

УДК 621.039.634

## КОМПОНЕНТЫ, ОБРАЩЁННЫЕ К ПЛАЗМЕ, В ПРОЕКТЕ ТРТ: КОНСТРУКЦИЯ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

*П.Ю. Пискарев, И.В. Мазуль, А.Н. Маханьков, М.С. Колесник, Е.В. Окунева, Н.В. Литуновский*

*АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассматриваются основные вопросы, которые решаются при проектировании обращённых к плазме компонентов в проекте ТРТ: уточнение функционала различных компонентов, их компоновка в камере и дизайн, выбор материалов в составе энергонапряжённой многослойной структуры и технологий создания такой структуры. Выбор материала облицовки в данном случае — один из ключевых вопросов, так как от его решения зависят не только инженерные характеристики компонентов, но и параметры плазмы. Конструкция и материалы теплоотводящей структуры с интенсивным охлаждением должны обеспечивать длительную и надёжную эксплуатацию компонента при пиковых значениях теплового потока в заданных условиях окружающей среды. При этом, учитывая сложность и длительность сооружения, ввода в эксплуатацию и достижения проектных параметров для любого крупного токамака масштаба ТРТ, разумным является поэтапное оснащение токамака обращёнными к плазме компонентами, в том числе имеющими разные материалы и конструкцию.

**Ключевые слова:** токамак реакторных технологий, обращённые к плазме компоненты, первая стенка, дивертор, защитная облицовка, теплоотводящая структура, вольфрам, бериллий, графит.

## PLASMA-FACING COMPONENTS IN THE TRT PROJECT: DESIGN, MATERIALS AND TECHNOLOGIES

*P.Yu. Piskarev, I.V. Mazul, A.N. Makhankov, M.S. Kolesnik, E.V. Okuneva, N.V. Litunovsky*

*JSC «NIEFA», Saint-Petersburg, Russia*

The paper discusses the main issues that are resolved when designing plasma-facing components in the TRT project — this is the clarification of the functionality of various components, their arrangement in the vacuum vessel and design, choice of materials of a high-heat flux multilayer structure and technologies for creating such a structure. The choice of shielding material is the key issue, since not only the engineering parameters of the components, but also the plasma parameters depend on the decision. The design and materials of the intensive cooling heat-sink structure must ensure long-term and reliable operation of the component at peak heat flux in specified environmental conditions. At the same time, taking into account the complexity and duration of construction, commissioning and achievement of project parameters for any large-scale tokamak such as the TRT, it is reasonable to stepwise equip the tokamak with plasma-facing components with different materials and designs.

**Key words:** tokamak of reactor technology, plasma-facing components, first wall, divertor, armour material, heat-sink structure, tungsten, beryllium, carbon.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-41-53

### ВВЕДЕНИЕ

Компоненты, обращённые к плазме (КОП), к которым относятся панели первой стенки (ППС) и дивертор, являются наиболее энергонапряжёнными компонентами в термоядерной установке с магнитным удержанием плазмы типа токамак. При проектировании КОП необходимо достичь и подтвердить расчётным и/или экспериментальным путём обеспечение необходимого ресурса эксплуатации в условиях воздействия заданных условий рабочей среды, комплекса нагрузок и различных сценарных условий. Инженерный подход заключается в необходимости обеспечения ресурса и запаса надёжности (запас прочности, запас до кризиса теплообмена и пр.) спроектированной конструкции для всех сценариев эксплуатации (малоцикловая усталость, переходные процессы, нештатные и аварийные ситуации) с учётом неопределённости исходных данных. Таким образом, нагрузки, требования и условия эксплуатации для КОП становятся главными «драйверами» при разработке конструкции:

— высокая поверхностная тепловая нагрузка с большим количеством циклов нагрева и охлаждения в стационарных и нестационарных процессах;

— термоудары при короткоимпульсных нестационарных процессах (краевые моды, срыв тока плазмы, неуправляемые смещения плазмы, убегающие электроны);

— электромагнитные нагрузки при взаимодействии тока плазмы с наведёнными токами в КОП в сценариях вертикального смещения и срыва тока плазмы;

— эрозия материала, обращённого к плазме, при стационарных и нестационарных процессах (тепловая, ионная и химическая эрозия) и поступление примесей в плазму;

- сверхвысокий вакуум внутри разрядной камеры и вода под давлением в каналах охлаждения КОП;
- интенсивный поток высокоэнергетичных нейтронов, воздействующий на материалы конструкции;
- взаимодействие с водородом;
- взаимодействие с активным теплоносителем, начиная с горячей воды под давлением, где со временем возрастает содержание примесей, заканчивая жидким металлом (литий, натрий и др.);
- необходимость замены КОП в процессе эксплуатации токамака, в том числе дистанционной замены в случае большой наведённой радиоактивности внутри разрядной камеры.

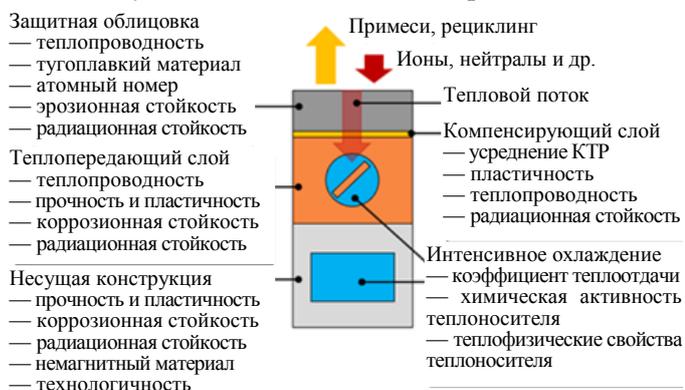


Рис. 1. Многослойная структура КОП

Для эксплуатации в указанных условиях практически невозможно выбрать единый материал для КОП, так как требования к свойствам конструкции оказываются достаточно противоречивыми. Как правило, КОП имеют многослойную композицию из разнородных материалов, где каждый слой выполняет свою определённую функцию (рис. 1).

Отдельно стоит отметить, что проходящая в проекте ИТЭР дискуссия [1] о смене материала облицовки первой стенки (замена Ве на W) с участием международной команды специалистов в оче-

редней раз подчёркивает особую важность выбора материалов для КОП. Далее в статье будут представлены и обоснованы предложения о выборе материалов многослойной структуры КОП для проекта ТРТ.

## ОСОБЕННОСТИ ТРТ

В проекте токамака реакторных технологий (ТРТ) имеется ряд особенностей, оказывающих непосредственное влияние на требования к проектированию КОП. Во-первых, ТРТ почти в 3 раза меньше ИТЭР по размеру, при этом имеет более высокую среднюю тепловую нагрузку на КОП ( $0,2 \text{ МВт/м}^2$  в ТРТ по сравнению с  $0,1 \text{ МВт/м}^2$  в ИТЭР) за счёт планируемой мощности систем дополнительного нагрева до 40 МВт. Величина плотности поглощённой мощности в переходных процессах на диверторной мишени может достигать  $25 \text{ МВт/м}^2$  [2], что также превышает значение для ИТЭР ( $20 \text{ МВт/м}^2$ ). Основные характеристики ТРТ в сравнении с характеристиками других модернизируемых, строящихся и проектируемых в настоящее время токамаков (ИТЭР, DTT, JT-60SA и др.) приведены в статье [3]. Относительная по сравнению с ИТЭР компактность установки ТРТ существенно ограничивает возможности заимствования компоновочных конструктивных решений в части КОП. Например, величина зазора между внутренней стенкой центрального столба вакуумной камеры и сепаратрисой плазмы в установке ТРТ составляет около 150 мм вместо  $\sim 500$  мм в ИТЭР. С учётом заданных габаритов плазмы и вакуумной камеры, а также необходимости сохранения зазора между первой стенкой и сепаратрисой не менее 50 мм для обеспечения возможности управления положением плазмы, свободного пространства на размещение всех внутрикамерных компонентов (ППС, элементов крепления ППС на вакуумную камеру, коллекторов и магистральных трубопроводов подвода воды к ППС, элементов диагностики) остаётся около 100 мм в радиальном направлении. Аналогичная ситуация наблюдается в области диверторного устройства.

Во-вторых, длительность режима поддержания тока плазмы в ТРТ составляет 100 с, при этом планируется использование технологий «увлечения тока» плазмы, что позволит достичь ещё более длительного импульса. С точки зрения теплового состояния КОП такая длительность импульса означает полноценный стационарный режим, требующий стабильного интенсивного охлаждения.

В-третьих, одной из ключевых заявленных особенностей ТРТ является «литиевая первая стенка» [4]. Различные литиевые устройства (инжекторы литиевой пыли, лимитеры на основе заполненной литием капиллярно-пористой системы (КПС) или свободно текущего слоя жидкого лития и др.) уже применялись на токамаках в разных странах, однако полноценная технология «литиевой первой стенки» ещё не реализована нигде. В проекте ТРТ подразумевается частичное и поэтапное внедрение литиевых устройств на разных фазах экспериментальной программы [5]. При этом все компоненты внутри разрядной камеры токамака сразу проектируются допускающими взаимодействие с жидким и/или парообразным литием.

В-четвёртых, в ТРТ не предполагается использовать D—T-реакцию в большей части экспериментальной кампании. Это уменьшает требования к радиационной стойкости материалов и их соединений в КОП, что позволяет использовать освоенные и экспериментально верифицированные решения проекта ИТЭР. При этом отказ от использования новых более радиационно стойких и низкоактивируемых материалов обусловлен не нежеланием их применять, а их неосвоенностью в промышленности. Использование освоенных решений позволит в более короткий период осуществить строительство и начало экспериментов на токамаке, при этом обеспечив возможность дооснащения установки инновационными КОП на разных фазах экспериментальной программы.

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА ЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ

Защитная облицовка КОП — это первая материальная граница, которая воспринимает потоки энергии из плазмы и выполняет две основные функции:

- защита самих КОП от разрушения под действием теплового потока, включая термоудары;
- уменьшение объёма поступления вредных примесей в плазму со стенки.

Требования к материалу защитной облицовки с точки зрения первой функции можно сформулировать следующим образом: высокая теплопроводность, высокая термopрочность, высокая температура плавления и широкий интервал температуры эксплуатации, эрозионная стойкость. С точки зрения второй функции: также высокая эрозионная стойкость, низкий атомный номер  $Z$ , предсказуемое накопление и реэмиссия (в том числе стимулированная в случае необходимости) в материале изотопов водорода. При этом ни один известный материал не может выстоять без повреждений при воздействии длительных стационарных и редких нестационарных короткоимпульсных нагрузок (рис. 2). Поэтому защитная облицовка является жертвенным материалом, требующим периодического обновления.

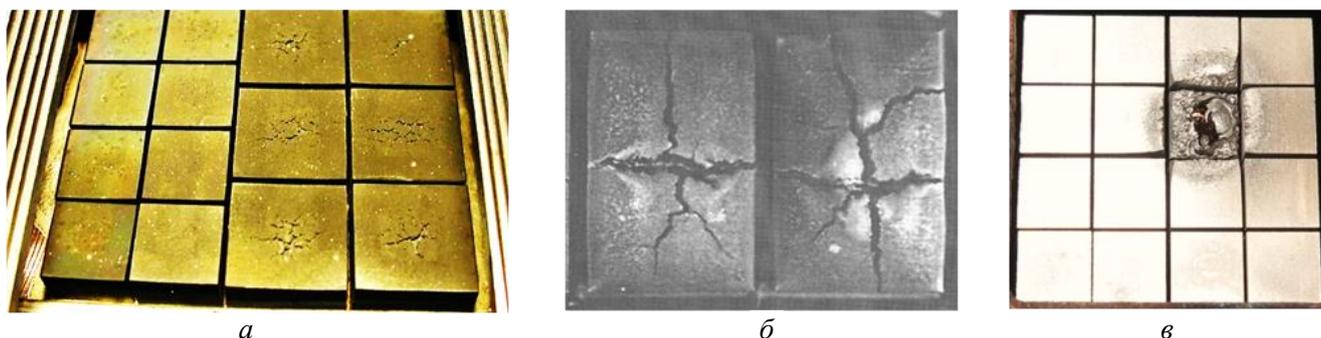


Рис. 2. Повреждения защитной облицовки: *а* — усталостные трещины на поверхности; *б* — «самофрагментация»; *в* — оплавление поверхности

С точки зрения обеспечения указанных функций и возможности обновления материала существуют два подхода к реализации защитной облицовки КОП:

- твёрдотельная массивная облицовка, выполняющая обе функции, толщины которой достаточно для обеспечения экономически целесообразного ресурса до замены;
- сочетание материала массивной облицовки, выполняющей функцию защиты КОП, и плёнки возобновляемого материала, совместимого с плазмой.

Как было отмечено, одна из ключевых особенностей ТРТ — это «литиевая первая стенка». Использование жидкого литья в перспективе может обеспечить возобновляемое покрытие из материала, совместимого с плазмой и способного частично выполнить функцию защиты КОП, решить проблему высокого рециклинга водорода [6] и накопления трития [7]. Жидкометаллические литиевые технологии будут активно испытываться в ходе экспериментальных кампаний в ТРТ, где будут установлены различные экспериментальные модули КОП. Вместе с этим основная часть КОП будет иметь твёрдотельную облицовку. Более масштабное использование литья не предполагается, так как это по соображениям безопасности (взрыв при контакте существенных количеств литья и воды) потребовало бы отказаться от водяного охлаждения всех внутрикамерных компонентов токамака, что при планируемом теплосъёме 40 МВт мощности из плазмы в данном проекте не оправдано.

Основные материалы твёрдотельной защитной облицовки, которые применяются в токамаках по всему миру и рассматриваются в перспективе: графит, вольфрам, молибден и бериллий. В табл. 1 пред-

ставлено сравнение перечисленных материалов с инженерной точки зрения, где зелёным цветом выделены преимущества, а красным — недостатки. При этом только графит и бериллий являются материалами с низким  $Z$ , которые позволяют реализовать подход твердотельной массивной облицовки. Графит в своё время был «отвергнут» международной термоядерной общественностью в проекте ИТЭР по причине высокой скорости эрозии и большому объёму накопления трития в соосаждённых трудноудаляемых плёнках [8]. Отказ от использования бериллия в проекте ИТЭР обсуждается сейчас по причине его низкой температуры плавления и необходимых мер безопасности при эксплуатации. В случае использования для облицовки первой стенки материала с высоким  $Z$ , вероятно, не обойтись без применения возобновляемых покрытий из материалов с низким  $Z$  [9]. Для таких покрытий рассматриваются технологии in-situ нанесения бора, карбида бора ( $B_4C$ ), лития и бериллия. Среди материалов с высоким  $Z$  ( $W$  и  $Mo$ ) предпочтение отдаётся вольфраму по причине более высоких эксплуатационных характеристик, меньшей остаточной наведённой активности и меньшего накопления водорода.

Т а б л и ц а 1. Сравнение материалов твердотельной облицовки КОП

| Параметр                                   | Рассматриваемые материалы             |                                |   |                                      |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------------|
|  | C                                     | W                              | Mo  | Be                                   |
| Атомный номер $Z$                          | 6                                     | 74                             | 42  | 4                                    |
| Теплопроводность, Вт·м/К (300 К)           | >200 (зависит от марки)               | 170                            | 135   | 200                                  |
| Температура плавления/сублимации, К        | 3850—4100                             | 3695                           | 2896  | 1560                                 |
| Ограничение по максимальной температуре, К | —                                     | ~1400 (рекристаллизация)       | ~1200 (рекристаллизация)                    | ~1070 (взаимодействие с парами воды) |
| КЛТР, $\times 10^{-6}$ 1/К (300 К)         | 6                                     | 4,4                            | 5,1   | 11,5                                 |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>               | 1,55—2,0 (зависит от марки)           | 19,3                           | 10,3  | 1,85                                 |
| Влияние нейтронного потока                 | Распухание                            | Охрупчивание                   | Охрупчивание; высокая наведённая активность | Распухание                           |
| Влияние водородной плазмы                  | Химическая эрозия, адсорбция водорода | Блистеринг                     | Блистеринг, скор. диффузии выше, чем в W    | Блистеринг                           |
| Прочие особенности                         | Соосаждённые трудноудаляемые плёнки   | Трудно-обрабатываемый материал | —   | Пыль и аэрозоли Be токсичны          |

Малая величина коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) материала облицовки плохо сочетается с КЛТР материала теплоотводящей подложки, что приводит к росту уровня температурных напряжений в зоне их соединения, снижает ресурс КОП. Для решения данной проблемы используют промежуточный слой, позволяющий «демпфировать» напряжения в зоне соединения. Например, для вольфрамовой облицовки используют слой чистой бескислородной меди толщиной 1—2 мм.

Кроме того, поверхностная циклическая тепловая нагрузка и возникающие температурные напряжения приводят к усталостному разрушению любого из рассматриваемых материалов. Поверхность материала покрывается сеткой трещин, происходит «самофрагментация» — разделение массивного куска материала на отдельные фрагменты, соединённые с подложкой (см. рис. 2). Для увеличения усталостной прочности материала облицовки его делят на отдельные плитки, оптимальный размер которых зависит от материала и способа его изготовления, значения тепловой нагрузки, количества циклов нагружения и других факторов.

Большая объёмная плотность материала облицовки непосредственно сказывается на массе КОП, что имеет значение для ППС, так как усложняет манипуляции с компонентами, процесс их монтажа и крепления на вакуумную камеру.

Принимая во внимание особенности ТРТ, условия его проектирования и сооружения в России, можно дополнительно выделить следующие неочевидные критерии для выбора материала облицовки, не представленные в табл. 1:

— наличие отработанных технологий производства материалов и соединения материалов с подложкой. В России отработаны и поставлены «на поток» технологии производства плиток для вольфрамовой и бериллиевой облицовки КОП ИТЭР, технологии пайки бериллиевой и вольфрамовой облицовки. При этом работы с графитом для применения в интенсивно охлаждаемых КОП давно «заброшены», работы с молибденом не развиты;

— стоимость плиток для облицовки. Стоимость плиток вольфрамовой и бериллиевой облицовки, изготавливаемой для ИТЭР в России, хорошо известна. Так, биметаллическая W/Cu-плитка в 2,5—3 раза дороже плитки Be аналогичного типоразмера. Стоимость плиток из графита или молибдена будет сильно зависеть от выбранной марки материала и пока не оценивалась. Также стоит иметь в виду, что для

проекта ИТЭР в России уже изготовлена 1/3 общего количества бериллиевых плиток, которые можно было бы доработать и использовать для ТРТ в случае утверждения решения ИТЭР о смене материала облицовки ППС и получения соответствующих решений;

— взаимодействие с литием. Вольфрам обладает наиболее высокой коррозионной стойкостью к литию в широком диапазоне температуры, молибден является следующим по стойкости материалом из рассматриваемой выборки [10]. Бериллий с литием ограниченно смешиваются в жидком состоянии при температуре более 1000 °С, оксид бериллия стойкий к литию при температуре до 800 °С [11], что выше ожидаемой температуры облицовки в ТРТ. Графит активно взаимодействует с литием при температуре более 400 °С с образованием карбида лития (хрупкий, взрывоопасен при взаимодействии с парами воды) [12].

Учитывая все представленные аргументы, для проекта ТРТ рассматриваются два варианта выбора материала облицовки КОП с интенсивным охлаждением:

— W в диверторе, Be на первой стенке. Оригинальный (2016 г.) ИТЭР-подобный выбор материалов, минимальный с точки зрения затрат на сооружение. Не требует проработки и создания систем боронизации первой стенки. В случае отказа от бериллия в ИТЭР ТРТ станет единственным в мире энергонапряжённым токамаком с длительным разрядом, где реализован подход твердотельной облицовки с низким Z. Внедрение литиевых устройств не потребует замены;

— W в диверторе и на первой стенке. Новый (обсуждаемый) ИТЭР-подобный выбор материалов. Более дорогостоящий вариант, требующий создания системы боронизации (или другой) на начальной стадии эксплуатации токамака. Внедрение литиевых устройств также не потребует замены. Данный вариант обеспечивает большой запас надёжности при нештатных сценариях.

Как уже отмечено, в России отработаны технологии и вольфрамовой, и бериллиевой облицовки. Переход между данными материалами с точки зрения технологий изготовления КОП может быть осуществлён достаточно безболезненно.

В случае выбора первого варианта (Be на ППС) необходимо обязательно подробно проанализировать следующие аргументы в дискуссии о замене материала облицовки в проекте ИТЭР.

**Безопасная работа с бериллием в токамаке.** Работа с высоковакуумной установкой в любом случае требует соблюдения правил вакуумной гигиены и использования защитной одежды, перчаток и пр. Кроме того, при эксплуатации энергонапряжённого токамака с длительным разрядом в любом случае образуется мелкодисперсная пыль, что потребует применения средств индивидуальной защиты при нахождении внутри камеры. Обеспечение безопасной работы с бериллием не требует дополнительных сверхусилий. В России имеются действующие промышленные предприятия, занимающиеся металлургической переработкой и механической обработкой бериллия, где налажена безопасная работа. Данный опыт можно и нужно использовать в случае выбора бериллия для облицовки КОП.

**Надёжность ППС с бериллиевой облицовкой при двух последовательных событиях.** По итогам последнего анализа для бериллиевой первой стенки ИТЭР после двух последовательных событий (срыв тока плазмы и вертикальное смещение плазмы) может произойти сначала оплавление поверхности бериллиевых плиток с образованием «мостов» между плитками соседних элементов КОП и затем протекание наведённых токов по большей площади поверхности с соответствующим увеличением нагрузок. В конструкции ППС ИТЭР узлы подвода воды к элементам КОП оказываются в месте больших перемещений и разрушаются, что приводит к серьёзной аварии. В данном случае замена материала облицовки на вольфрам позволяет уменьшить площадь оплавления и снизить нагрузки. Однако необходимо отметить, что расположение элементов подвода воды в месте больших перемещений допустимо только в том случае, если они обладают достаточной податливостью, чтобы упруго деформироваться без разрушения. Расположение таких узлов в ППС ИТЭР некорректно с инженерной точки зрения. Конструкция ППС ТРТ сильно отличается от ППС ИТЭР [13], так же как отличаются и параметры ТРТ и ИТЭР [3], поэтому аналогичный анализ при двух последовательных событиях необходимо провести и для ТРТ. Одним из возможных путей увеличения надёжности может стать выбор интерметаллидов бериллия [14] вместо чистого бериллия. В данном случае мы получаем негативные эффекты в виде увеличения Z материала стенки и снижения теплопроводности, но вместе с этим увеличение температуры плавления и уменьшение распухания под облучением (с учётом перспектив ДЕМО).

## МНОГОСЛОЙНАЯ ТЕПЛОТВОДЯЩАЯ СТРУКТУРА

Электромагнитные (ЭМ) нагрузки и термоциклика являются главными факторами, ограничивающими ресурс работы многослойной теплоотводящей структуры КОП. Для снижения ЭМ-нагрузок теплоотводящая структура КОП состоит из отдельных обращённых к плазме элементов (ОПЭ), разделён-

ных вакуумным зазором не менее 1 мм (рис. 3). Это позволяет уменьшить площадь поверхности протекания наведённых токов и уменьшить значения ЭМ-нагрузок [13]. Как упоминалось, оплавление материала облицовки с замыканием зазоров между ОПЭ приводит к росту ЭМ-нагрузок.

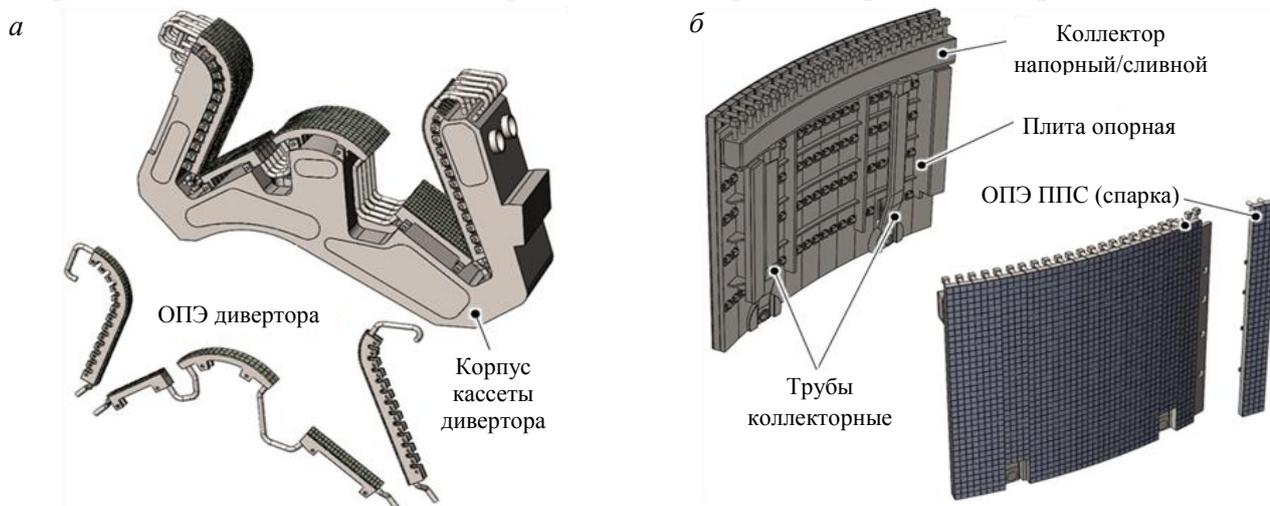


Рис. 3. КОП ТРТ: а — дивертор кассетного типа; б — ППС

Для снижения температурных напряжений в многослойной конструкции ОПЭ необходимо, во-первых, стремиться к использованию материалов с близкими значениями КЛТР, во-вторых, использовать материалы с высоким значением теплопроводности для уменьшения градиента температуры, в-третьих, повышать интенсивность теплообмена, уменьшая значения температуры в конструкции. Для мишеней дивертора, где непосредственно происходит облучение потоком плазмы, для снижения значения поглощённого теплового потока все мишени располагаются под острым углом к направлению движения плазменного пучка. Кроме того, все мишени повернуты относительно своей средней плоскости таким образом, чтобы прикрыть боковые поверхности облицовки соседних мишеней (рис. 4).

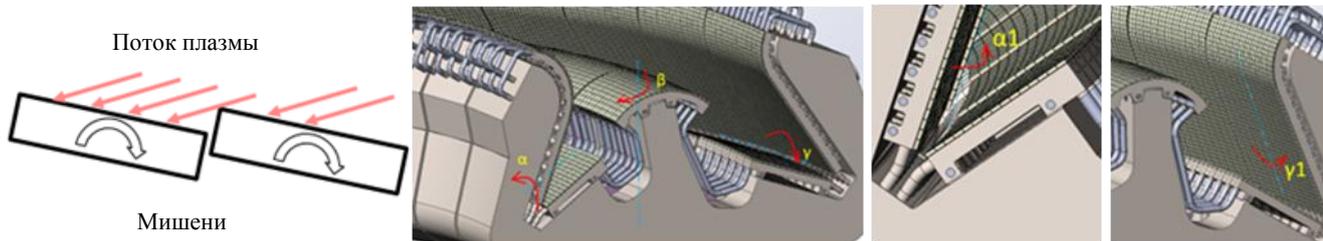


Рис. 4. Наклон мишеней дивертора ТРТ

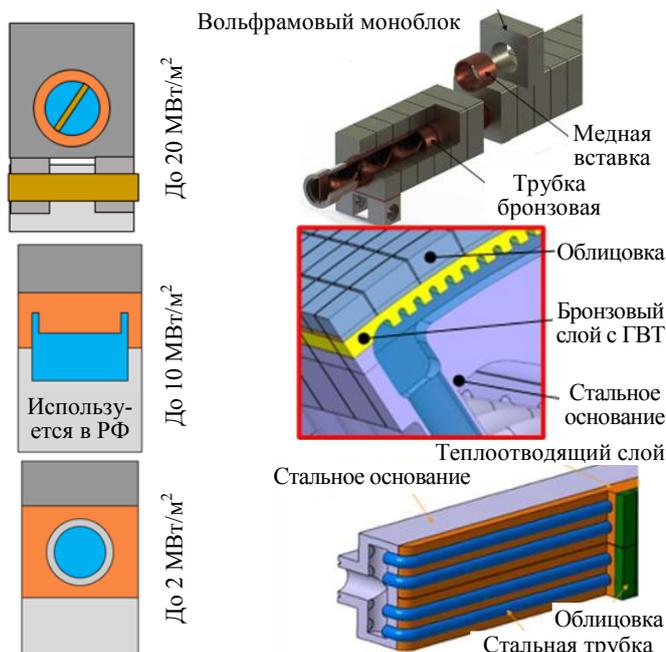


Рис. 5. Конструкция теплоотводящих структур ОПЭ в ИТЭР

В проекте ИТЭР разработаны конструктивные исполнения теплоотводящей структуры ОПЭ для разных значений тепловой нагрузки (рис. 5). Для наиболее нагруженной области вертикальных мишеней дивертора ИТЭР (до 20 МВт/м<sup>2</sup>) используется конструкция в виде вольфрамовых моноблоков, насаженных на бронзовую трубку, по которой течёт вода [15]. Для интенсификации теплообмена внутрь трубки устанавливается скрученная лента. Для средних значений тепловой нагрузки (до 10 МВт/м<sup>2</sup>) используется конструкция с плоскими плитками, присоединёнными на поверхность ОПЭ корпусного типа. Для интенсификации теплообмена используется канал типа гипервапотрон [16]. Именно данного типа ОПЭ изготавливаются в России для проекта ИТЭР. Для наименее нагруженных КОП (до 2 МВт/м<sup>2</sup>) используется конструкция ОПЭ с плоскими плитками, но со стальным трубчатым каналом охлаждения.

Для проекта ТРТ, где тепловые нагрузки достигают 25 МВт/м<sup>2</sup> в диверторе и 4 МВт/м<sup>2</sup> на ППС, принято решение отказаться от моноблочной конструкции ОПЭ, а также канала охлаждения типа гипервапотрон как дорогих и трудоёмких решений. Для ОПЭ ТРТ используется конструкция с плоскими плитками и корпусом ОПЭ прямоугольного сечения и круглым каналом охлаждения. В наиболее нагруженных ОПЭ вертикальных мишеней дивертора используется интенсификатор теплообмена — скрученная лента [17]. Учитывая высокий уровень предполагаемой тепловой нагрузки в диверторе, обойтись в конструкции без использования медных сплавов не удаётся. Для ОПЭ первой стенки использование медных сплавов также позволяет обеспечить длительный ресурс эксплуатации при умеренно высоких тепловых нагрузках. В свою очередь, для защиты открытых медных поверхностей от взаимодействия с жидким и/или парообразным литием планируется их плакировать слоем более коррозионно-стойкой нержавеющей стали [10]. А на тех участках конструкции, где такой способ защиты труднореализуем, планируется использовать одно-/многослойные коррозионно-стойкие покрытия. В ОПЭ первой стенки для повышения надёжности и снижения риска аварии в результате прорыва канала охлаждения с последующим взаимодействием паров воды с литием или горячим бериллием используется канал охлаждения, выполненный из стальной трубы. Учитывая всё сказанное, разработана конструкция ОПЭ дивертора и первой стенки ТРТ (рис. 6). Для изготовления облицовки и теплоотводящей структуры планируется использовать материалы отечественного производства (табл. 2). Для облицовки первой стенки на рис. 6 указан Ве, при выборе W будет использована аналогичная W/Cu-плитка, как показано для ОПЭ дивертора.

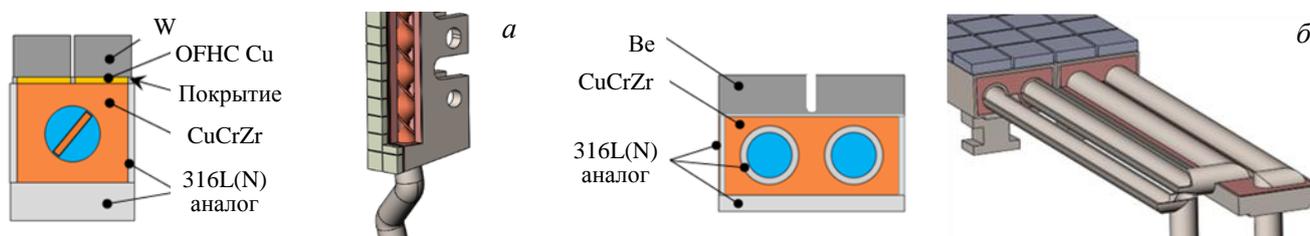


Рис. 6. Многослойная структура ОПЭ ТРТ: а — дивертора; б — первой стенки

Т а б л и ц а 2. Химический состав материалов ОПЭ

| Элемент              | Марка /сплав                   | Базовые элементы сплава и примеси (вес. %) |         |          |           |       |                    |           |           |                   |           |                 |       |       |       |       |      |
|----------------------|--------------------------------|--|---------|----------|-----------|-------|--------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|------|
|                      |                                | Ве   | ВеО     | Al       | С         | Fe    | Mg                 | Si        | U         | Другие элемент-ты |           |                 |       |       |       |       |      |
| Облицовка            | ТГП-56ПС                       | Основной                                   | < 1,0   | <0,06    | <0,10     | <0,08 | <0,06              | <0,06     | <0,003    | <0,04             |           |                 |       |       |       |       |      |
|                      |                                | W  | Fe      | Al       | Ni        | Si    | C                  | O         | N         |                   |           |                 |       |       |       |       |      |
|                      | Основной (99,95)               | <0,08                                      | <0,05   | <0,05    | <0,05     | <0,05 | <0,05              | < 0,1     | <0,1      |                   |           |                 |       |       |       |       |      |
| Промежуточный слой   | М06                            | Cu   |         | O        |           | Fe    |                    | Ni        |           | Ag                |           | S               |       |       |       |       |      |
|                      |                                | Основной (99,99)                           | <0,0005 |          | <0,001    |       | <0,001             |           | <0,0025   |                   | <0,0015   |                 |       |       |       |       |      |
| Тепло-отводящий слой | БрХЦр                          | Cu   |         | Cr       |           | Zr    |                    | O         |           | Другие элементы   |           | Всего др. эл-ов |       |       |       |       |      |
|                      |                                | Основной                                   | 0,6—0,9 |          | 0,07—0,15 |       | Максимально низкое |           | Co < 0,05 |                   | <0,1      |                 |       |       |       |       |      |
| Основание            | 316L(N)<br>(российский аналог) | Fe   | C       | Mn       | Si        | P     | S                  | Cr        | Ni        | Mo                | N         | Cu              | B     | Co    | Nb    | Ta    | Ti   |
|                      |                                | Основной                                   | 0,030   | 1,6—2,00 | 0,50      | 0,025 | 0,010              | 17,0—18,0 | 12,0—12,5 | 2,30—2,70         | 0,06—0,08 | 0,30            | 0,002 | 0,050 | 0,010 | 0,010 | 0,10 |

Параметры системы охлаждения для ОПЭ ТРТ, включая сечение канала, толщины разных элементов конструкции и параметры теплоносителя подобраны на основании теплогидравлического расчёта, где главные критерии для оптимизации следующие:

- коэффициент запаса до кризиса теплообмена 1-го рода при пиковых нагрузках не менее 1,4;
- максимальная температура поверхности W при стационарных пиковых нагрузках не более 1100 °С (ниже температуры рекристаллизации);
- максимальная температура поверхности Ве при стационарных пиковых нагрузках не более 680 °С средняя и не более 800 °С на локальных участках (с точки зрения безопасности при попадании паров воды).

Для ОПЭ ТРТ выбраны следующие параметры теплоносителя: входная температура не более 50 °С; давление на входе 4 МПа для дивертора и 3 МПа для первой стенки; скорость в канале охлаждения 9—11,4 м/с для разных мишеней дивертора и ~4,5 м/с для первой стенки. Толщина облицовки в настоящее

время составляет 4 мм (W и Be) и будет оптимизироваться в дальнейшем при необходимости. На рис. 7 и 8 показаны результаты расчёта температурного состояния в поперечном сечении ОПЭ для пиковых стационарных и нестационарных нагрузок. При переходном процессе в диверторе ( $25 \text{ МВт/м}^2$ , 10 с) максимальная температура всех материалов многослойной конструкции превышает рекомендуемые значения, поэтому допустимы только редкие переходные процессы (не более 300 циклов).

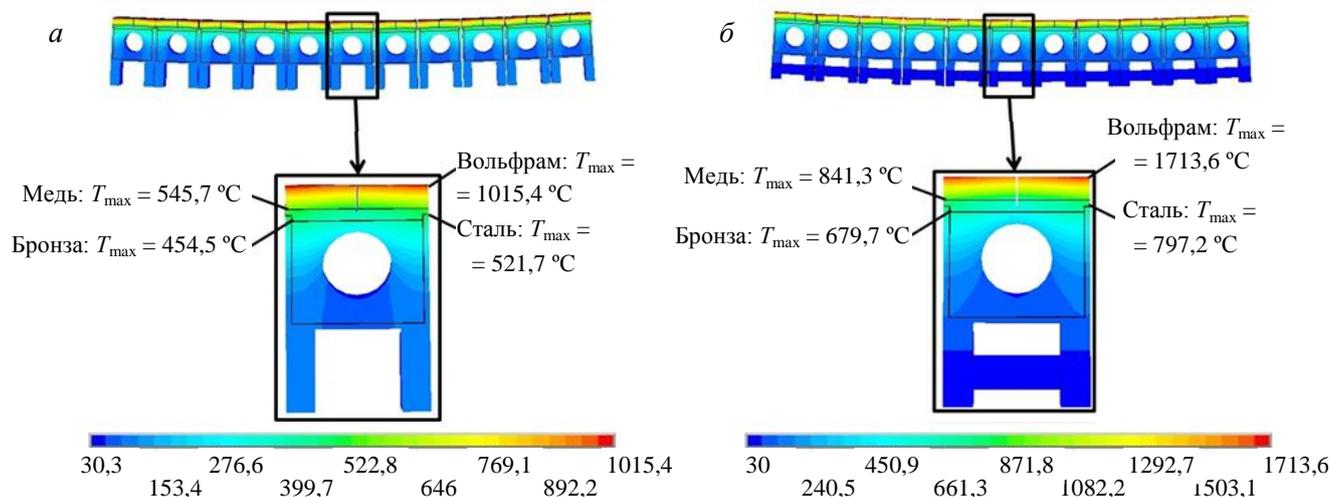


Рис. 7. Температурное состояние ОПЭ наружной вертикальной мишени дивертора при пиковых нагрузках: *a* — стационарной; *б* — нестационарной

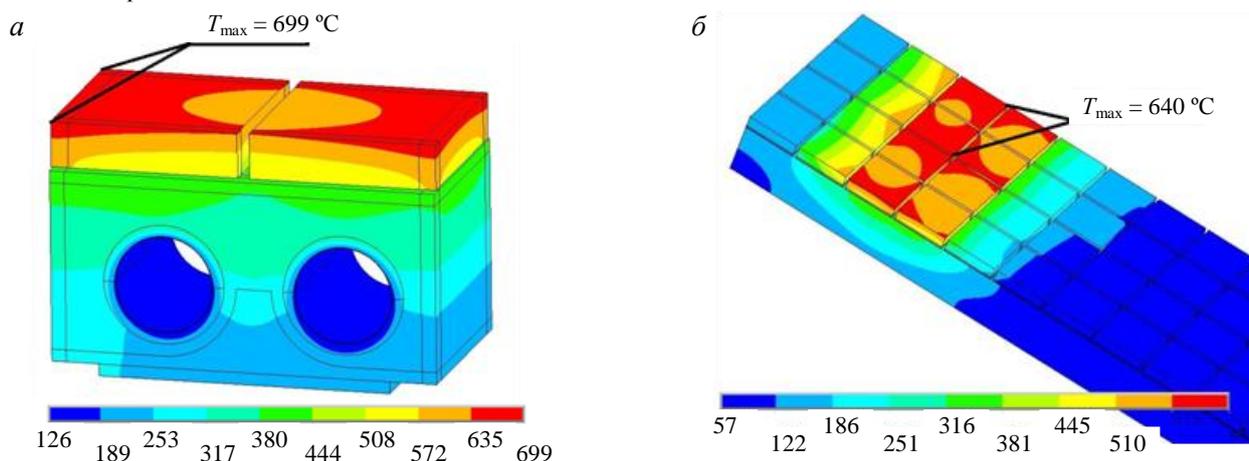


Рис. 8. Температурное состояние ОПЭ ППС при пиковой стационарной нагрузке: *a* — в сечении ОПЭ; *б* — на поверхности

Разработанные теплоотводящие конструкции должны обеспечивать необходимую усталостную прочность при термоциклических нагрузках. Вследствие сложности получения достоверного результата только методом численного моделирования для разработки теплоотводящих конструкций также используется экспериментальный метод (design by experiment). Он заключается в отработке конструкторско-технологических решений на малых макетах, отражающих реальную конструкцию. В процессе изготовления и испытаний макетов определяются в том числе размеры плиток облицовки, допустимый размер несплошностей в паяном соединении, тестируются конкретные параметры теплоотводящей структуры и различные варианты технологии изготовления. Изготовление и испытания макетов — следующий важный и необходимый шаг при разработке КОП ТРТ.

Для создания многослойной конструкции выбраны проверенные в проекте ИТЭР технологии соединения материалов. Плитки защитной облицовки присоединяются на поверхность теплоотводящего слоя основания ОПЭ методом высокотемпературной пайки [18, 19]. В отличие от проекта ИТЭР используются новые припои, стойкие к литию. Важной особенностью метода пайки облицовки является возможность выполнения при изготовлении выборочного ремонта дефектных плиток [20]. Соединение W с медным слоем, используемым для компенсации разности температурных расширений, выполняется ме-

тодом наплавки меди в вакууме. Для получения биметаллического соединения бронзы со сталью рассматриваются диффузионная сварка горячим изостатическим прессованием [21] и вакуумная наплавка (вакуумное литьё) [22].

В условиях термоциклических нагрузок все сварные соединения многослойной конструкции ОПЭ на границе раздела вода—вакуум должны сохранять герметичность, а паяные соединения облицовки сохранять надёжный тепловой контакт. Важным этапом подтверждения качества используемых технологий соединения материалов является аттестация (с участием внешней контролирующей организации) или внутренняя квалификация (где не применима аттестация) технологий, заключающиеся в изготовлении, контроле и испытаниях малых макетов в заданном количестве для подтверждения повторяемости результатов. В рамках программы внутренней квалификации качество соединений подтверждается методами неразрушающего контроля (капиллярного, визуального, рентгенографического, ультразвукового), разрушающего контроля (металлография, механические испытания), а также имитационных испытаний (гидравлических, термоциклических [23], вакуумных с контролем герметичности). Аттестация и квалификация технологий — один из важнейших этапов подготовки производства в обеспечение качества будущих изделий.

### НЕСУЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ, КОМПОНОВКА ДИВЕРТОРА И ПЕРВОЙ СТЕНКИ

Несущая или опорная конструкция обеспечивает сопряжение всех элементов панели/кассеты в единое изделие (см. рис. 3) и воспринимает основные механические нагрузки от ЭМ-сил и моментов, от веса изделия. Также за счёт встроенных коллекторов несущая конструкция обеспечивает подачу и сбор воды от комплекта ОПЭ, установленного на ней (рис. 9).

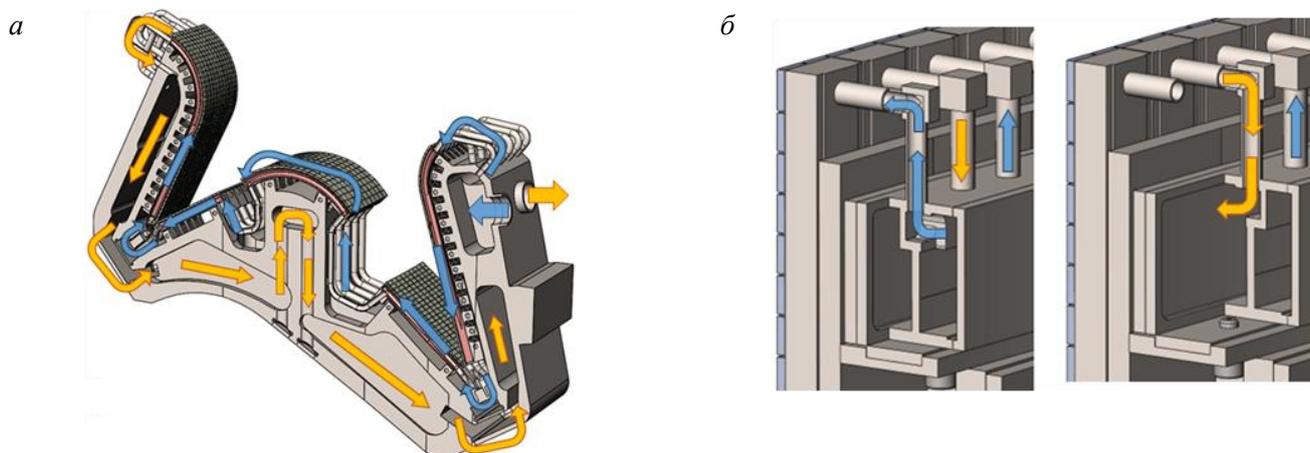


Рис. 9. Разводка воды в кассете дивертора (а) и в коллекторе ППС (б):  $\leftarrow$  — прямой поток;  $\rightarrow$  — обратный поток

Несущая конструкция также обеспечивает крепление кассет дивертора и ППС внутри вакуумной камеры и сопряжение с другими внутрикамерными компонентами (трубопроводы, элементы диагностики и дополнительного нагрева и др.).

Кассеты дивертора устанавливаются внизу вакуумной камеры в тороидальный пояс с зазором 20 мм между соседними кассетами (рис. 10). Для лучшей откачки газа из диверторной области в корпусе кассеты дивертора имеется окно.

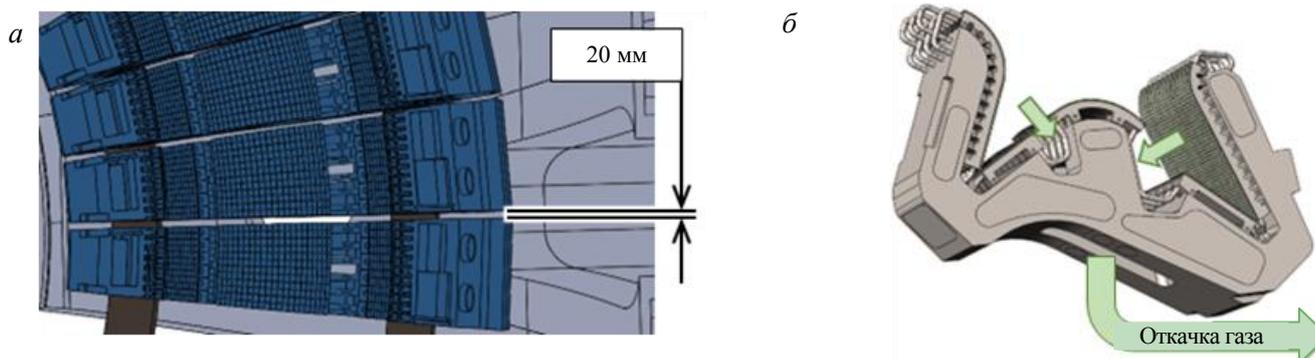


Рис. 10. Кассета дивертора: а — зазор между соседними кассетами; б — окно для откачки газа

В каждом 90-градусном секторе вакуумной камеры установлено по 13 кассет дивертора. Таким образом, общее количество кассет составляет 52. Один нижний диверторный патрубок в каждом секторе используется для загрузки кассет, два соседних патрубка — для размещения магистральных трубопроводов тороидальных коллекторов, каждый из которых питает четыре кассеты дивертора (рис. 11). Центральная «замковая» кассета в 90-градусном секторе располагается строго посередине загрузочного патрубка и устанавливается в последнюю очередь.

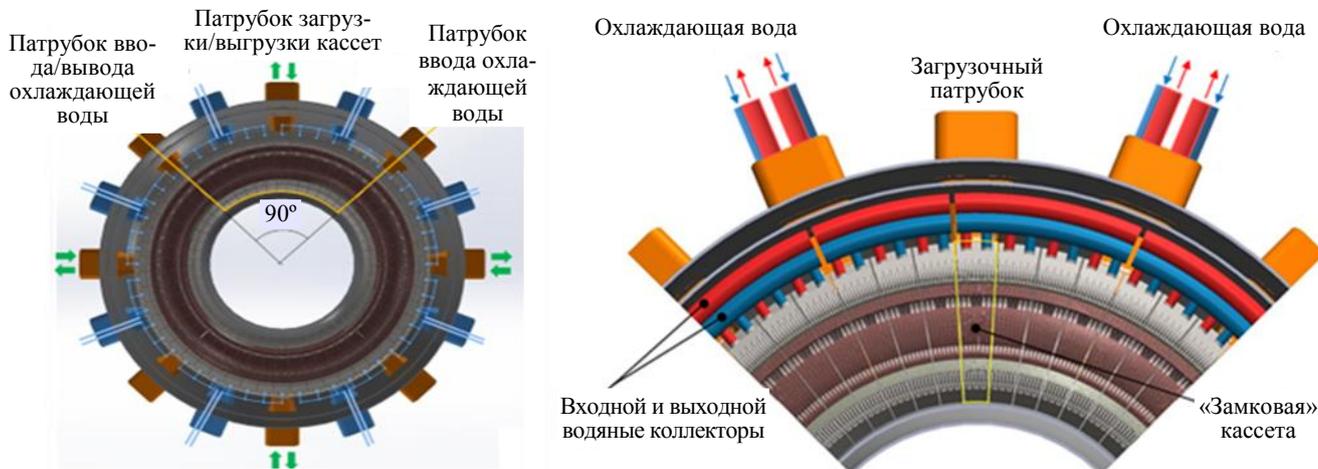


Рис. 11. Размещение кассет дивертора в 90-градусном секторе вакуумной камеры

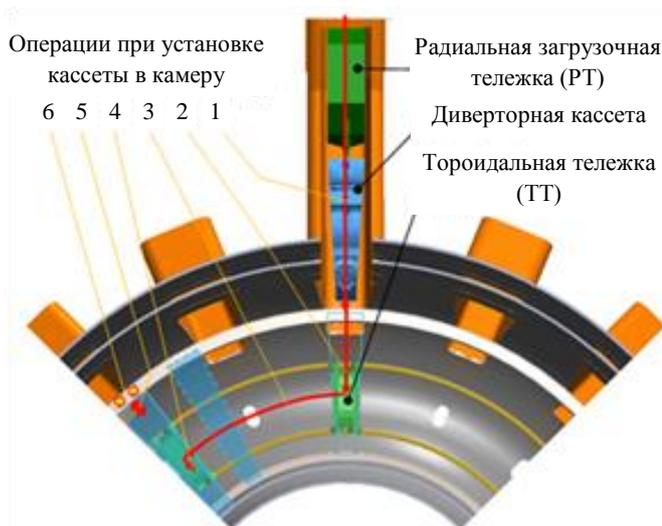


Рис. 12. Операции при установке кассеты в вакуумную камеру

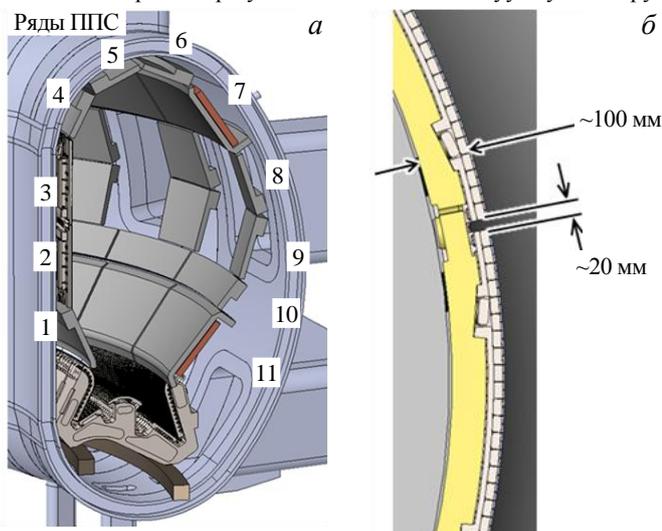


Рис. 13. Ряды панелей первой стенки (а) и тороидальное сечение (б)

Загрузку и монтаж кассет дивертора предполагается выполнять аналогично принятой в проекте ИТЭР схеме с использованием роботизированных (или механизированных при участии человека) транспортных тележек: радиальной (РТ) и тороидальной (ТТ). Последовательность операций при загрузке кассеты следующая (рис. 12):

1. Транспортировка диверторной кассеты с помощью РТ вдоль диверторного патрубка;
2. Установка кассеты на ТТ;
3. Тороидальное перемещение кассеты к месту её установки;
4. Установка кассеты в крепления при помощи манипуляторов ТТ;
5. Сжатие (преднатяг) кассеты в креплениях в радиальном направлении для придания ей большей устойчивости под воздействием электромагнитных сил;
6. Приварка труб водяного охлаждения к водяным патрубкам кассеты.

ППС располагаются в вакуумной камере в 11 полоидально-ориентированных рядах и имеют более 20 модификаций в зависимости от ряда, сопряжения с патрубками, системами диагностики, дополнительного нагрева и прочими внутрикамерными устройствами (рис. 13). Зазор между соседними панелями составляет 20 мм. Максимальный размер панели составляет около 700×800 мм, толщина первой стенки в радиальном направлении не превышает 100 мм, максимальный вес панели около 140 кг.

Панели устанавливаются на внутренние стенки вакуумной камеры, фиксируются специальными крепёжными блоками, установленными в боковом зазоре между двумя соседними в тороидальном направлении панелями, и привариваются к патрубкам тороидальных коллекторов, предварительно смонтированных в камере (рис. 14). После сварки с напорным и сливным коллекторами на каждой панели выполняется финальная сварка двух заглушек. Для загрузки панелей в вакуумную камеру планируется использовать не менее трёх экваториальных патрубков, располагающихся под углом 120 градусов относительно друг друга. Через данные патрубки планируется монтировать специальное монтажное приспособление и загрузочную платформу.

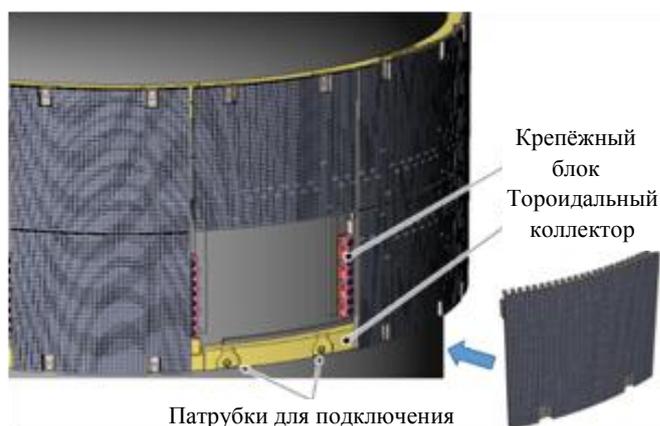


Рис. 14. Крепление панелей первой стенки

## ПОЭТАПНОЕ ОСНАЩЕНИЕ ТРТ КОМПОНЕНТАМИ, ОБРАЩЁННЫМИ К ПЛАЗМЕ

Оснащение любого современного токамака комплектом КОП происходит поэтапно совместно с дооснащением новыми системами дополнительного нагрева и развитием экспериментальной программы. Показателен пример токамака EAST [24]. Для проекта ТРТ предлагается трёхэтапный подход при оснащении установки КОП.

На первом этапе при сооружении и вводе в эксплуатацию токамака предлагается использовать комплект неохлаждаемых (теплоаккумулирующих) пластин, установленных в области дивертора (вертикальные мишени), а также ориентировочно в области рядов первой стенки № 2, 3, 5, 6, 7, 11 (см. рис. 13). Оптимальным материалом для неохлаждаемых пластин является графит, обладающий максимальными эксплуатационными температурами и низким  $Z$ , однако это приведёт к загрязнению всей вакуумной камеры продуктами эрозии графита. Альтернативный материал для пластин — это вольфрам. Неохлаждаемые пластины фиксируются при помощи механического крепления (болтового или др.) на стальные кронштейны, которые монтируются на стенки вакуумной камеры. Первый этап заканчивается при переходе ТРТ к эксплуатации на большой мощности ( $>20$  МВт) и увеличенной ( $>30$  с) длительности разряда. На данном этапе будут опробованы другие альтернативные материалы поверхности облицовки в виде толстых плиток или защитных покрытий (0,1—100 мкм) на плитках графита или вольфрама.

На втором этапе предлагается установить комплект КОП с интенсивным водяным охлаждением, позволяющий эксплуатировать ТРТ с длительным импульсом при максимальной мощности дополнительного нагрева. Данный комплект КОП подробно описан в этой статье. Для демонтажа неохлаждаемого комплекта КОП и монтажа нового потребуется остановка ТРТ на срок не менее одного года. Наибольшую длительность ожидаемо займёт выполнение качественных сварных швов внутри вакуумной камеры и юстировка положения кассет дивертора и ППС относительно фактического положения магнитного поля, в том числе с учётом результатов, полученных на фазе использования теплоаккумулирующих пластин. Для повышения эффективности указанных операций, во-первых, предлагается постепенное выполнение сварки и контроля швов для группы КОП, подключаемых параллельно к одному коллектору. Перед выполнением контроля будет проводиться вакуумный отжиг внутри камеры ТРТ. Во-вторых, предлагается заранее выполнить юстировку положения КОП в программном обеспечении и подобрать требуемые размеры компенсаторов на основании фактических замеров вакуумной камеры и положения магнитного поля. Также на втором этапе предлагается установить систему инъекции лития внутрь камеры в процессе рабочего импульса, тем самым начав литиевую программу ТРТ.

На третьем этапе предполагается постепенное введение в конструкцию ТРТ экспериментальных устройств, как литиевых [5, 6], так и инновационных твердотельных устройств с концепцией подвижной и легкоосменной облицовки [3]. Комплект КОП с интенсивным охлаждением проектируется совместимым с жидким и/или парообразным литием, поэтому введение литиевых устройств не потребует модер-

низации или замены всего окружения внутри вакуумной камеры. Для установки литиевых и инновационных твердотельных устройств планируется использовать экваториальные патрубки вакуумной камеры, а также предполагается установка экспериментальной кассеты (или нескольких кассет) дивертора в единый диверторный пояс вместе с ранее установленными кассетами дивертора с вольфрамовой неподвижной облицовкой.

## REFERENCES

1. The beryllium armour of the ITER reactor is planned to replace by tungsten one. Press-center NRNU MEPhI, 04.10.2023; URL: <https://www.mephi.ru/press/news/21494> (in Russian).
2. **Kukushkin A.S., Pshenov A.A.** Performance of the conventional divertor in TRT. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2021, vol. 47, № 12, pp. 1123—1129 (in Russian).
3. **Mazul I.V., Giniyatulin R.N., Kavin A.A., Litunovsky N.V., Makhankov A.N., Piskarev P.Yu., Tanchuk V.N.** Plasma-facing components of the TRT tokamak. — In the same place, pp. 1103—1122 (in Russian).
4. **Krasilnikov A.V., Kononov 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. et al.** Tokamak with reactor technologies (TRT) : concept, missions, main features and expected characteristics. — In the same place, № 11, pp. 970—985 (in Russian).
5. **Vertkov A.V. et al.** Comparative analysis of lithium first wall concepts for tokamak with reactor technologies. — In the same place, № 12, pp. 1130—1145 (in Russian).
6. **Zakharov L.E.** On a burning plasma low recycling regime with PDT = 23—26 MW, QDT = 5—7 in a JET-like tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 096008; doi 10.1088/1741-4326/ab246b.
7. **Charuau J., Yves Belot, Cetier Ph., Drezet L., Grivaud L., Peacock A.T., Wu C.H.** Characterisation of erosion dust and tritiated products inside the JET vessel after the first tritium experiment. — *Fusion Technology*, 1992 (Proceedings of the 17th Symposium on Fusion Technology. Rome, Italy), pp. 1700—1703.
8. **Andrew P. et al.** Tritium retention and clean-up in JET. — *Fusion Eng. and Des.*, 1999, vol. 47, pp. 233—245.
9. **Begrambekov L.B., Buzhinskij O.I.** Boron carbide properties and application as armour on tokamak first wall. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2006, issue 4, pp. 14—20 (in Russian).
10. **Mikhailov V.N., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E. et al.** Lithium in fusion and space energetics of XXI century. — M.: Energoatomizdat, 1999. 526 p. (in Russian).
11. **Khalimova M.I.** Interaction of beryllium with elements from periodic table and development of alloys with its participation. Dissertation for scientific degree of the cand. of chemical sciences: 02.00.04. V.I.Nikitin Institute of chemistry AS of Republic of Tadjikistan, Dushanbe, 2015. 121 p. (in Russian).
12. **Khaskov M.A.** Reactions of implementation and carbide formation in systems graphite-lithium and fullerite (C60; C70)—lithium. Dissertation for scientific degree of the cand. of chemical sciences: 02.00.01. M.V Lomonosov Moscow State University, Chem. fac., Moscow, 2008. 208 p. (in Russian).
13. **Piskarev P.Yu., Mazul I.V., Gaponok E.I., Belov A.V. et al.** Electromagnetic analysis for the design options of the tokamak TRT first wall panel and its optimization based on the results the plasma VDE event calculation. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2022, vol. 45, issue 4, pp. 45—55 (in Russian).
14. **Frants Ye., Borsuk A., Vechkutov A. et al.** Beryllium intermetallics: Industrial experience on development and manufacture. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 35, p. 101444.
15. **Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S., Kukushkin A.S., Loarte A., Merola M., Sashala Naik A., Mitteau R., Sugihara M., Bazylev B., Stangeby P.C.** A full tungsten divertor for ITER: physics issues and design status. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 438, pp. 48—56.
16. **Escourbiac F., Bobin-Vastra I., Kuznetsov V., Missirlian M., Schedler B., Schlosser J.** A mature industrial solution for ITER divertor plasma facing components: HyperVapotron cooling concept adapted to Tore Supra flat tile technology. — *Fusion Eng. and Des.*, 2005, vol. 75—79, pp. 387—390.
17. **Makhankov A., Barabash V. et al.** Investigation of cascade effect failure for tungsten armour. — *Ibid.*, 2001, vol. 56—57, pp. 337—342.
18. **Litunovsky N., Alekseenko E., Makhankov A., Mazul I.** Development of the armoring technique for ITER Divertor Dome. — *Ibid.*, 2011, vol. 86, pp. 1749—1752.
19. **Gervash A.A., Giniyatulin R.N., Guryeva T.M., Glazunov D.A., Kuznetsov V.E., Mazul I.V., Ogursky A.Y., Piskarev P.Y., Safronov V.M., Eaton R., Raffray R., Sevryukov O.N.** The development of technology of Be/CuCrZr joining using induction brazing. — *Ibid.*, 2019, vol. 146, pp. 2292—2296.
20. **Litunovsky N., Alekseenko E., Kuznetsov V., Lyanzberg D., Makhankov A., Rulev R.** Repair of manufacturing defects in the armor of plasma facing units of the ITER Divertor Dome. — *Ibid.*, 2013, vol. 88, pp. 1739—1743.
21. **Gervash A.A., Glazunov D.A., Lyanzberg D.V., Mazul I.V., Ogursky A.Y., Piskarev P.Y., Ruzanov V.V.** Refinement of the technology of hot isostatic pressing of vacuum-tight bimetallic joint of ITER in-Vessel components, — In: *Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power: Collection of Papers of V International Scientific and Technical Conference*. — Moscow: Publishing House of JSC «NIKIET», 2018, pp. 2428—2434.
22. **Gervash A., Mazul I., Yablokov N.** Study of Alternative SS/Cu-Alloy Joining Methods for ITER. — *Fusion Eng. and Des.*, 2001, vol. 56—57, pp. 381—384.

23. **Volodin A., Kuznetsov V., Davydov V., Kokoulin A., Komarov A., Mazul I., Mudyugin B., Ovchinnikov I., Stepanov N., Rulev R., Eremkin A., Rogov A., Priyanikov V., Fedosov A.** The high-heat-flux test facilities in the Joint Stock Company D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus. — *Fusion Eng. and Des.*, 2015, vol. 98—99, pp. 1411—1414.
24. **Luo G.-N. et al.** Overview of plasma-facing materials and components for EAST. — *Physica Scripta*, 2007, vol. T128, pp. 1—6.

#### AUTHORS

**Piskarev P.Yu.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; piskarev@sintez.niiefa.spb.su

**Mazul I.V.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; mazul@sintez.niiefa.spb.su

**Makhankov A.N.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; makh@sintez.niiefa.spb.su

**Kolesnik M.S.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; kolesnik@sintez.niiefa.spb.su

**Okuneva E.V.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; okuneva@sintez.niiefa.spb.su

**Litunovsky N.V.** JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia;

Received 24 October 2023

Revised 9 January 2024

Accepted 17 January 2024

*Problems of Atomic Science and Technology*  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47, issue 1, pp. 41—53