически во всём защитном корпусе УВЗ не будет превышать 3 МГр/ч, что не является критичным для молибденового защитного корпуса. Отражательная способность молибденовых зеркал практически не будет снижаться при поглощённой дозе до 10 МГр, более значительные повреждения нанесёт эрозия.

На рис. 5 наблюдается резкое уменьшение энерговыделения на краях элементов. Это вызвано захватом пустоты частью расчётной сетки, что приводит к ошибочному уменьшению получаемой локальной плотности объёмного нагрева. Полное энерговыделение в таких ячейках определяется точно только в имеющемся материале, однако результат (плотность энерговыделения) рассчитывается для объёма всей ячейки, который содержит частицу и материал, и пустоту.

Входными данными для расчёта температурных показателей в зоне УВЗ СВЛ-диагностики являлись данные полного энерговыделения, полученные ранее в нейтронном анализе, которые накладывались на расчётную сетку ANSYS. При расчёте учитывалось прямое тепловое излучение плазмы на поверхность зеркала М1, однако в связи с маленькой апертурой выреза входного оптического зрачка диагностики (диаметр 1 см) оно не превышает 5 Вт. На рис. 7 показана полученная карта максимальных температур УВЗ в условиях вакуума и заданного профиля температуры ДЗМ вокруг УВЗ (80—250 °С).

высокий вакуум окружающей среды портовой заглушки. С помощью кода MCNP проведены моделирование переноса нейтронов и γ -квантов в модели экваториального порта № 12 ИТЭР и расчёт радиационных нагрузок на компоненты УВЗ-диагностической системы СВЛ. Результаты ранних работ свидетельствуют о значительном градиенте потоков в зоне УВЗ с двукратным снижением нагрузок от передней к задней стенке УВЗ [13].

Тепловой анализ свидетельствует о перепаде температуры в зоне УВЗ СВЛ-диагностики порядка 50 °С и максимальной температуре зеркала М2 461 °С. Данные тепловые нагрузки, под которые попадает СВЛ-диагностика, не являются критическими и позволяют использовать молибден в качестве основного конструкционного материала без использования дополнительного водяного охлаждения. Съём тепла будет происходить путём переизлучения. Для молибденовых зеркал критическая температура составляет 700 °С. При такой температуре молибден распухает, в следствие чего механическая нагрузка на зеркало превышает его предел прочности. Также при данных температурах тепловое излучение зеркала искажает измерения СВЛ-диагностики.

Полный нагрев от нейтронов и мгновенных γ -квантов 0,56 Вт/см³ наблюдается в зеркале М2, что по порядку величины не превышает результаты аналогичного расчёта для диагностики томсоновского рассеяния в ЭП № 10.

Передняя стенка корпуса УВЗ в ЭП № 12 подвержена наибольшим радиационным нагрузкам в связи с близким расположением к плазме — поглощённая доза в молибдене не превышает 3 МГр в течение всего срока службы ИТЭР.

Следует отметить, что при использовании детальной модели внутри вакуумной части СВЛ-диагностики не наблюдалось проблем с «потерянными частицами» в процессе проведения расчёта. Кроме того, использование детальной модели позволило получить уточнённую картину нейтронных и γ -полей в области УВЗ с более высоким разрешением по сравнению с результатами аналогичных работ для ИТЭР [15]. В дальнейшем по мере обновления дизайна конструкции ЭП № 12 в расчётную модель планируется добавить модель всех трёх ДЗМ с сопутствующими диагностиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, p. 827—830; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.091>.
2. **Letellier L., Guillon Ch. et al.** System level design of the ITER equatorial visible/infrared wide angle viewing system. — *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 123, p. 650—653; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.06.005>.
3. **Вуколов К.Ю.** Радиационная стойкость оптических диагностик в условиях термоядерного реактора ИТЭР. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2012.
4. **Готт Ю.В., Курнаев В.А.** На пути к энергетике будущего, 2017. ISBN 978-5-7262-22-96-7.
5. **X-5 Monte Carlo Team, MCNP.** A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. V. 5, vol. I. MCNP Overview and Theory, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
6. **ANSYS Inc.,** ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 17.0, January 2016.
7. **Polunovskiy E.** C-model R181031. Revision 190110. ITER_D_XEU24H_v2 (private communication).
8. **Wu Y., Song J., Zheng H. et al.** CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC. — *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 82, p. 161—168.
9. **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.
10. **ADVANTG.** An Automate Variance Reduction Generator ORNL/TM-2013/416.
11. **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 Eng. and Des.*, 2016, vol. 109—111, p. 1109—1113; [doi:10.1016/j.fusengdes.2016.01.013](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.01.013).
12. <https://www.plansee.com/en/materials/molybdenum.html>.
13. **Афанасенко Р.С., Алексеев А.Г., Кутеев Б.В., Морозов А.А., Вуколов Д.К.** Радиационные нагрузки на узел входного зеркала диагностики СВЛ в экваториальном порту ИТЭР № 12. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 1; DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-39-45
14. **Mota F., Suarez A.** Equatorial Port Plug Core Thomson Scattering Diagnostics Neutronics Evaluations. ITER_D_Q8XGBC, version 1.3.
15. **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>.



Роман Станиславович Афанасенко, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; инженер 2-й категории; УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; аспирант; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
Aphanasenko_RS@nrcki.ru



Андрей Геннадьевич Алексеев, начальник отдела, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; начальник отдела диагностики СВЛ; УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Alekseev_AG@nrcki.ru



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя Отделения по гибридным системам, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; профессор; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
Kuteev_BV@nrcki.ru



Антон Александрович Морозов, конструктор 1-й категории, лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; инженер 1-й категории; УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Morozov_AA@nrcki.ru



Дмитрий Константинович Вуколов, инженер-конструктор 1-й категории; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; главный конструктор Конструкторского отдела; УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
vukolov_dk@fc.iterru.ru



Андрей Михайлович Козлов, инженер 2-й категории; УТС-Центр, 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
a.kozlov@fc.iterru.ru

Статья поступила в редакцию 8 июня 2020 г.

После доработки 7 июля 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 24—30.