

УДК 621.039.63

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ТРТ И ЕЁ ОПТИМИЗАЦИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЁТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ДЛЯ СЦЕНАРИЯ VDE ВНИЗ

П.Ю. Пискарев¹, И.В. Мазуль¹, Е.И. Гапионко¹, А.В. Белов¹, А.Н. Маханьков¹, Е.В. Окунева¹,
М.С. Колесник¹, И.В. Кедров¹, А.А. Гержаиш¹, А.А. Кавин¹, В.Э. Лукаш², Р.Р. Хайрутдинов²

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В статье представлены основные результаты численного моделирования переходных электромагнитных процессов в модулях первого и второго рядов панелей первой стенки ТРТ. Исследование проводилось с использованием комплекса программ TYPHOON, предназначенного для численного моделирования квазистационарных вихревых токов в проводящих оболочках сложной формы, расположенных в пространстве произвольным образом с учётом их многосвязности и ветвлений. Рассмотрены базовая конструкция панели первой стенки и пять её модификаций. Определено, что электромагнитные силы и моменты для базового варианта достигают экстремальных значений, а наиболее нагруженными являются крайние элементы панели. Варианты с введением электрической изоляции в местах контакта обращённых к плазме элементов и основания панели, а также введение шунта между соседними панелями позволяют добиться наиболее заметного снижения нагрузок. Данные варианты приняты базовыми для дальнейшей модификации конструкции панели и проведения дополнительного ЭМ-анализа.

Ключевые слова: токамак реакторных технологий, первая стенка, обращённый к плазме элемент, вакуумная камера, переходные электромагнитные процессы, электромагнитные нагрузки, срыв тока плазмы, вычислительные модели.

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

P.Yu. Piskarev¹, I.V. Mazul¹, E.I. Gaponok¹, A.V. Belov¹, A.N. Makhankov¹, E.V. Okuneva¹, M.S. Kolesnik¹,
I.V. Kedrov¹, A.A. Gervash¹, A.A. Kavin¹, V.E. Lukash², R.R. Khayrutdinov²

¹JSC «NIEFA», Saint-Petersburg, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The main results of numerical simulation of transient electromagnetic processes in the modules of the first and second rows of TRT first wall panels are presented. The study was carried out using the TYPHOON software designed for numerical simulation of quasi-stationary eddy currents in conducting shells of complex shape randomly located in space, taking into account their multicoupling and branching. The basic design of the first wall panel and its five modifications are considered. It is determined that the electromagnetic forces and moments for the base design reach extreme values, and the edge elements of the panel are the most loaded. Options with the addition of electrical insulation at the areas of contact of the plasma facing elements and the base of the panel, as well as the addition of a bypass between adjacent panels, make it possible to achieve the strongest reduction in loads. These options are accepted as basic for further modification of the panel design and additional EM analysis.

Key words: tokamak of reactor technology, first wall, plasma facing unit, vacuum vessel, transient electromagnetic processes, electromagnetic loads, plasma disruption, calculation models.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-45-55

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». Кроме тепловой нагрузки, достигающей значений плотности поглощённой мощности до 5 МВт/м² для ППС и до 20 МВт/м² для дивертора [1], на работоспособность и ресурс при эксплуатации КОП оказывают значительное влияние электромагнитные нагрузки, возникающие вследствие взаимодействия плазмы с КОП при нештатных режимах работы токамака (срывах тока плазмы) и приводящие к большим механическим напряжениям в конструкции. Величина механических напряжений зависит от параметров плазмы установки в момент пробоя и конструкции КОП (состав и соотношение основных материалов, расположение элементов конструкции и условия их сопряжения,

жёсткость конструкции и др.). Основным способом снижения величины механических напряжений, возникающих вследствие электромагнитных нагрузок, является оптимизация конструкции КОП. В проекте ИТЭР объединённой международной командой физиков и инженеров найдено решение, позволяющее обеспечить требуемый ресурс работы КОП [1]. В частности, конструкция высоконагруженных ППС ИТЭР представляет собой (рис. 1, б) массивное стальное основание и набор обращённых к плазме элементов (ОПЭ), установленных на этом основании с зазором 1,4 мм между собой и возможностью их независимого термического расширения под действием локальных тепловых нагрузок. Основание опирается на восемь регулируемых сферических подкладок, имеющих электроизоляционное покрытие, зафиксировано массивным центральным болтом из высокопрочного никелевого сплава. Центральный болт сопряжён с массивным стальным основанием через электроизоляционную проставку, хороший электрический контакт основания с опорой обеспечивается двумя медными шунтами.

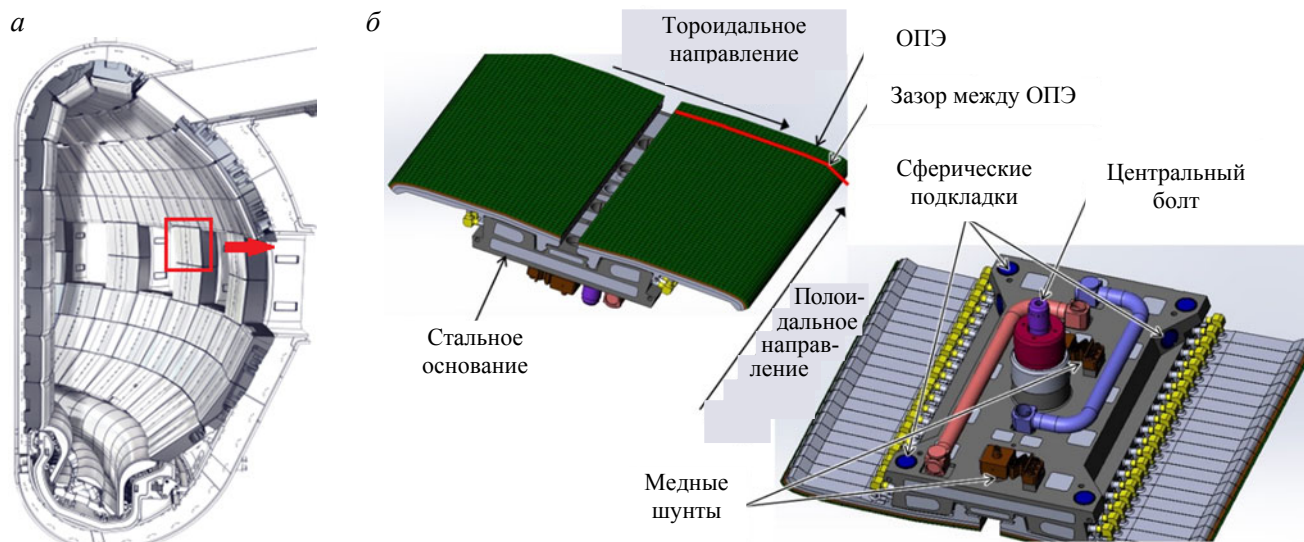


Рис. 1. Первая стенка ИТЭР: а — полоидальное сечение ВК с КОП; б — ППС № 14А

ОПЭ ППС в вакуумной камере (ВК) ИТЭР ориентированы поперёк полоидального направления (см. рис. 1). Это позволяет минимизировать силу, действующую на ОПЭ, поскольку направление протекания тока совпадает с тороидальным магнитным полем.

Проектируемый в настоящее время токамак реакторных технологий (ТРТ) почти в 3 раза меньше ИТЭР по размеру [2], 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) и усложняющий условия эксплуатации фактор в виде наличия жидкого/парообразного лития внутри ВК [3]. 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]. При проектировании первой стенки установки ТРТ необходимо разработать конструкцию, позволяющую обеспечить требуемый ресурс эксплуатации ППС (не менее 5000 циклов) в условиях воздействия тепловых и электромагнитных нагрузок, а также возможного контакта с жидким/парообразным литием.

Целью настоящей работы является разработка и оптимизация конструкции ППС ТРТ по результатам численного анализа электромагнитных нагрузок.

БАЗОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ППС ТРТ

Одним из факторов, оказывающих прямое влияние на конструкцию ППС ТРТ, является относительная по сравнению с ИТЭР компактность установки ТРТ. Величина зазора между внутренней стенкой центрального столба вакуумной камеры и сепаратрисой плазмы в установке ТРТ составляет около 150 мм вместо ~ 500 мм в ИТЭР. С учётом 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. С учётом всех заданных ограничений и

условий эксплуатации для первой стенки ТРТ после предварительной проработки вариантов конструкции ППС пришлось отказаться от ряда наработок ИТЭР, таких как ориентация ОПЭ ППС относительно направления тока плазмы, массивное прочное основание ППС, профиль с двойным перегибом [4], образующий клинообразный зазор в центральной части ППС и между соседними ППС, позволяющий «спрятать» в тень от набегающего потока плазмы элементы конструкции, не покрытые защитной облицовкой.

Принятая таким образом, на первоначальном этапе базовая конструкция ППС ТРТ [3] показана на рис. 2.

Набор ОПЭ попарно гидравлически соединён в спарки, установлен на относительно тонкое стальное основание и подключён в параллель к сдвоенному (подача и отвод воды) коллектору, который также закреплён на стальном основании. ОПЭ внутри вакуумной камеры ориентированы вдоль полоидального направления и представляют собой многослойную композицию в виде биметаллического основания с медной теплоотводящей матрицей, имеющей защитные оболочки наружных поверхностей и канала охлаждения из нержавеющей стали, а также защитной облицовки из бериллия, присоединённой на медный теплоотводящий слой.

Стальное основание ППС опирается с контактом по большой площади и фиксируется болтами на установленные внутри вакуумной камеры поддерживающие структуры (рис. 3), внутри которых организована разводка магистральных трубопроводов, питающих ППС.

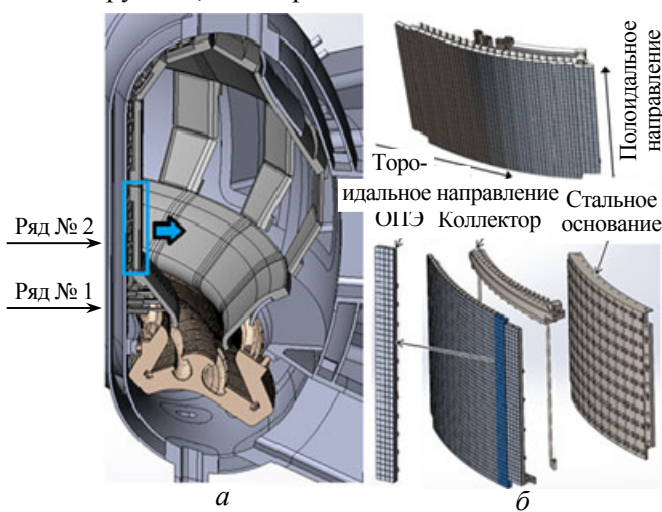


Рис. 2. Установка ТРТ: *а* — полоидальное сечение ВК с КОП; *б* — общий вид ППС

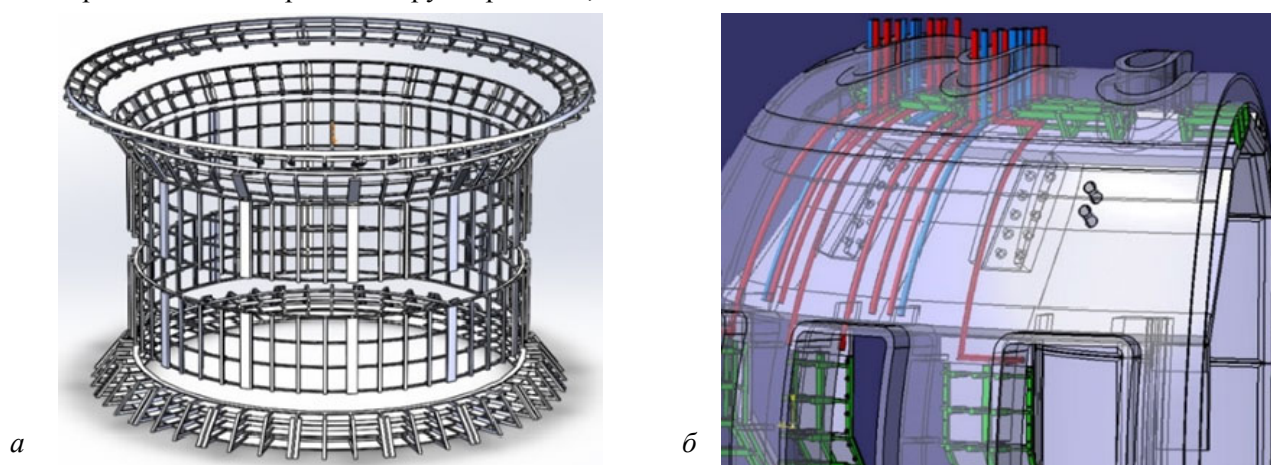


Рис. 3. Внутрикамерные элементы ТРТ: *а* — поддерживающие структуры; *б* — магистральные трубопроводы

Элементы крепления и подключения к магистральным трубопроводам на ППС располагаются по бокам с двух сторон. Данные элементы на двух соседних ППС в ряду закрываются защитной вставкой (ЗВ), аналогичной по конструкции регулярным ОПЭ, которая гидравлически и механически крепится к двум соседним ППС (рис. 4).

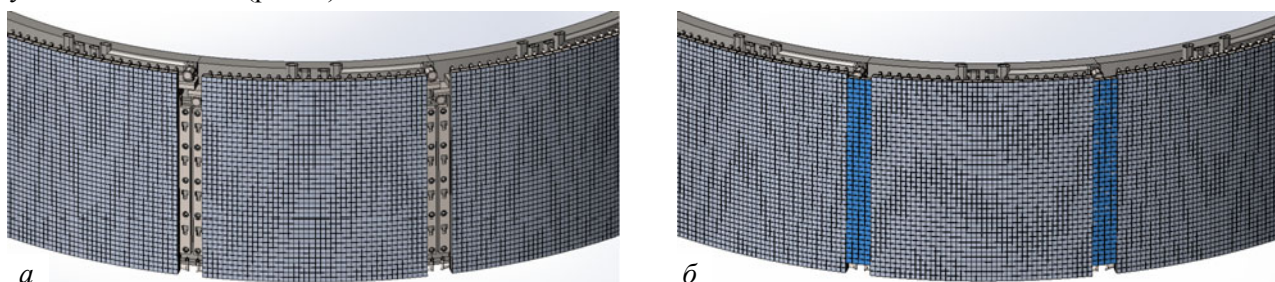


Рис. 4. Ряд из трёх ППС: *а* — без установленных ЗВ; *б* — с ЗВ (выделено цветом)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ППС ТРТ И РАСЧЁТНЫЙ СЦЕНАРИЙ

ЭМ-анализ основных проводящих элементов установки ТРТ был выполнен для сценария неуправляемого ухода плазмы по вертикали (Vertical Displacement Event (VDE)) вниз. Единая конечно-элементная (КЭ) модель установки ТРТ была разработана таким образом, что позволила рассмотреть как базовый вариант конструкции (вариант № 0) ППС, так и шесть дополнительных вариантных моделей, образованных из базовой путём её единственного изменения. Для рассматриваемого в работе сценария неуправляемого ухода плазмы по вертикали вниз наиболее нагруженными являются ППС рядов № 1, № 2 и № 10, где № 10 — это последний ряд первой стенки, сопрягающийся с внешней мишенью дивертора. Панели в ряду № 10 отличаются от панелей рядов № 1 и № 2 тем, что опираются на внутрикамерный виток пассивной стабилизации и имеют другие условия механического и электрического контакта с вакуумной камерой. Конструкция ППС ряда № 10 ещё находится в разработке, поэтому в данной работе из анализа исключена.

Для проведения ЭМ-исследования на основе трёхмерных моделей 45-градусного сектора ВК с патрубками, опорами и витками пассивной стабилизации плазмы (ВПС) и ППС рядов № 1 и № 2 (на внутреннем обходе ВК (см. рис. 2, а)) установки ТРТ [3, 5] была разработана базовая вычислительная модель (рис. 5). 45-градусная вычислительная модель ВК ТРТ с ППС и ОПЭ описывает:

- внутреннюю и внешнюю стенки камеры;
- восемь патрубков ВК, размещённых на разных уровнях камеры;
- сегменты верхнего и нижнего ВПС, чьи опоры электрически изолированы от ВК согласно концепции проектирования;
- два нижних ряда ППС с ОПЭ и ЗВ, располагающимися между соседними в тороидальном направлении ППС, крепящихся на внутреннем обходе ВК;
- две гравитационные опоры ВК.

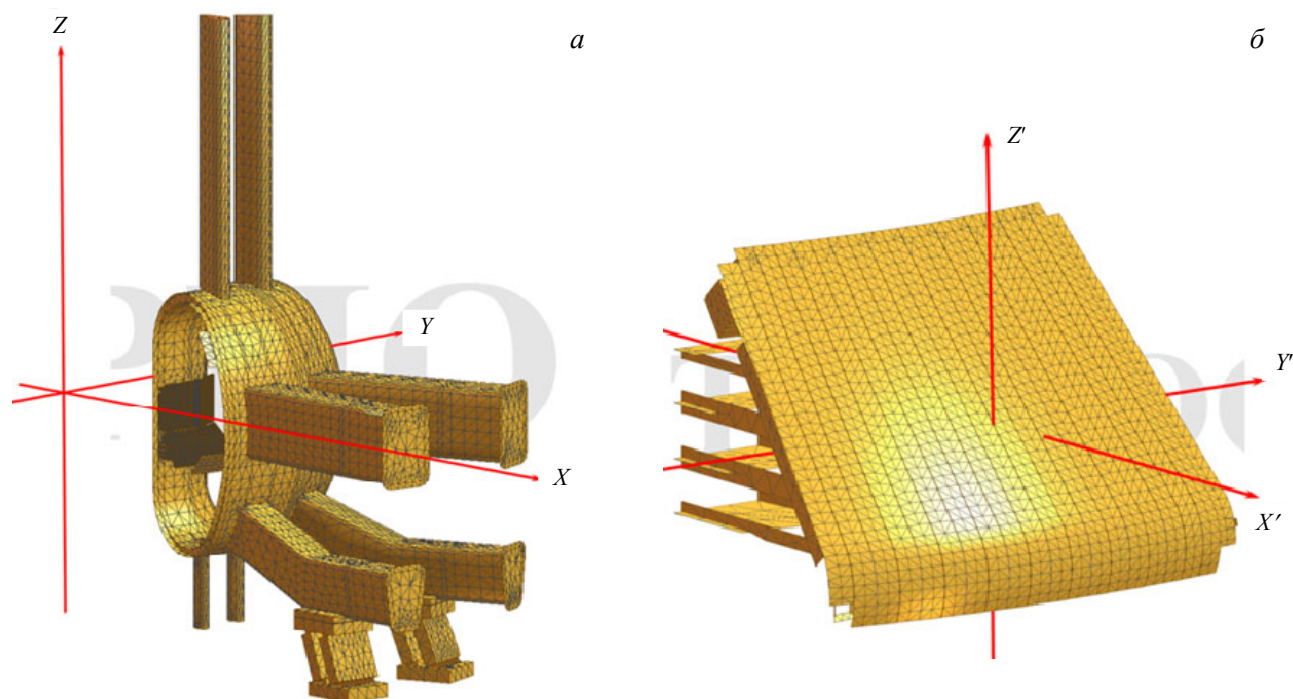


Рис. 5. КЭ-модель 45-градусного сектора ВК ТРТ с ППС и витками пассивной стабилизации плазмы (ВПС) и ГСК (а); КЭ-модель модуля ППС первого ряда с связанной с ним локальной системой координат (ЛСК) (б)

В обсуждениях были определены варианты модификаций базовой вычислительной модели ВК ТРТ с ППС, которые и были исследованы:

- обращённые к плазме элементы (ОПЭ) содержат только бериллиевую облицовку, а медное заполнение ОПЭ заменено стальным (вариант № 1.1);
- ОПЭ полностью состоят из стали (вариант № 1.2);
- в базовый вариант введена электрическая изоляция между ножками ОПЭ и стальным основанием ППС (см. рис. 2, вариант № 2). В этом варианте электрический контакт между ОПЭ и панелью сохраняется только через трубки коллектора;

— отсутствуют электрические замыкания между панелями ПС в тороидальном направлении (вариант № 3, трубки, соединяющие ЗВ соседних ППС, из модели изъяты);

— трубки, соединяющие ЗВ соседних ППС, в модели сохранены, но наряду с ними в конструкцию добавлены шунты, перемыкающие соседние панели ППС в их верхних частях. Были рассмотрены варианты медных (вариант № 4.1) и стальных (вариант № 4.2) шунтов.

Варианты № 1.1 и № 1.2 позволяют оценить и проанализировать эффект относительного соотношения материалов, имеющих разную электропроводность, в составе многослойного ОПЭ, что может дать основания для внесения корректировок в трёхмерную модель конструкции. Вариант № 2 позволяет оценить и проанализировать эффект от внесения в конструкцию ОПЭ электрической изоляции, что возможно реализовать в виде электроизоляционного покрытия или проставки. Вариант № 3 позволяет оценить и проанализировать эффект от изменения конструкции защитной вставки (изъятие переливной трубки), что потребует доработки трёхмерной модели в части системы охлаждения. Варианты № 4.1 и № 4.2 позволяют оценить и проанализировать эффект от введения в конструкцию шунта (электрического соединения) между двумя соседними ППС в области конструкции с максимальной плотностью тока. Рассматриваются два материала шунта с разной электропроводностью (медь и нержавеющая сталь), при этом в условиях коррозионного воздействия лития [6] стальной шунт выглядит предпочтительнее.

Согласно разработанной трёхмерной модели стальные стенки ВК и её полоидальные рёбра жёсткости имеют толщину 25, патрубки — 50 мм. Модель внутрикамерных ВПС плазмы описывает верхний и нижний бронзовые витки толщиной 30 мм.

Особое внимание было уделено моделированию ОПЭ. Конструкция ОПЭ ППС и её вычислительная оболочечная модель схематически показаны на рис. 6. Как видно из рисунка, ОПЭ в базовом варианте представляет собой набор параллельно соединённых проводников, выполненных из трёх материалов: бериллия, меди и стали.

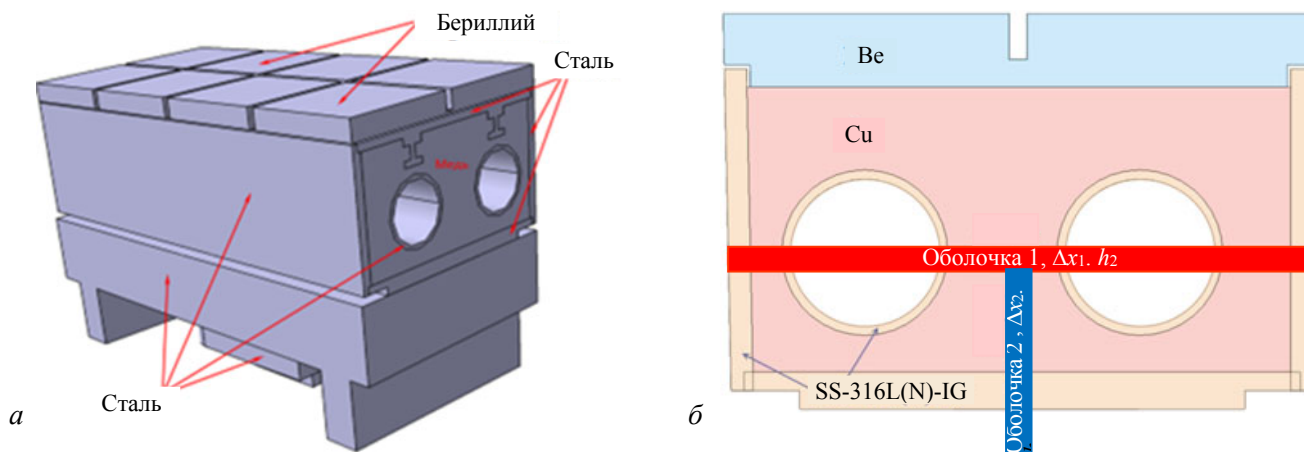


Рис. 6. Периодический элемент ОПЭ ППС: а — трёхмерная модель (с участком стального основания ППС); б — оболочечная модель

Каждый ОПЭ моделируется двумя плоскими оболочками с линейными размерами Δx_1 и Δx_2 и эффективными толщинами h_1 и h_2 . Оболочка 1 расположена в горизонтальной плоскости ОПЭ, проходящей через центральные линии его каналов охлаждения. Она моделирует верхнюю часть ОПЭ. Вертикальная оболочка 2 моделирует нижнюю часть ОПЭ. Для определения эффективных электрических свойств оболочек были вычислены площади поперечного сечения элементов конструкции ОПЭ, выполненных из различных материалов.

Предполагается, что основной ток в ОПЭ течёт в полоидальном направлении. Так как наибольший вклад в полоидальную проводимость ОПЭ даёт медь, то она была взята в качестве материала обеих оболочек. Эффективная толщина h_1 первой оболочки, моделирующей верхнюю часть ОПЭ, определялась из условия определения сопротивления параллельно соединённых проводников:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_{Be}} + \frac{1}{R_{Cu,1}} + \frac{1}{R_{SS,1}};$$

$$h_1 = \frac{\rho_{Cu}}{\Delta x_1} \left(\frac{S_{Be} 0,5}{\rho_{Be}} + \frac{S_{Cu,1}}{\rho_{Cu}} + \frac{S_{SS,1}}{\rho_{SS}} \right).$$

Для определения эффективной толщины h_2 второй оболочки, моделирующей нижнюю часть ОПЭ, использовалось аналогичное условие

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_{Cu,2}} + \frac{1}{R_{SS,2}};$$

$$h_2 = \frac{\rho_{Cu}}{\Delta x_2} \left(\frac{S_{Cu,2}}{\rho_{Cu}} + \frac{S_{SS,2}}{\rho_{SS}} \right).$$

Регулярные конструктивные элементы ПС, имеющие постоянную толщину, такие как опорная плита, опоры и крепёжные балки, моделировались оболочками, расположенными в их средней плоскости. Толщины оболочек совпадали по значению с фактическими толщинами этих конструктивных элементов.

Толщина оболочек, описывающих коллектор, определялась из соотношения площади поперечного сечения коллектора к сумме длин оболочек $\sum_{i=1}^4 l_i$, моделирующих его.

На рис. 7 показано изменение во времени следующих параметров плазмы при моделировании сценария VDE вниз с помощью кода ДИНА [7]: полного тороидального тока плазмы, полоидального компонента гало-тока, тороидального магнитного потока, связанного с током плазмы, а также изменения положения центра тока плазмы. Нулевой момент времени сценария соответствует концу горения плазмы (End Of Burn (EOB)), когда ток плазмы достигает максимального значения 5 МА. Тороидальный магнитный поток достигает максимального значения 0,134 Вб в 24 мс. Момент окончания срыва тока плазмы 220 мс.

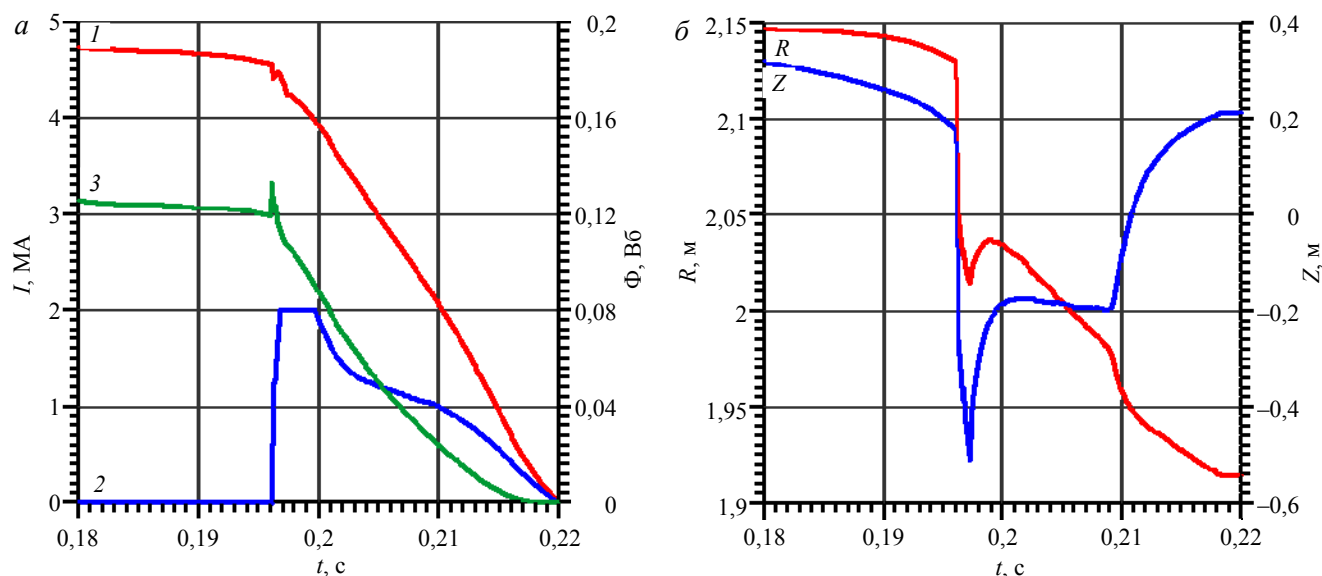


Рис. 7. Изменения параметров плазмы при сценарии VDE вниз $I(t)$ (а) и $R(t)$ (б): 1 — тороидальный ток плазмы; 2 — полоидальный компонент гало-тока; 3 — тороидальный магнитный поток, связанный с током плазмы; R , Z — координаты центра тока плазмы

В расчётах максимальное значение гало-тока было ограничено величиной 2 МА на интервале от 196,7 до 199,7 мс. В этом интервале величина запаса устойчивости плазмы q становится меньше 1. При таких значениях этого параметра используемая плазмозфизическая модель кода ДИНА становится некорректной, поэтому было принято решение ограничить величину гало-тока 2 МА.

Тороидальный магнитный поток, связанный с током плазмы, моделировался с помощью виртуального тороидального соленоида, расположенного в области плазмы. Закон изменения тока в соленоиде соответствовал заданному изменению магнитного потока. Данный подход использовался для моделирования полоидальных вихревых токов в ВК и ППС. На рис. 7 можно увидеть, что в момент времени 196 мс происходит тепловой срыв (Thermal Quench) плазмы, в течение которого тороидальный магнитный поток увеличивается с 0,119 до 0,133 Вб за 0,1 мс. Это приводит к резкому росту полоидальных токов в окружающих плазму пассивных проводящих структурах.

Расчёт проводился до 650 мс с учётом заданных изменений токов в ОПП. Тороидальный ток плазмы моделировался набором 3721 неподвижных кольцевых токовых витков, расположенных в области, ограниченной сепаратрисой плазмы. Положение этих витков отмечено розовыми точками на рис. 8, а, фио-

летовая линия соответствует сепаратрисе. Зелёные точки на сепаратрисе указывают зону входа, а красные точки — зону выхода гало-тока в момент времени 200 мс, когда гало-ток максимален. Следует отметить, что в расчётной модели слои КЭ, описывающие замыкание гало-тока через область плазмы, имеют фиксированное в течение срыва положение. Они показаны на рис. 8, б. Места их соединения с ППС первого ряда и ВК выбраны в серединах зон входа и выхода гало-тока, показанных на рис. 8, а.

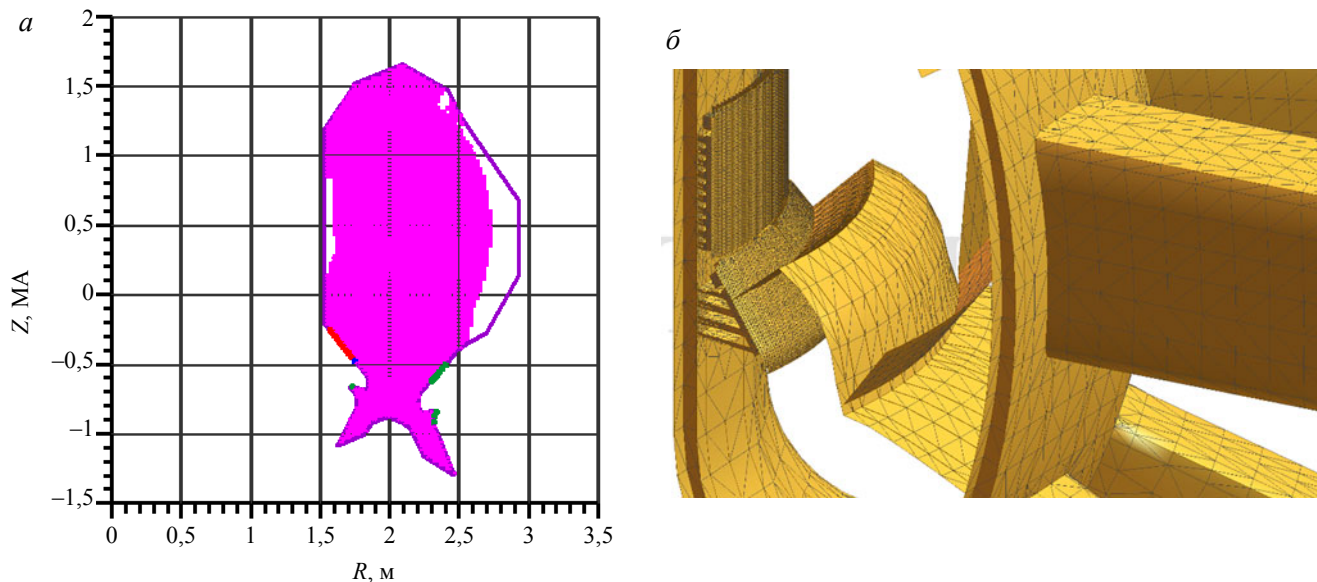


Рис. 8. Математическая модель тороидального тока плазмы при сценарии срыва тока VDE вниз (а) и КЭ-модель 45-градусного сектора ВК ТРТ (б) с дополнительными элементами, моделирующими замыкание гало-тока через периферийные области плазмы для сценария VDE вниз

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА

В табл. 1 приведены максимальные ЭМ-силы и моменты, действующие на наиболее нагруженную (при данном сценарии) ППС № 1.2. Нагрузки в ЛСК, связанной с этой панелью, показаны на рис. 5, б. Максимальные значения выделены красным цветом, минимальные — синим.

Т а б л и ц а 1. Максимальные ЭМ-нагрузки, действующие на ППС № 1.2, для всех расчётных вариантов при сценарии VDE вниз. Силы приведены в ЛСК (см. рис. 5, б), связанной с панелью

Вариант №	ЭМ-силы, кН				ЭМ-моменты, кН·м			
	F_x	F_y	F_z	$ F $	M_x	M_y	M_z	$ M $
0	-791 (196,7 мс)	-67,4 (196,7 мс)	-187 (196,8 мс)	816 (196,7 мс)	-100 (196,7 мс)	69,1 (196,7 мс)	113 (196,7 мс)	166 (196,7 мс)
1.1	-692 (196,7 мс)	-29,6 (196,2 мс)	-145 (196,5 мс)	707 (196,7 мс)	-45,4 (196,2 мс)	60,5 (196,7 мс)	55,6 (196,2 мс)	81,9 (196,2 мс)
1.2	-647 (196,7 мс)	39,9 (197,3 мс)	-133 (196,5 мс)	660 (196,7 мс)	40,3 (197,3 мс)	57,2 (196,7 мс)	-42,0 (197,3 мс)	71,5 (197,3 мс)
2	-523 (196,7 мс)	54,9 (196,7 мс)	-106 (196,2 мс)	533 (196,7 мс)	74,6 (196,7 мс)	53,5 (196,7 мс)	-81,9 (196,7 мс)	123 (196,7 мс)
3	-547 (196,7 мс)	105 (197,3 мс)	-130 (196,7 мс)	570 (196,7 мс)	132 (197,2 мс)	57,2 (196,7 мс)	-154 (197,2 мс)	209 (197,1 мс)
4.1	-852 (196,7 мс)	93,8 (197,4 мс)	-200 (196,8 мс)	876 (196,7 мс)	42,6 (197,5 мс)	62,4 (196,7 мс)	-79,7 (197,4 мс)	100 (197,3 мс)
4.2	-834 (196,7 мс)	72,5 (197,4 мс)	-187 (196,8 мс)	855 (196,7 мс)	30,4 (197,5 мс)	63,7 (196,7 мс)	-60,5 (197,4 мс)	83,6 (197,3 мс)

Сравнивая величины максимальных ЭМ-сил, действующих на панель, можно сказать следующее:

— в базовом варианте № 0 основными нагрузками на панель являются радиальная сила $F_x = -791$ кН, радиальный $M_x = -100$ и вертикальный $M_z = 113$ кН·м моменты. При этом модуль вектора силы достигает значения 816 кН, момента — 166 кН·м;

— вариант № 2, в котором ножки ОПЭ электрически изолированы от основания панели, даёт наибольшее снижение силы, действующей на панель. Так, абсолютное значение вектора силы при использовании электрической изоляции снижается в 1,53 раза относительно базового варианта до 533 кН. Что касается вектора момента, то его абсолютное значение снижается в 1,35 раза — до 123 кН·м;

— наибольшее снижение момента, действующего на панель, даёт вариант № 1.2, в котором ОПЭ выполнены целиком из стали без бериллиевой облицовки. В этом варианте абсолютное значение вектора момента достигает значения 71,5 кН·м, что в 2,32 раза меньше, чем в базовом варианте;

— вариант № 3, в котором соседние панели напрямую электрически не связаны друг с другом в тороидальном направлении, даёт наибольшие значения моментов на панель. В этом варианте абсолютное значение вектора момента достигает значения 209 кН·м, что на 26% больше, чем в базовом варианте. Что касается вектора силы, то его абсолютное значение 533 кН составляет 65% от базового варианта;

— использование медных (вариант № 4.1) или стальных (вариант № 4.2) электрических шунтов, соединяющих ЗВ соседних ППС, приводит к увеличению модуля вектора силы на 7 или 5% относительно базового варианта. При этом абсолютное значение вектора момента снижается на 40% при использовании медного шунта и на 50% при использовании стального.

Отдельно проанализированы значения сил и моментов, действующих на ОПЭ ППС. Вариант № 2 даёт примерно одинаковые силы на ОПЭ каждого ряда ППС. В остальных вариантах силы на ОПЭ панелей существенно отличаются. При этом наиболее нагруженными являются крайние элементы каждой панели — ЗВ и ОПЭ, граничащие с ними. В табл. 2 и 3 приведены максимальные ЭМ-силы, действующие на самые нагруженные крайние правые (если смотреть из центра установки) ОПЭ ППС № 1.2 и ЗВ ППС № 1.2 соответственно. Максимальные значения выделены красным цветом, минимальные — синим.

Т а б л и ц а 2. Максимальные ЭМ-силы, действующие на самый нагруженный крайний правый (если смотреть из центра установки) ОПЭ ППС № 1.2 при сценарии VDE вниз. Силы приведены для всех расчётных вариантов в ЛСК (см. рис. 5, б), связанной с панелью

Вариант, №	ЭМ-силы, кН			
	F_x	F_y	F_z	$ F $
0	-28,5 (197,3 мс)	12,4 (197,3 мс)	-22,2 (197,3 мс)	38,2 (197,3 мс)
1.1	-23,6 (197,3 мс)	8,02 (197,3 мс)	-18,7 (197,3 мс)	31,2 (197,3 мс)
1.2	-20,3 (197,3 мс)	6,91 (197,3 мс)	-16,1 (197,3 мс)	26,8 (197,3 мс)
2	8,49 (196,7 мс)	-3,01 (197,6 мс)	7,96 (196,7 мс)	11,8 (196,7 мс)
3	-61,9 (197,3 мс)	21,7 (197,3 мс)	-49,6 (197,3 мс)	82,2 (197,3 мс)
4.1	-26,8 (197,3 мс)	10,7 (197,3 мс)	21,3 (197,3 мс)	35,9 (197,3 мс)
4.2	-27,0 (197,3 мс)	-21,4 (197,3 мс)	10,9 (197,3 мс)	36,2 (197,3 мс)

Т а б л и ц а 3. Максимальные ЭМ-силы, действующие на самую нагруженную правую (если смотреть из центра установки) ЗВ ППС № 1.2 при сценарии VDE вниз. Силы приведены для всех расчётных вариантов в ЛСК (см. рис. 5, б), связанной с панелью

Вариант №	ЭМ-силы, кН			
	F_x	F_y	F_z	$ F $
0	-245 (196,9 мс)	-54,4 (196,7 мс)	-190 (196,7 мс)	314 (196,7 мс)
1.1	-113 (196,2 мс)	-21,4 (196,2 мс)	-83,5 (196,2 мс)	142 (196,2 мс)
1.2	-87,0 (196,2 мс)	-14,7 (196,2 мс)	-63,6 (196,2 мс)	109 (196,2 мс)
2	-15,8 (197,5 мс)	-3,54 (196,2 мс)	-10,4 (199,7 мс)	18,8 (197,5 мс)
3	131 (197,1 мс)	-16,8 (197,2 мс)	101 (197,1 мс)	166 (197,1 мс)
4.1	63,4 (198,1 мс)	-45,9 (196,7 мс)	45,6 (198,1 мс)	78,1 (198,1 мс)
4.2	44,2 (198,1 мс)	-45,2 (196,7 мс)	31,3 (198,1 мс)	57,4 (196,7 мс)

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

— снижение электрической проводимости ОПЭ в вариантах № 1.1 и № 1.2 приводит к уменьшению модуля вектора силы соответственно на 18 и 30% для крайнего правого ОПЭ и на 56 и 45% для правой ЗВ по отношению к базовому варианту № 0;

— вариант № 2 даёт наибольшее снижение силы, действующей на ОПЭ. Так, если электрически изолировать ножки элемента от основания панели, то это позволит снизить силу на 69% для крайнего правого ОПЭ и на 95% для правой ЗВ по отношению к базовому варианту № 0;

— вариант № 3, в котором соседние панели напрямую электрически не связаны друг с другом в тороидальном направлении, для крайнего правого ОПЭ даёт максимальную силу, равную 82,2 кН. Это составляет 215% по отношению к базовому варианту. При этом для правой ЗВ получаем уменьшение максимального значения силы на 47% — до 166 кН по отношению к базовому варианту № 0;

— использование медных (вариант № 4.1) или стальных (вариант № 4.2) электрических шунтов, соединяющих ЗВ соседних ППС, приводит к уменьшению силы, действующей на крайний правый ОПЭ, на 6 или 5% и на 77 или 81% — для правой ЗВ относительно базового варианта.

Дополнительно на рис. 9 и 10 показаны распределения тороидального и полоидального вихревых токов по ППС первого ряда. Распределения приведены в момент времени 196,7 мс, когда ЭМ-нагрузки на панели достигают своих максимальных значений.

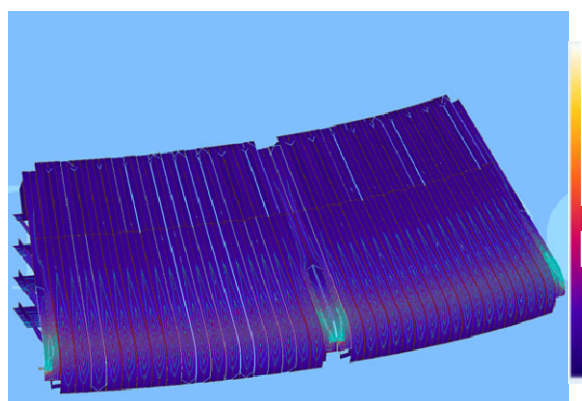


Рис. 9. Распределение поверхностной плотности тороидального вихревого тока в момент времени 196,7 мс сценария VDE вниз. Распределение приведено для двух соседних ППС первого ряда и обусловлено изменением тороидального тока плазмы. Шаг линий тока равен 10 кА

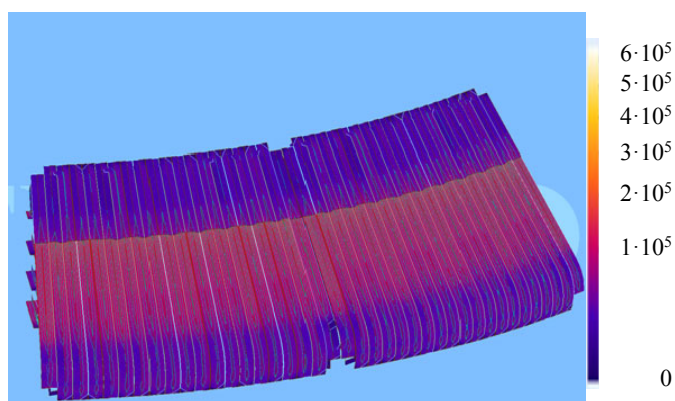


Рис. 10. Распределение поверхностной плотности полоидального вихревого тока в момент времени 196,7 мс сценария VDE вниз. Распределение приведено для двух соседних ППС первого ряда и обусловлено изменением тороидального магнитного потока и гало-током. Шаг линий тока равен 500 А

В результате проведённых расчётов видно, что значения сил и моментов в базовом варианте № 0 конструкции ППС достигают экстремальных значений, а наиболее нагруженным элементом панели являются ЗВ. Это обусловлено особенностью конструкции ППС с ОПЭ, ориентированными поперёк тороидального магнитного поля, и соответствующей высокой поверхностной плотностью вихревого тока, обусловленного изменением тороидального тока плазмы. А также особенностями конструкции каналов охлаждения (расположение переливных трубок) ЗВ, расположенных ассиметрично по отношению к каналам охлаждения регулярных ОПЭ.

Изменение эквивалентной электропроводности ОПЭ за счёт оптимизации соотношения материалов в многослойной композиции (варианты № 1.1 и № 1.2) позволяет добиться снижения ЭМ-сил и моментов. Поэтому данный вариант оптимизации конструкции можно рассматривать совместно с проведением оптимизации конструкции ОПЭ по результатам теплофизических расчётов.

Вариант № 2 выглядит наиболее предпочтительным, так как позволяет добиться наибольшего снижения значений ЭМ-сил и моментов, а также получить наиболее равномерное распределение нагрузок по элементам ППС. Однако данный вариант требует наиболее глубокой конструкторско-технологической проработки и экспериментального обоснования работоспособности и ресурсной стойкости принятых решений.

Исключение из базовой конструкции ППС переливной трубки ЗВ (вариант № 3), соединяющей соседние в тороидальном направлении ППС, приводит к двухкратному снижению нагрузок на ЗВ и двухкратному увеличению нагрузок на крайние ОПЭ. При этом нагрузки на ЗВ всё ещё достигают экстремальных значений. Также достигается снижение значений ЭМ-сил, действующих на ППС, и при этом наблюдаются максимальные из всех рассмотренных вариантов значения ЭМ-моментов.

В свою очередь введение шунта (варианты № 4.1 и № 4.2), соединяющего соседние в тороидальном направлении ППС, позволяет более чем в 5,5 раза снизить нагрузки на ЗВ практически без изменения нагрузок на остальные элементы ППС. Также достигается снижение значений ЭМ-моментов, действующих на ППС, и при этом наблюдаются максимальные из всех рассмотренных вариантов значения ЭМ-сил. Кроме того, вариант № 4.2 со стальным шунтом выглядит более предпочтительным как с точки зрения коррозионной стойкости к литию, так и с точки зрения снижения ЭМ-нагрузок.

Анализируя результаты, полученные для последних трёх вариантов, можно предложить следующую перспективную модификацию конструкции ППС: изменить контур охлаждения ЗВ, устранив переливную трубку, либо перенести трубку в противоположную сторону по аналогии с регулярными ОПЭ; добавить стальной шунт, соединяющий соседние в тороидальном направлении ППС. Данная модификация конструкции может позволить добиться оптимальных значений ЭМ-сил и моментов на ППС и отдельные элементы. При этом возникает необходимость в проведении прочностного анализа конструкции ППС и отдельных её элементов для определения диапазона допустимых величин нагрузок и принятия окончательного решения о модификации конструкции ППС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого электромагнитного анализа разработанной конструкции ППС ТРТ с разными вариантами модификации конструкции определено следующее:

- максимальные по абсолютному значению ЭМ-сила и момент для базовой конструкции ППС достигают 816 и 166 кН·м соответственно;

- наиболее нагруженными при рассмотренном сценарии срыва тока плазмы являются панели первого ряда, в частности панель № 1.2;

- наибольшее снижение ЭМ-силы на ППС № 1.2 наблюдается во втором варианте оптимизации конструкции панелей, когда ножки ОПЭ электрически изолированы от основания панели. В этом случае сила на панель снижается в 1,53 раза — с 816 до 533 кН. Что касается вектора момента, то его абсолютное значение снижается в 1,35 раза — со 166 до 123 кН·м;

- наибольшее снижение ЭМ-момента на ППС № 1.2 даёт вариант № 1.2, в котором ОПЭ выполнены целиком из стали без бериллиевой облицовки. В этом случае момент на панель достигает значения 71,5 кН·м, что в 2,32 раза меньше, чем в базовом варианте. При этом сила на панель снижается на 19% — с 816 до 660 кН. Это свидетельствует о важности оптимизации соотношения материалов в многослойной композиции ОПЭ;

- вариант № 2 также даёт наибольшее снижение силы, действующей на ОПЭ. Так, сила снижается на 69% — с 38,2 в базовом варианте до 11,8 кН;

- в целом вариант № 2 (электрическая изоляция ножек ОПЭ от основания панели) выглядит наиболее предпочтительным среди всех рассмотренных вариантов. Его также можно совместить с оптимизацией соотношения материалов в многослойной композиции ОПЭ, что приведёт к ещё большему снижению ЭМ-нагрузок. Однако данный вариант требует наиболее глубокой конструкторско-технологической проработки и экспериментального обоснования работоспособности и прочности конструкции;

- модификация конструкции ППС, включающая изменение контура охлаждения ЗВ и введение стального шунта (варианты № 3 и № 4.2), также является перспективным вариантом для дальнейшего анализа и может позволить добиться приемлемых значений нагрузок ЭМ-сил и моментов;

- перечисленные варианты приняты базовыми для дальнейшей модификации трёхмерной модели ППС и проведения дополнительного ЭМ-анализа. При этом для принятия окончательного решения о модификации конструкции ППС требуется проведение прочностного анализа конструкции для определения диапазона допустимых величин нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raffray A.R., Nygren R., Whyte D.G., Abdel-Khalik S., Doerner R., Escourbiac F., Evans T., Goldston R.J., Hoelzer D.T., Konishi S., Lorenzetto P., Merola M., Neu R., Norajitra P., Pitts R.A., Rieth M., Roedig M., Rognlien T., Suzuki S., Til-

- lack M.S., Wong C. High heat flux components readiness to proceed from near term fusion systems to power plants. — Fusion Engineering and Design, 2010, vol. 85, p. 93—108.
2. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 970985.
 3. Мазуль И.В., Гиниятуллин Р.Н., Кавин А.А., Литуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. Обращённые к плазме компоненты токамака TRT. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 12, с. 1103—1122.
 4. Stangeby P.C. Analytic expressions for shaping analysis of the ITER outer wall. — Nuclear Fusion, 2011, vol. 51, p. 103015.
 5. Антропов Д.А., Бондарь А.В., Кедров И.В., Кузьмин Е.Г., Марченко Т.А. Криостат и вакуумная камера TRT. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 12, с. 1146—1151.
 6. Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Krasin V.P., Pankratov V.Yu. Numerical and experimental determination of metals and alloys solubility in liquid lithium, lithium containing nonmetallic impurities, lead and lead-lithium eutectic. — J. of Nuclear Materials, 1995, vol. 224, p. 288—292.
 7. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — J. of Comp. Physics, 1993, vol. 109(2), p. 193—201.

**АО «НИИЭФА» ИМ. Д.В. ЕФРЕМОВА, 196641 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ПОС. МЕТАЛЛОСТРОЙ,
ДОРОГА НА МЕТАЛЛОСТРОЙ 3, РОССИЯ**



Павел Юрьевич
Пискарев, руко-
водитель проекта
piskarev@sintez.niiefa.spb.su



Игорь Всеволодович
Мазуль, г.н.с., д. техн. н.
ветеран атомной энерге-
тики и промышленности
mazul@niiefa.spb.su



Елена Игоревна Га-
пионок, ведущий
математик
elena.gaponok@gmail.com



Александр Вячесла-
вович Белов, веду-
щий исследователь
belov@sintez.niiefa.spb.su



Алексей Николаевич
Маханьков, начальник
лаборатории, к. техн. н.
makh@sintez.niiefa.spb.su



Елена Валентиновна
Окунева, главный
специалист
okuneva@sintez.niiefa.spb.su



Михаил Сергеевич
Колесник, инженер-
исследователь 2 ка-
тегории
kolesnik@sintez.niiefa.spb.su



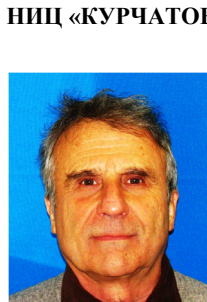
Игорь Валерьевич
Кедров, начальник
отдела
kedrov@sintez.niiefa.spb.su



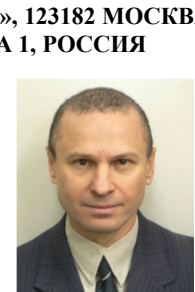
Александр Андре-
евич Гervаш, началь-
ник лаборатории,
к. техн. н., ветеран
атомной энергетики
и промышленности
gervash@sintez.niiefa.spb.su



Андрей Александров-
ич Кавин, началь-
ник лаборатории,
к.ф.-м.н., ветеран
атомной энергетики
и промышленности
kavin@sintez.niiefa.spb.su



Виктор Эммануило-
вич Лукаш, в.н.с.,
д.ф.-м.н., лауреат
премий им. И.В. Кур-
чатова и А.П. Алек-
сандрова
Lukash_VE@nrcki.ru



Рустам Рашитович
Хайрутдинов, в.н.с.,
д.ф.-м.н., лауреат
премий им. И.В. Кур-
чатова и А.П. Алек-
сандрова, ветеран
атомной энергетики
и промышленности
khayrutd@mail.ru

**НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ», 123182 МОСКВА, ПЛ. АКАДЕМИКА
КУРЧАТОВА 1, РОССИЯ**

Статья поступила в редакцию 11 июля 2022 г.

После доработки 16 сентября 2022 г.

Принята к публикации 5 октября 2022 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 45—55.