

КРИОСТАТ И ВАКУУМНАЯ КАМЕРА TRT

© 2021 г. Д. А. Антропов^{a, b}, А. В. Бондарь^{a, b}, И. В. Кедров^{a, b},
Е. Г. Кузьмин^{a, b, *}, Т. А. Марченко^{a, b}

^a Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА),
Санкт-Петербург, Россия

^b Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”,
“Проектный центр ИТЭР”, Частное учреждение “ИТЭР-Центр”, Москва, Россия

*e-mail: kuzmin@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Разработан концептуальный проект конструкции криостата и вакуумной камеры, которые являются одними из основных компонентов компактного токамака с реакторными технологиями (TRT). Определены основные технические решения конструкции, конфигурация, технические характеристики и режимы эксплуатации компонентов. Концептуально криостат — это одностенная вакуумная камера цилиндрической формы из нержавеющей стали аустенитного класса, внутри которой размещается: сверхпроводящая электромагнитная система, вакуумная камера, тепловая защита криостата и вакуумной камеры. Наибольший диаметр криостата 12 м, высота 11 м, масса 317 тонн. В криостате может быть обеспечен вакуум 1×10^{-4} Па. Вакуумная камера представляет собой цельно-сварную двустенную конструкцию из нержавеющей стали аустенитного класса, наружная и внутренняя оболочки которой соединены между собой системой тороидальных и полоидальных ребер жесткости, в промежутках между которыми циркулирует борированная вода. Толщина оболочек и ребер жесткости 25 мм. Наружный диаметр камеры 6.64 м, высота 3.85 м.

Ключевые слова: компактный токамак с реакторными технологиями (TRT), плазма, вакуумная камера, криостат, сверхпроводящая электромагнитная системы (ЭМС), тепловая защита, нейтронная защита

DOI: 10.31857/S0367292121110123

1. ВВЕДЕНИЕ

Токамак с реакторными технологиями (TRT) представляет собой компактную электрофизическую установку с сильным магнитным полем, мощным дополнительным нагревом плазмы и обмотками электромагнитной системы на основе высокотемпературного сверхпроводника, предназначенную для решения физико-технических задач, изложенных в работе [1]. Криостат и вакуумная камера, являются одними из основных компонентов токамака с реакторными технологиями.

Криостат, представляет собой герметичную цилиндрическую оболочку, внутри которой создается вакуум для сокращения теплопритоков со стенок криостата на сверхпроводящую магнитную систему, которая работает при криогенных температурах (4.5 К). Криостат формирует второй барьер безопасности для активированных материалов внутри вакуумной камеры и является несущей структурой для электромагнитной си-

стемы и вакуумной камеры, установленных внутри него.

Вакуумная камера является первым барьером безопасности установки и предназначена для получения вакуумного объема с характеристиками, обеспечивающими формирование, нагрев, удержание и наблюдение за плазменным шнуром.

Вакуумная камера выполняет следующие функции:

- обеспечивает физическую границу совместимую с созданием и поддержанием высокого вакуума;
- обеспечивает крепление внутрикамерных компонентов с учетом действующих на них нагрузок в рабочем и аварийных режимах работы установки;
- обеспечивает совместно с внутрикамерными элементами специфицированное электросопротивление в тороидальном направлении и вносит вклад в пассивную стабилизацию плазмы;

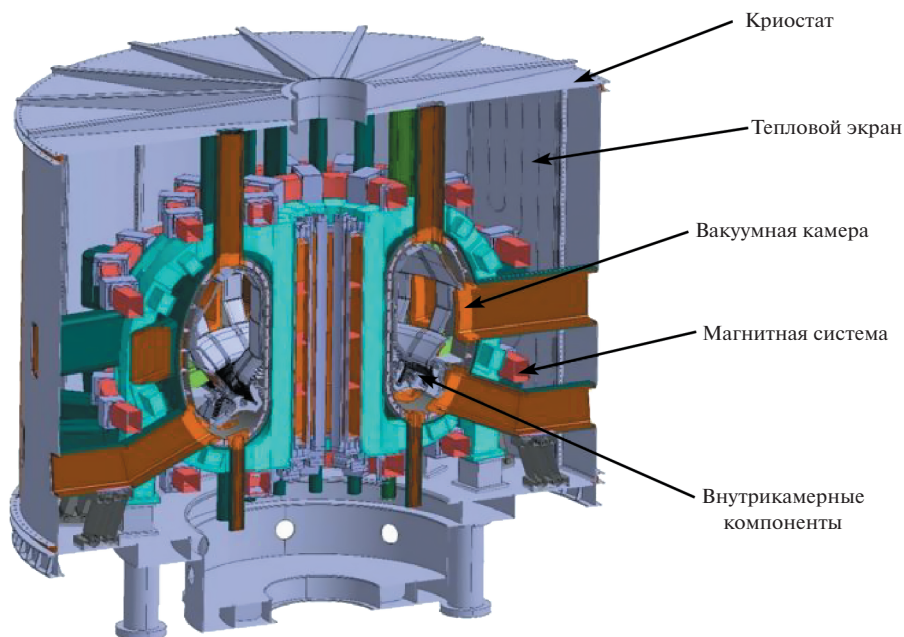


Рис. 1. Компонировка оборудования токамака TRT внутри криостата.

- обеспечивает доступ персонала для обслуживания внутрикамерных элементов и проходки для системы откачки, нагрева плазмы, диагностики;

- обеспечивает совместно с дивертором и другим оборудованием в патрубках необходимую радиационную защиту сверхпроводящей электромагнитной системы (ЭМС) на завершающей стадии работы установки;

- утилизирует объемное тепловыделение и тепловые потоки в пределах допустимых температур и напряжений;

- утилизирует остаточное тепловыделение всех внутрикамерных компонентов даже в условиях отсутствия их охлаждения.

ющие конструкцию, изготавливаются из нержавеющей стали аустенитного класса 304L, толщиной 30 мм. В каждом из 16-ти полоидальных сечений криостата на верхнем, экваториальном и

2. КРИОСТАТ

Криостат представляет собой цельносварную одностенную цилиндрическую оболочку, подкрепленную ребрами жесткости, внутри которой размещается: сверхпроводящая электромагнитная система, вакуумная камера, тепловая защита криостата и вакуумной камеры. Конструкция криостата воспринимает внешнее атмосферное давление, весовые и электромагнитные нагрузки, действующие на компоненты токамака TRT, установленные внутри криостата. Компонировка оборудования в криостате показана на рис. 1. Криостат на 16-ти опорах устанавливается на фундамент установки TRT. На рис. 2 показаны основные части криостата.

Цилиндрическая оболочка криостата, купол, опорный цилиндр и ребра жесткости, подкрепля-

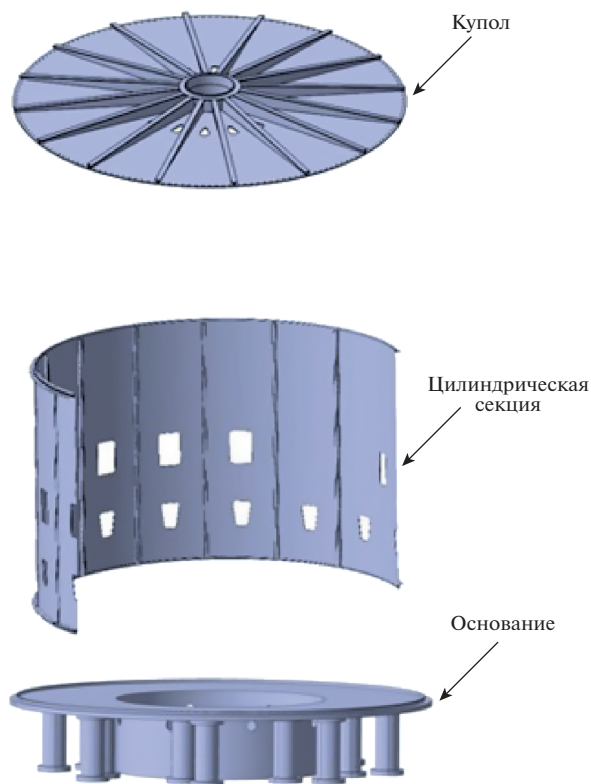


Рис. 2. Основные части криостата.

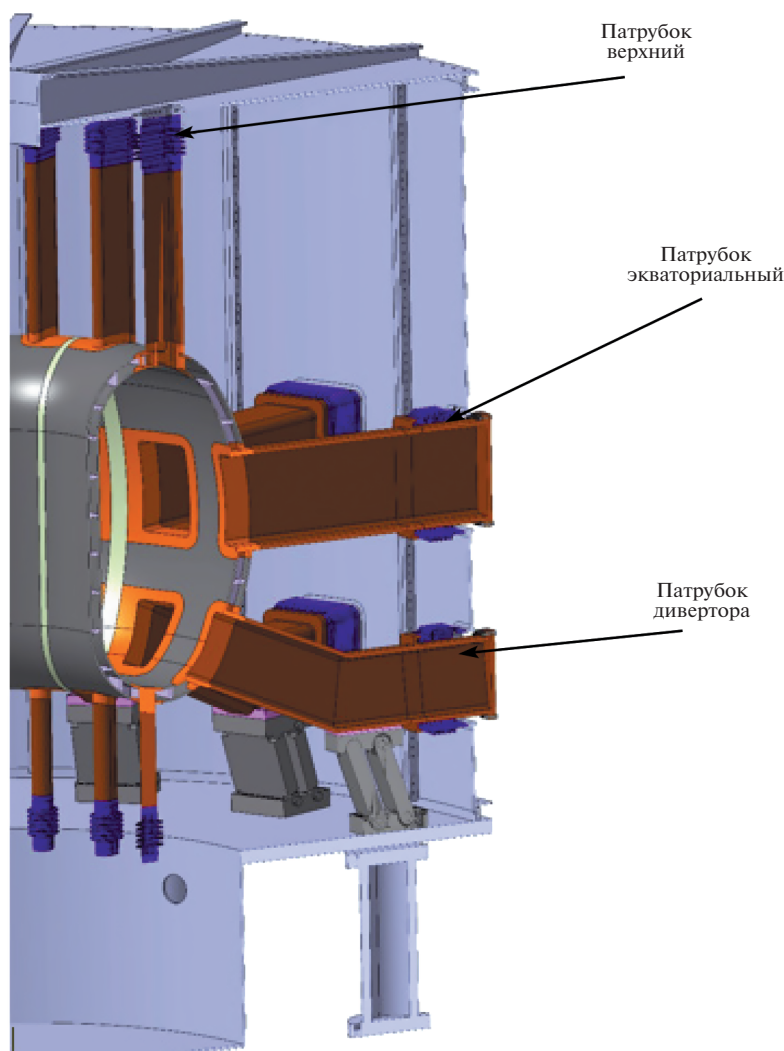


Рис. 3. Общий вид интерфейса криостата и вакуумной камеры.

диверторном уровнях установки TRT размещены проемы, оборудованные сильфонами, которые обеспечивают интерфейс криостата с патрубками вакуумной камеры. Общий вид интерфейса криостата и вакуумной камеры показан на рис. 3.

Криостат оснащен множеством малых патрубков для фидеров сверхпроводящих электромагнитов, системы криогенной и охлаждения/прогрева вакуумной камеры.

Наибольший диаметр криостата 12 м, высота 11 м, масса 317 тонн, объем 1170 м³. В криостате может быть обеспечен вакуум 1×10^{-4} Па.

3. ВАКУУМНАЯ КАМЕРА

В состав вакуумной камеры входят: корпус камеры, патрубки, опоры для крепления внутренка-

мерных компонентов (первая стенка, дивертор, ОГУП), опоры камеры.

Корпус вакуумной камеры, общий вид которого изображен на рис. 4, представляет собой цельносварную двустенную тороидальной формы конструкцию. Камера устанавливается на 16-ти опорах на несущую конструкцию основания криостата.

Внутренняя и наружная стенка толщиной 25 мм соединены сваркой между собой системой тороидальных и полоидальных ребер жесткости (рис. 5). В пространстве между стенками камеры циркулирует борированная вода, которая обеспечивает прогрев камеры до 170°C и в комбинации с блоками нейтронной защиты, расположенными на наружной поверхности камеры, снижает до допустимого уровня ядерный нагрев первых слоев сверхпроводника магнитной системы. В соответ-

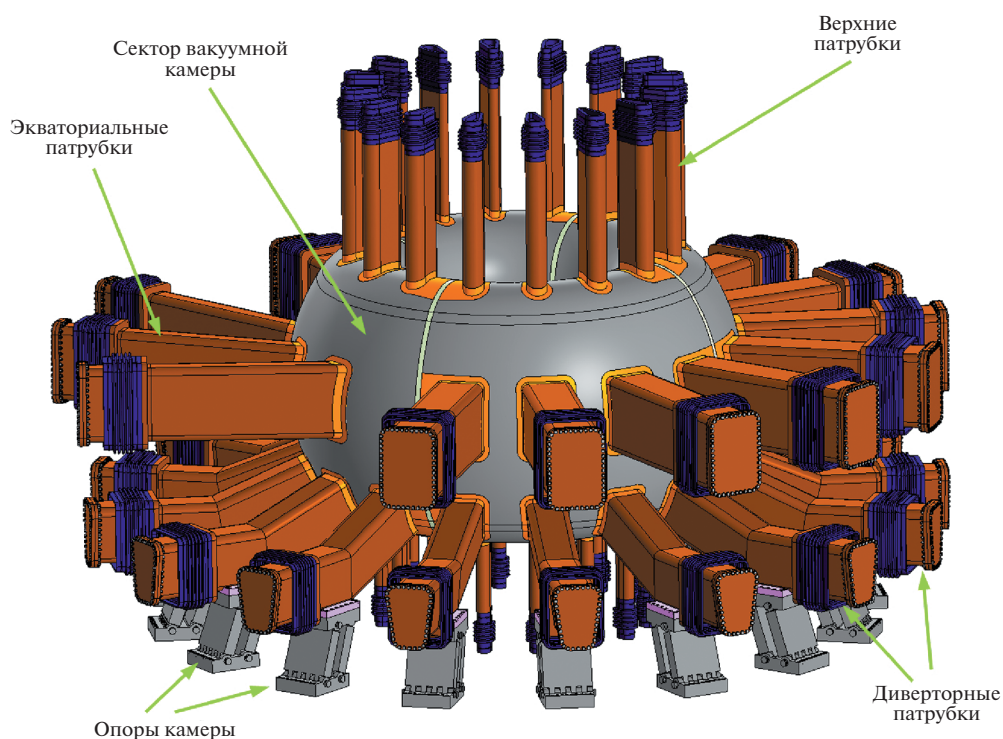


Рис. 4. Общий вид вакуумной камеры TRT.

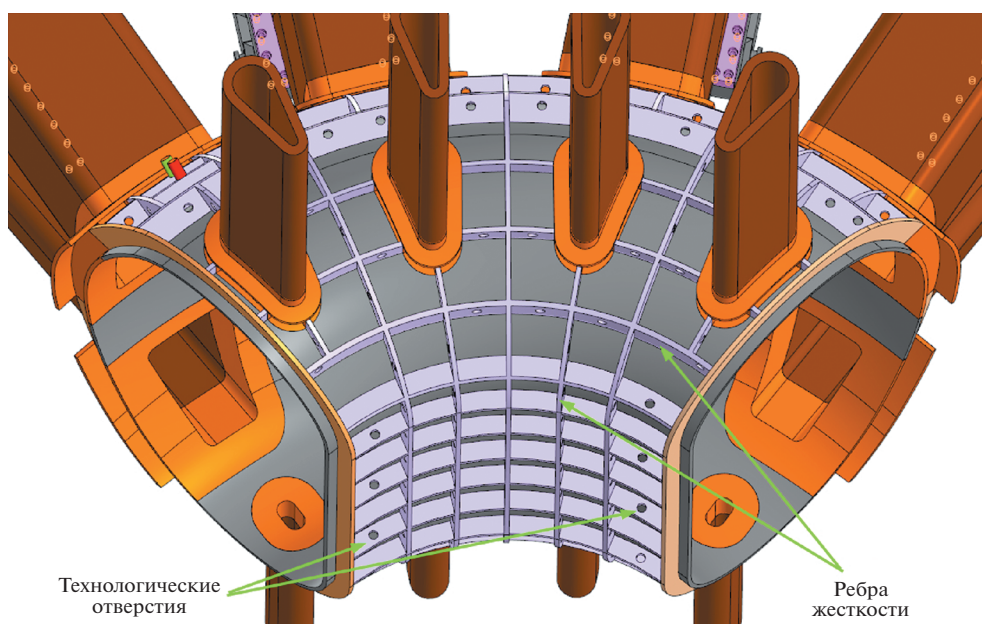


Рис. 5. Общее устройство внутренней части вакуумной камеры (наружная стенка камеры не показана).

ствии с выводами, приведенными в статье [2] при нейтронном потоке уровня 5×10^{17} н/с реакции D-D ядерный нагрев обмотки ОТП находится в допустимых пределах (1 мВт/см^3). Конфигурация

вакуумной камеры с нейтронной защитой на наружной поверхности показана на рис. 6.

По результатам анализа параметров нейтронной защиты и режимов работы установок DDT [3]

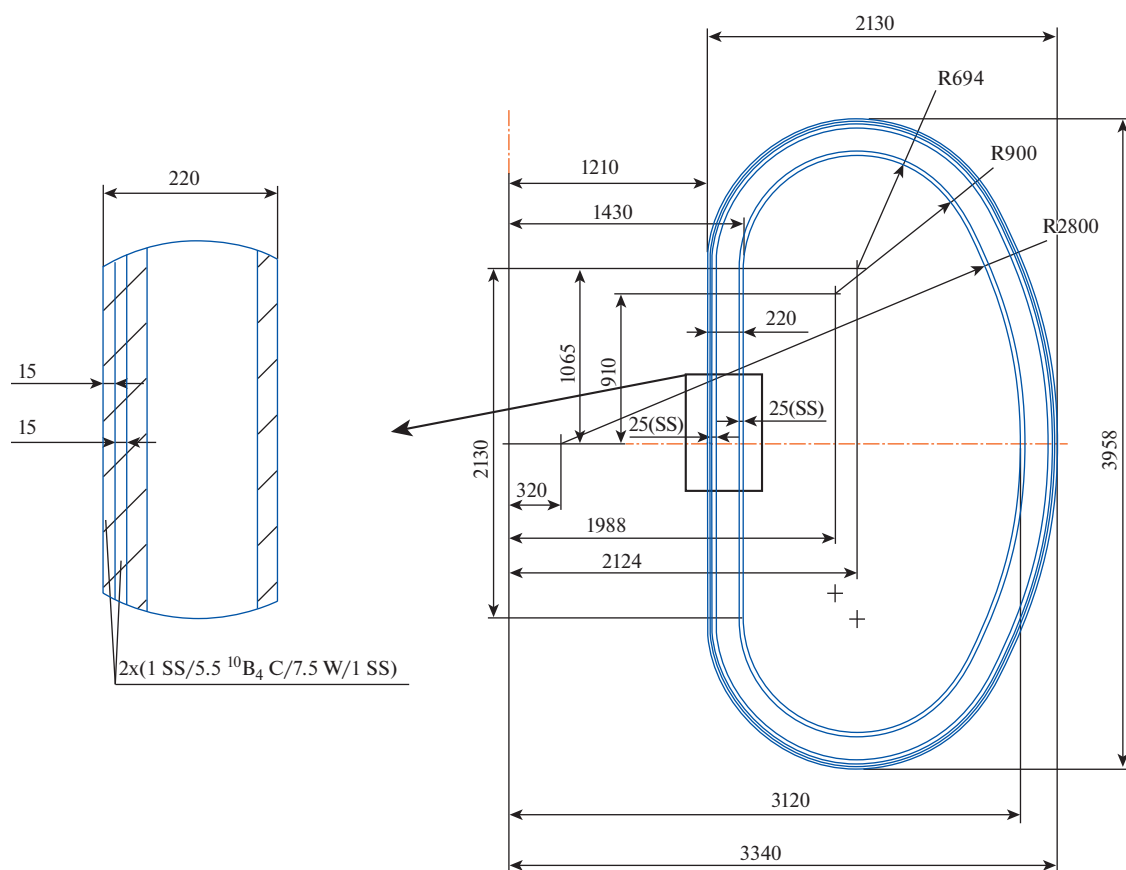


Рис. 6. Конфигурация вакуумной камеры с нейтронной защитой на наружной поверхности.

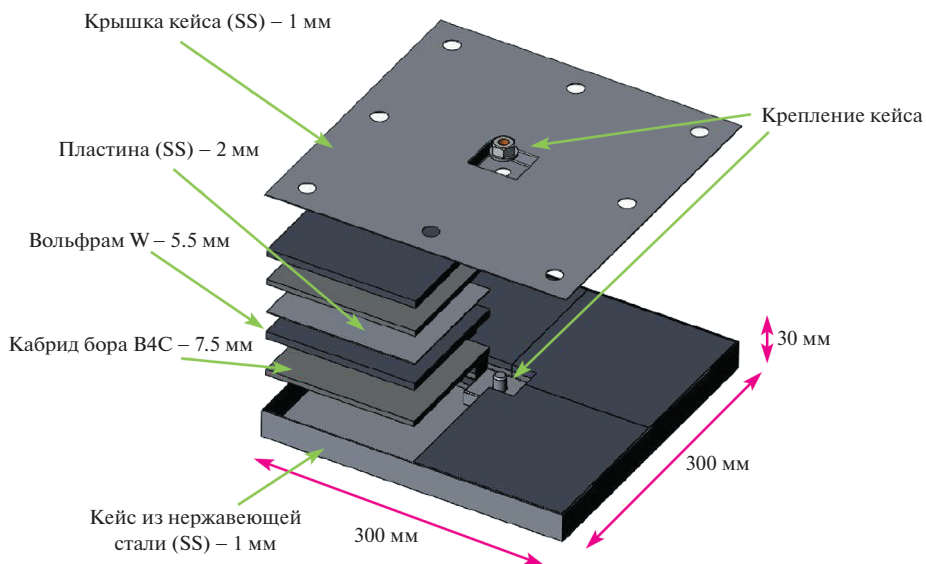


Рис. 7. Блок нейтронной защиты ВК TRT-2020 в кейсе из нержавеющей стали.

Таблица 1. Технические характеристики вакуумной камеры

Параметры	Величина
Основные размеры корпуса камеры	
– высота, м	3.85
– наружный диаметр, м	6.64
– внутренний диаметр, м	2.56
– толщина оболочек, мм	25
– толщина ребер, связывающих оболочки, мм	25
Количество секторов камеры для сборки на монтажной площадке, шт.	4
Площадь внутренней поверхности корпуса камеры, м ²	120
Объем камеры, м ³	70
Масса, т	
– корпус камеры с патрубками	300
Апертура и количество патрубков	
– экваториальные	11 шт. (1000 мм × 630 мм)
– верхние	16 шт. (500 мм × 100 мм)
– нижние для альтернативного дивертора	16 шт. (180 мм × 100 мм)
– инжекторные	3 шт. (350 мм × 1000 мм)
– диверторные	16 шт. (310/520 мм × 750 мм)
Рабочая температура камеры, °С	30 ± 0
Рабочее давление воды, МПа	1.0 ± 0.3
Температура прогрева (после разгерметизации), °С	170 ± 10
Давление воды в режиме прогрева, не более, МПа	1.0 ± 0.3
Предельное фоновое давление, Па	3 × 10 ⁻⁶

и JT-60SA [4], а также на основе расчетов, приведенных в работе [2], разработана конструкция блока нейтронной защиты, изображенная на рис. 7. Блок нейтронной защиты представляет собой кейс из нержавеющей стали толщиной 1 мм, в котором уложены чередующиеся между собой плитки карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (5.5 мм) и вольфрама W (7.5 мм). Габаритные размеры блока 300 мм × 300 мм при толщине 30 мм. Основные технические характеристики камеры приведены в табл. 1.

Вакуумную камеру составляют 4 одинаковых по габаритам, но разных по количеству патрубков секторов протяженностью 90 угловых градусов. Сектора свариваются между собой в единое целое на монтажной площадке, после предварительной сборки с 3-мя катушками тороидального поля.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концептуальные технические решения, предложенные в конструкции криостата и вакуумной камеры компактного токамака с реакторными

технологиями (TRT), базируются на основе опыта эксплуатации реакторов деления, брідерных реакторов, установок ТЯР в нашей стране, проектирования и создания международного реактора ИТЭР.

Разработанная конструкция криостата и вакуумной камеры обеспечивают эксплуатацию токамака TRT как при работе с водородной/гелиевой, так и дейтериевой плазмой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Е.Н. и др. // Физика плазмы. В печати.
2. Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Родионов Р.Н. // Физика плазмы. В печати.
3. Villari R., Angelone M., Caiiffi B., Colangeli A., Crisanti F. et al. Nuclear design of Divertor Tokamak Test (DTT) facility, Fusion Engineering and Design. 2020. V. 155. 111551.
4. Conceptual Design Report on JT-60SA. 21-4_Safety.pdf.