

УДК 533.9

ТОКАМАК С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ (TRT): ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЯДЕРНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КАТУШКАХ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

© 2021 г. Д. В. Портнов^{а, *}, Ю. Г. Высоких^а, Ю. А. Кашук^а, Р. Н. Родионов^а^а Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”,
“Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия

*e-mail: d.portnov@iterrf.ru

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 06.07.2021 г.

Представлены результаты расчетов энерговыделения, создаваемого ионизирующим излучением в вакуумной камере и магнитных катушках токамака с реакторными технологиями. Выполнено сравнение результатов для DD- и DT-плазмы. На основании расчетов, авторы делают вывод, что для DD-плазмы уровень энерговыделения находится в допустимых пределах – менее 1 мВт/см³ и предлагаемый дизайн вакуумной камеры удовлетворителен с точки зрения радиационной защиты. Для DT-плазмы – вопрос о дополнительных мерах защиты или ограничении времени разряда остается дискуссионным. На основании рассчитанных пространственных и энергетических распределений поля нейтронов, авторы приходят к выводу, что наибольший эффект для усиления защиты может дать увеличение толщины защитного слоя воды. Для снижения тепловой нагрузки на катушку тороидального поля при работе с DT-плазмой до уровня, допускающего длительный разряд, необходимо не менее, чем вдвое увеличить толщину слоя воды в вакуумной камере, как минимум, во внутреннем сегменте вблизи экваториальной плоскости. В статье сделаны оценки источников энерговыделения в тороидальных катушках, а также нескольких вариантов защиты. В частности, обосновывается утверждение, что использование бора, обогатенного изотопом ¹⁰B, практически не отражается на энерговыделении. Подтверждена возможность работы с DD-плазмой и определены проблемы радиационной защиты в случае с DT-плазмой.

Ключевые слова: токамак с реакторными технологиями, TRT, анализ транспорта нейтронов и гамма излучения, ядерно-радиационное энерговыделение, нейтронная защита

DOI: 10.31857/S0367292121110238

1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных особенностей проекта “Токамак с реакторными технологиями”¹ [1] – это применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в электромагнитной системе (ЭМС). ВТСП дают возможность создать сильное тороидальное магнитное поле (до 8 Т), что, в свою очередь, позволит достичь термоядерных параметров плазмы на компактной установке. На этой установке будет возможно отработать ключевые термоядерные технологии, включая новые конфигурации дивертора, литиевую стенку, различные методы дополнительного нагрева и поддержания квазистационарного тока. Установка должна также обеспечить режим работы с кратко-

временным, масштаба 10 секунд, горением с применением трития. В этом режиме выход термоядерной энергии превзойдет вклад в нагрев плазмы от внешних источников ($Q > 1$). Иными словами, нагрев альфа-частицами станет доминирующим.

Применение в ЭМС TRT высокотемпературных сверхпроводников требует решения ряда проблем. В частности, необходимо избежать критического разогрева сверхпроводников ионизирующим излучением. Для этого необходимо оценить минимально достаточную эффективность радиационной защиты, которую может обеспечить вакуумная камера (ВК). Для охлаждения ВТСП будет использован гелий с температурой, меняющейся в диапазоне 5–20 К, что дает некоторый запас по времени разогрева проводников [1].

¹ Для однозначной идентификации проекта, в том числе и в международных коммуникациях, было принято решение использовать английскую аббревиатуру TRT, которая и будет использована далее по тексту.

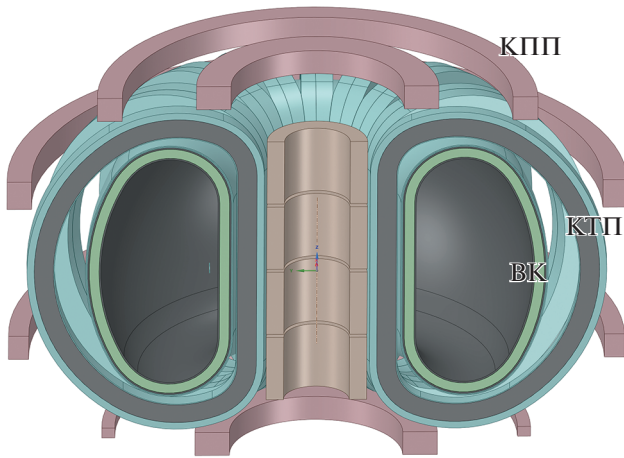


Рис. 1. Упрощенная 3D-модель вакуумной камеры (ВК) и ЭМС TRT, включая катушки тороидального поля (КТП), полоидального (КПП) и соленоид.

В данной работе сделана оценка энерговыделения для проектируемых вакуумной камеры и ЭМС с усреднением по объему компонент и с пространственным разрешением. Эти величины определяют необходимую величину теплосъема с элементов ЭМС.

Концепция TRT [1] предполагает, что с DD-плазмой полный выход нейтронов в единицу времени составит 0.5×10^{18} нейтронов в с. Для плазмы с примесью 1% трития, следует ожидать вдвое большего выхода – 10^{18} [1]. Максимальная ожидаемая плотность потока нейтронов в DT-плазме – 2×10^{12} н/см² с.

Рисунок 1 представляет упрощенную модель, выбранную для предварительного анализа энерговыделения в вакуумной камере (ВК) и элементах ЭМС TRT.

В модели представлены стальная вакуумная камера, заполненная борированной водой, катушки тороидального (КТП) и полоидального (КПП) полей, соленоид. Внешняя поверхность вакуумной камеры покрыта двумя слоями защиты, в основном состоящей из вольфрама и карбида бора. В модели отсутствуют дивертор и внутрикамерные компоненты, обращенные к плазме.

Упрощенная модель не содержит патрубков для размещения диагностик и систем внешнего нагрева. Патрубки в реальности будут частично заполнены. Также будет заполнено пространство между камерой и КПП. Поэтому результаты расчетов энерговыделения для внешних по большому радиусу сегментов тороидальных и полоидальных катушек могут существенно отличаться от реальных. Для внешних сегментов величины нагрузок можно использовать только как первое приближение. Сейчас нас интересует самый близкий к плазме и вследствие этого наиболее за-

груженный внутренний сегмент тороидальной катушки, для которого отсутствие или наличие патрубков не имеет значения.

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА

Расчет был выполнен с помощью программы MCNP [2]. Упрощенная CAD-модель была преобразована в MCNP-модель с помощью программы SuperMC [3]. Для работы с программой MCNP и прохождения обучения и сертификации в NEA/OECD была получена лицензия RSICC.

В нашей MCNP-модели были использованы спецификации материалов из MCNP модели ИТЭР [4]: чистый вольфрам (не менее 99.7%, производство Plansee [5]), сталь S316(L)N-IG, карбид бора с естественным содержанием изотопов [6], плотность 2.3 г/см^3 – это меньше, чем предлагает ООО “Вириал” г. Санкт-Петербург [7]. Задано, что вода в ВК содержит 0.8% бора по весу. В первом варианте модели слои защиты вокруг вакуумной камеры (рис. 2) были представлены гомогенизированной композицией из стали, вольфрама и карбида бора в пропорции, заданной толщиной соответствующих слоев и плотностями. В последующих оптимизированных вариантах защиты внутренний слой защиты был задан, как чистый карбид бора, внешний – вольфрам. Была использована библиотека ядерных данных ENDF/B-VII [8]. Были также рассчитаны варианты применения бора с 95% обогащением изотопом ¹⁰B.

В качестве источника был выбран тороидальный кольцевой источник, проходящий в экваториальной плоскости токамака, $Z = 0$ см, по большому радиусу $R = 215$ см. Для предварительных оценок такое приближение допустимо, с учетом того, что, как будет показано ниже, основной вклад в поток нейтронов на стенку ВК создают многократно рассеянные нейтроны. Расчеты были выполнены для варианта DD- и DT-плазмы в предположении, что температура ионов 10 кэВ.

Были рассчитаны средние значения потоков и энерговыделение по заполненным материалами элементами модели. Для полей нейтронов и гамма-излучения было рассчитано пространственно-энергетическое распределение, а также энерговыделение в области, проходящей через одну из катушек тороидального поля, соленоид и пересекающей полоидальные катушки. Пространственное разрешение – 1 см. Для обоих вариантов источника DD и DT, полный выход источника был задан величиной 10^{18} н/с. Для других величин нейтронного выхода или смешанного DD + DT источника рассчитываемые величины могут быть получены соответствующей линейной комбинацией. Полученные статистические погрешности рассчитываемых величин малы – как правило,

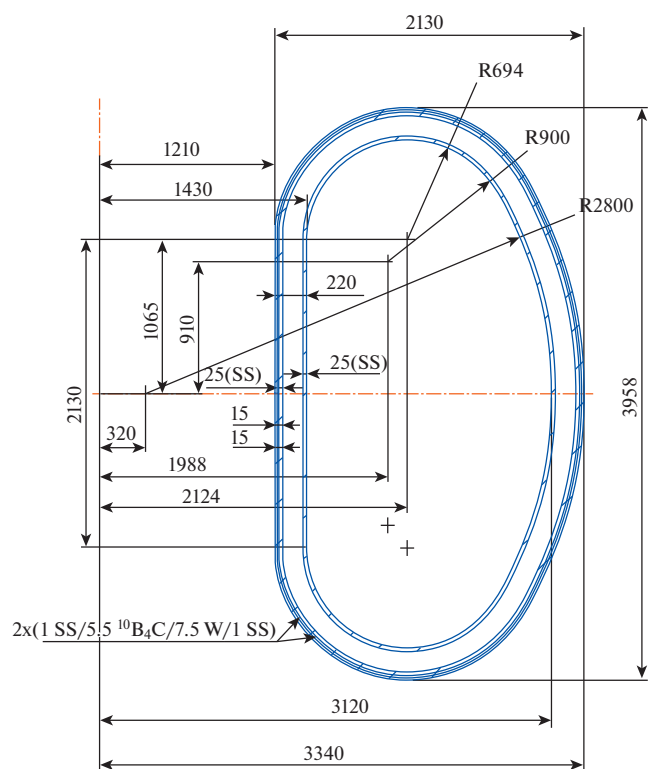


Рис. 2. Размеры и материалы вакуумной камеры.

менее 0.1%. Этими погрешностями можно пренебречь в сравнении с систематическими погрешностями, основной источник которых – недостаточно детальная геометрическая модель.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

DD-плазма

Ниже показаны результаты расчета энерговыделения в вакуумной камере и ЭМС для DD-плазмы (рис. 3, слева). Здесь представлено суммарное энерговыделение, создаваемое нейтронами и гамма-излучением. В случае DD-плазмы нейтроны отдают энергию практически полностью в воде вакуумной камеры. Энерговыделение в катушках тороидального поля достигает уровня мВт/см³. Как и ожидалось, наибольший разогрев происходит на внутреннем сегменте тороидальной катушки в зоне, близкой к экваториальной плоскости токамака.

Рисунок 4 (DD – слева) представляет распределение удельного энерговыделения по большому радиусу в экваториальной плоскости для внутренних сегментов ВК и КТП. На этом рисунке выделены вклады от нейтронов и гамма-излучения. На рисунке в последовательности справа налево представлены слои материалов ВК и КТП: первый стальной слой корпуса ВК (VV inner), на-

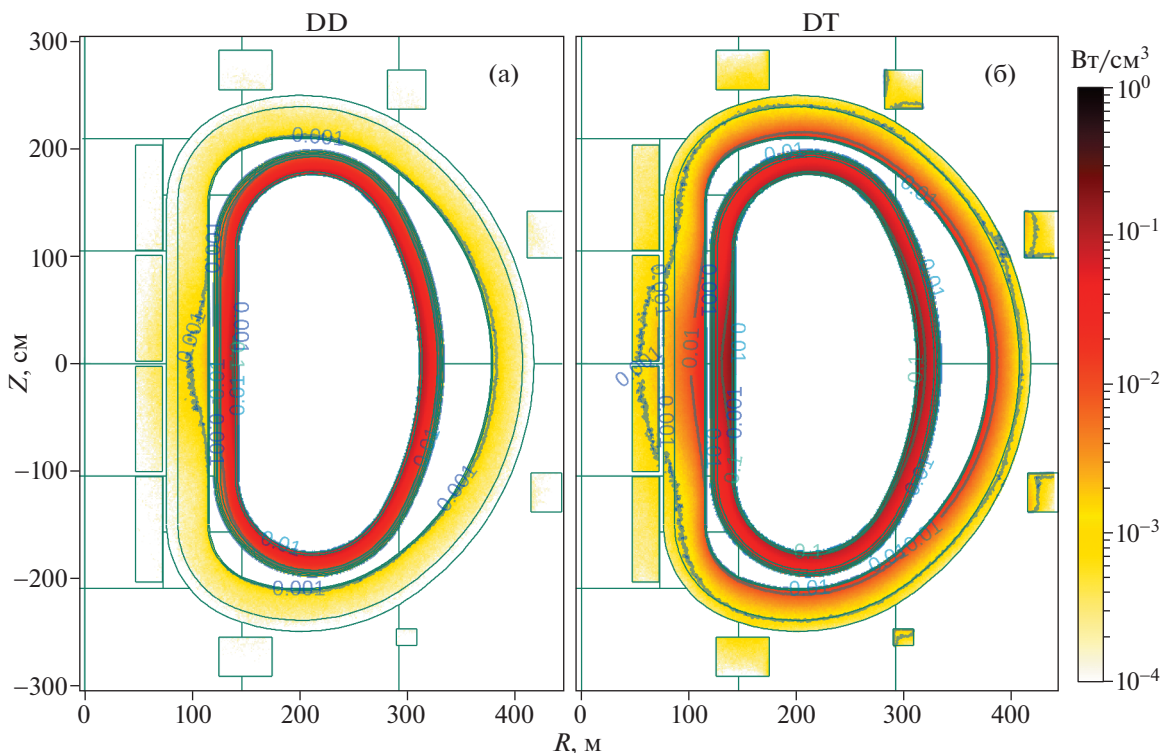


Рис. 3. Распределение энерговыделения, DD- (слева) и DT- (справа) плазма.

ходящийся ближе к плазме, борированная вода (Water), наружный стальной слой корпуса ВК (VV outer), два слоя защиты (Sh#1, Sh#2), пустота, внешняя часть стального корпуса КТП (TC steel), проводник КТП (TC wires), внутренняя часть корпуса КТП (TC steel). В слое воды в 14 см энерговыделение для DD-источника падает приблизительно в 5 раз. Толщина воды 9 см соответствует снижению удельного энерговыделения в e раз. В нижней части рисунка энерговыделение в КТП показано отдельно. Здесь длина ослабления в e раз – 17 см, почти в два раза выше, чем в воде. В материалах КТП основной вклад в энерговыделение дает гамма-излучение.

DT-плазма

В случае DT-плазмы нейтроны проникают значительно дальше (рис. 3 справа). Причем и вклад гамма-излучения в нагрев КТП больше, чем в случае с DD-плазмой (сравните рис. 4 слева и справа).

На КТП воздействует гамма-излучение, локальное – от фотонов, рожденных в самой КТП, и снаружи – со стороны ВК. Чтобы выделить вклад в энерговыделение в КТП локально рожденных фотонов, был выполнен отдельный расчет, где учитывались только те гамма-кванты, которые появились в материалах самой КТП. Это дало снижение максимального энерговыделения с 38 до 26 мВт/см³ ($\approx 30\%$). Причем максимальное снижение наблюдается вблизи поверхности КТП, обращенной к ВК. Однако среднее значение удельного энерговыделения по всему объему КТП снизилось только на 12%. Исходя из этого мы делаем вывод, что основной вклад в нагрев дает гамма-излучение, рожденное в самой КТП. Внешние фотоны дают сопоставимый, но все же намного меньший вклад и только на поверхности, обращенной к ВК.

Защита КТП от гамма-излучения со стороны ВК может иметь смысл только, если будет иметь значение неравномерность энерговыделения вблизи поверхности. Для минимизации нагрева КТП следует сосредоточить усилия на подавлении самого нейтронного потока.

Вновь обращаясь к рис. 4 (справа сверху), видим, что в случае DT-плазмы заданный слой воды ослабляет энерговыделение только в 3 раза, вместо 5, как было в случае DD-плазмы. Объясняется это тем, что сечение упругого взаимодействия нейтрона с протоном [9] на энергии 14 МэВ относительно мало – 0.68 барн. Для таких нейтронов толщины слоя воды в 14 см недостаточно. Это общая проблема для компактных токамаков. В работе [10], например, для такой толщины предлагается применить ZrH_2 , который по расчетам [10] на порядок лучше обеспечивает ослабление теп-

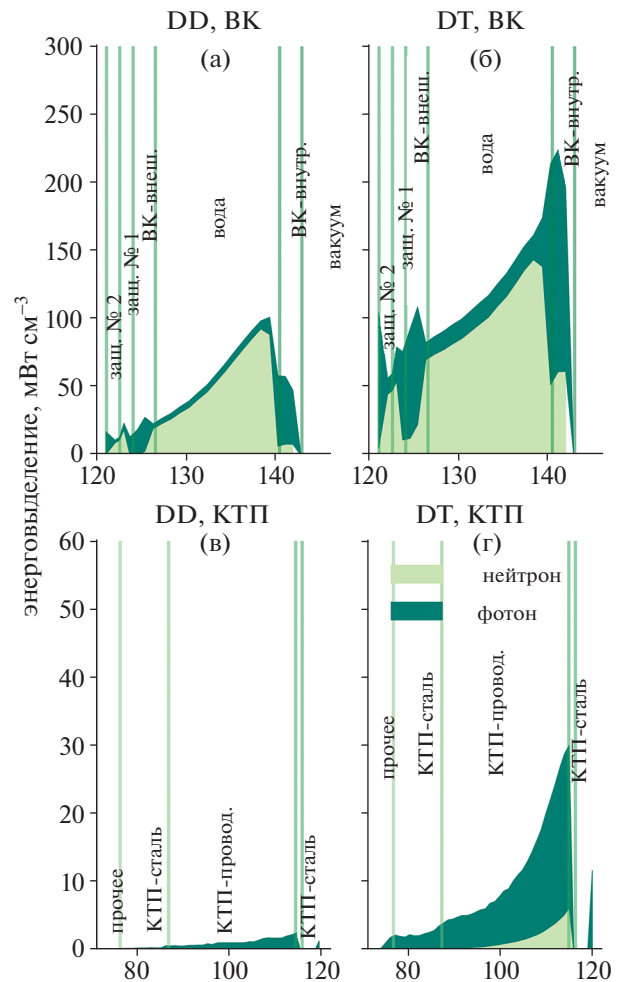


Рис. 4. Распределение энерговыделения по большому радиусу: а) DD-плазма, ВК, б) DT, ВК, в) DD, КТП, г) DT, КТП.

ловыделения. Этот подход требует дополнительного анализа для условий TRT.

Наличие большого количества водорода в составе защиты приводит к возврату значительной части нейтронов обратно в вакуумную камеру. Результаты расчета спектра нейтронов в зависимости от глубины погружения в конструкцию ВК и КТП приведены на рис. 5. Здесь показаны распределения нейтронов по энергии, усредненные по объему слоев из различных материалов ВК и КТП. Для этого рисунка выбрано кумулятивное представление функции распределения, чтобы нагляднее представить долю в общем потоке нейтронов разных энергий. В верхней части рисунка представлено распределение по энергиям во внутренней стальной оболочке вакуумной камеры (“VV inner steel”). Видно, что доля нейтронов с энергиями близкими к 14 МэВ составляет только треть от всего потока на стенку ВК. И далее, с

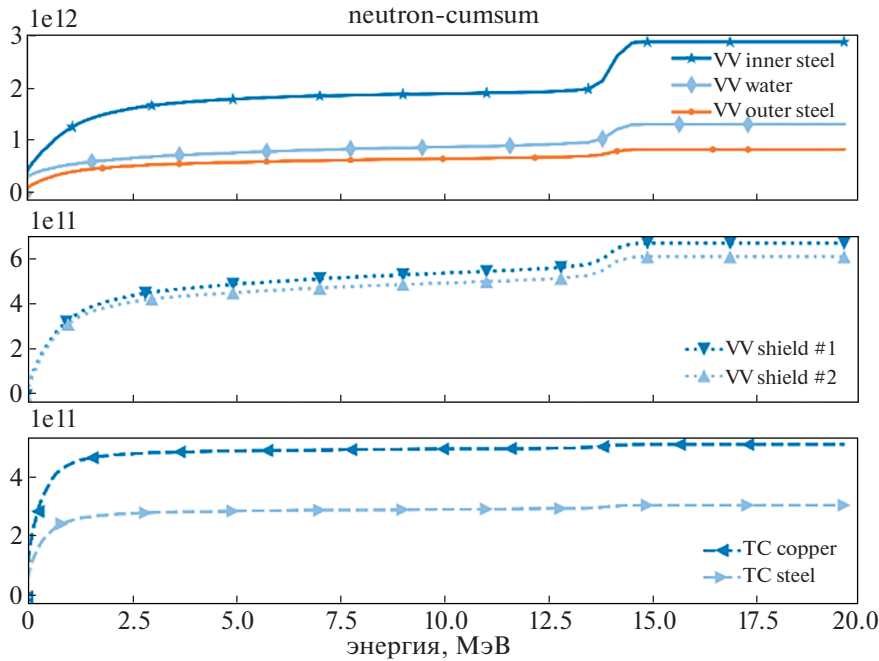


Рис. 5. Кумулятивные распределения плотности потока нейтронов по энергиям для слоев материалов ВК и КТП.

продвижением в глубь ВК и КТП, эта доля уменьшается.

4. АНАЛИЗ

Были выполнены расчеты для вариантов использования в воде и слоях защиты ВК бора с естественным изотопным составом и с обогащением изотопом ^{10}B 95%. Результаты для DT-плазмы приведены в табл. 1. С естественным бором нагрев выше, но несущественно – разница не более 8%.

Рисунок 6 объясняет почему это так. На рисунке приведено распределение вклада в энерговыделение в проводниках КТП от нейтронов и фотонов в зависимости от энергии. В данном случае расчет сделан для обычного бора. По левой части видно, что существенным является вклад от нейтронов с энергией близкой к 14 МэВ, несмотря на то, что в этом месте доля таких нейтронов в потоке мала (см. рис. 5 “ТС соррег” – средняя часть КТП, состоящая в основном из меди). Вклад от гамма-излучения также главным образом дают

фотоны с большими энергиями. В правой части рисунка, где шкала по энергии приведена в логарифмическом масштабе, видно, что частицы с энергией менее 100 кэВ практически не дают вклад в энерговыделение.

Наличие в нейтронном потоке на выходе из ВК значительной доли нейтронов с высокой энергией приводит к тому, что применение бора в защитных слоях вакуумной камеры не приводит к существенному снижению энерговыделения в КТП, хотя и ослабляет поток нейтронов низких энергий. В этой ситуации можно использовать обычный бор и отказаться от дорогостоящего обогащенного.

Чтобы оценить возможности увеличения защиты был рассчитан вариант модели для увеличенного количества воды в ВК. Геометрию модели нельзя изменить без дополнительного согласования, поэтому для качественной оценки было принято формальное увеличение плотности воды в модели до 2 г/см^3 . С “удвоенной” водой максимальное удельное энерговыделение в КТП снизилось почти в 4 раза и оказалась ближе по величине к значениям для DD-плазмы, чем для DT. Заметим, что зависимость эффективности торможения нейтронов в ВК от толщины слоя воды растет быстрее линейной. Это означает, что воды должно быть достаточно, чтобы защитный эффект от ее присутствия стал заметным, и тем более – преобладающим в многослойной защите.

Работа с большими объемами воды требует решения сложных организационных и технических

Таблица 1. Сравнение энерговыделения в проводниках КТП с обогащенным и естественным бором, мВт/см³

Вклад	обогащенный бор	естественный бор
Нейтрон	0.077	0.079
Гамма	0.438	0.474
Суммарно	0.514	0.553

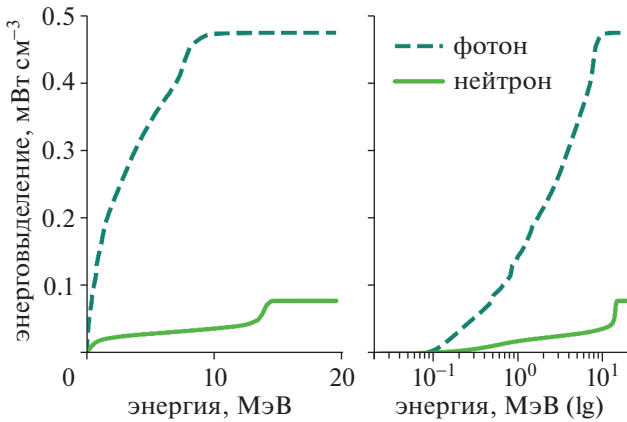


Рис. 6. Вклад в энерговыделение в проводниках КТП нейтронов и гамма-квантов различных энергий (DT-плазма, кумулятивное распределение).

проблем. Потребуется организация бассейнов для охлаждения и выдержки воды, а также радиационно-защищенных систем подачи и отвода воды. Но при большом объеме воды, при прочих равных, можно на порядок уменьшить общую массу и стоимость защиты, за счет уменьшения массы необходимых стали, карбида бора и вольфрама. Соответственно, снизится масса и стоимость радиоактивных отходов, а эти отходы могут создать еще большие проблемы в конце эксплуатации установки. С учетом отходов, отказ от применения воды в качестве основного элемента нейтронной защиты не исключает проблемы, а лишь переносит их на будущее.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для упрощенной модели TRT было рассчитано энерговыделение в вакуумной камере, в катушке тороидального поля и других компонентах ЭМС.

Рассчитанные значения для среднего по объему энерговыделения приведены в табл. 2. Для оценки полного тепловыделения в КТП принято значение объема по оценке из упрощенной 3D-модели 1.08 м^3 . Для DT-плазмы полное тепловыделение в КТП составило 5.5 кВт. Напомним, что в данной модели не учтены компоненты, обращенные к плазме, находящиеся внутри ВК, по-

Таблица 2. Среднее по объему энерговыделение в КТП, мВт/см³

	DD	DT	DT, “двойная” вода
Нейтрон	0.053	0.786	0.206
Гамма	0.429	4.605	1.313
Суммарно	0.483	5.391	1.519

скольку именно ВК служит основной радиационной защитой в ТРТ.

Энерговыделение в остальных элементах ЭМС также рассчитано, но для точных расчетов требуется существенное уточнение 3D-модели.

Для случая DD-плазмы энерговыделение находится в допустимых пределах, менее 1 мВт/см^3 . Этот предел установлен разработчиками охлаждения ЭМС TRT и в настоящее время еще обсуждается – предел значительно выше, чем предлагаемый для DEMO 50 мВт/см^3 [11], но сопоставим с ожидаемой величиной для DTT [12] и Spark [13]. С учетом того, что расчет был выполнен для полного выхода нейтронов 10^{18} сек^{-1} , что в несколько раз выше ожидаемого с DD-плазмой этот предел достигнут не будет. Для DT-плазмы при том же выходе необходимо или ограничить время разряда, или усилить защиту – увеличить толщину слоя воды в ВК, по крайней мере на внутреннем сегменте. Возможно, следует рассмотреть сочетание с другими замедлителями нейтронов.

Работа выполнена при поддержке государственной корпорацией по атомной энергии “Росатом” в рамках договора между АО “Наука и инновации” и Частным учреждением “ИТЭР-Центр” № 313/1671-Д от 5 сентября 2019 г. “НИОКР в обоснование концептуального проекта токамака с реакторными технологиями”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N., Mazul I.V., Rodin I.Yu., Mineev A.B., Kuzmin E.G., Kavin A.A., Karpov D.A., Leonov V.M., Khayrutdinov R.R., Kukushkin A.S., Portnov D.V. // Plasma Physics Reports. 2021. In Print
2. MCNP USER'S MANUAL Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-1729981
3. Wu Y., Song J., Zheng H., Sun G., Hao L., Long P., Hu L. // Annals of Nuclear Energy. 2015. 82: 161–168.
4. Leichte D., Colling B., Fabbri M., Juarez R., Loughlin M., Pampin R., Polunovskiy E., Serikov A., Turner A., Bertalot L. // Fusion Engineering and Design. Elsevier Ltd. 136: 742–746. 2018.
5. Сайт компании “The Plansee Group” <https://www.plansee.com/ru/material/volfram.html>
6. Technical specification of Bhukhanvala Industries Pvt. Limited, <http://www.bhukhanvala.in>
7. Сайт ООО “Вириал”, http://www.virial.ru/materials/arm_ceramic
8. ENDF, version 2021-02-15, <https://www.nds.iaea.org/exfor/endf.htm>
9. Chadwick M.B., Herman M., Obložinský P., Dunn M.E., Danon Y., Kahler A.C., Smith D.L., Pritychenko B., Arbanas G., Arcilla R., Brewer R., Brown D.A., Capote R., Carlson A.D., Cho Y.S., Derrien H., Guber K., Hale G.M., Hobbli S., Holloway S., Johnson T.D., Kawano T., Kiedrowski B.C., Kim H., Kunieda S., Lar-

- son N.M., Leal L., Lestone J.P., Little R.C., McCutchan E.A., MacFarlane R.E., MacInnes M., Mattoon C.M., McKnight R.D., Mughabghab S.F., Nobre G.P.A., Palmiotti G., Palumbo A., Pigni M.T., Pronyaev V.G., Sayer R.O., Sonzogni A.A., Summers N.C., Talou P., Thompson I.J., Trkov A., Vogt R.L., van der Marck S.C., Wallner A., White M.C., Wiarda D., Young P.G. // Nuclear Data Sheets. 112 (12), 2887–2996. 2011. // <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
10. Hartwig Z.S., Haakonsen C.B., Mumgaard R.T., Bromberg L. // Fusion Engineering and Design. 87 (3) : 201–214. 2012.
 11. Fischer U., Bachmann C., Palermo I., Pereslavtsev P., Villari R. Neutronics requirements for a DEMO fusion power plant. Fusion Engineering and Design. 98–99 : 2134–2137. 2015.
 12. Villari R., Angelone M., Caiffi B., Colangeli A., Crisanti F., Flammini D., Fannesu N., Luis R., Mariano G., Marocco D., Moro F., Polli G.M., Sandri S. // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 155. P. 111551.
 13. Creely A.J., Greenwald M.J., Ballinger S.B., Brunner D., Canik J., Doody J., Fülöp T., Garnier D.T., Granetz R., Gray T.K., Holland C., Howard N.T., Hughes J.W., Irby J.H., Izzo V.A., Kramer G.J., Kuang A.Q., LaBombard B., Lin Y., Lipschultz B., Logan N.C., Lore J.D., Marmar E.S., Montes K., Mumgaard R.T., Paz-Soldan C., Rea C., Reinke M.L., Rodriguez-Fernandez P., Särkimäki K., Sciortino F., Scott S.D., Snicker A., Snyder P.B., Sorbom B.N., Sweeney R., Tinguely R.A., Tolman E.A., Umansky M., Vallhagen O., Varje J., Whyte D.G., Wright J.C., Wukitch S.J., Zhu J., Team the S. // Journal of Plasma Phys. 2020. V. 86. № 5. P.