

УДК 533.9

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ TRT

© 2021 г. Э. Н. Бондарчук^{a, c, *}, А. А. Воронова^{a, c}, С. А. Григорьев^{a, c}, Е. Р. Запретилина^{a, c},
А. А. Кавин^{a, c}, Б. А. Китаев^{a, c}, О. А. Ковальчук^{a, c}, Н. М. Кожуховская^{a, c},
С. В. Коновалов^{b, c, **}, А. В. Красильников^{c, ***}, А. Н. Лабусов^{a, c}, И. И. Максимова^{a, c},
А. Б. Минеев^{a, c, d, ****}, В. П. Муратов^{a, c}, И. Ю. Родин^a, В. Н. Танчук^{a, c},
В. А. Трофимов^{a, c}, А. К. Чердаков^{a, c}, В. В. Черненко^{a, c}

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

^b Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

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

^d Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

**e-mail: konovalov_sv@nrcki.ru

***e-mail: A.Krasilnikov@iterrf.ru

****e-mail: min-anat@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Рассмотрены инженерно-технические аспекты создания электромагнитной системы (ЭМС) токамака с реакторными технологиями (Tokamak with Reactor Technologies – TRT) разработанной с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), представлены предложения в части конструктивных решений сверхпроводящего провода и обмоток ЭМС с учетом ряда ограничений, накладываемых системами и сценарными условиями TRT. Приведено краткое сравнение ЭМС TRT с рядом зарубежных проектов.

Ключевые слова: токамак, плазма, ВТСП, сверхпроводящий провод, ЭМС, магнитное поле, обмотка тороидального поля, обмотка управления, обмотка индуктора, обмотка горизонтального управляющего поля, катушка корректирующая

DOI: 10.31857/S0367292121110159

ВВЕДЕНИЕ

Проект ИТЭР, реализуемый международной кооперацией в течение более чем трех десятилетий, перешел в завершающую стадию. На ближайшие десятилетия результаты, полученные на разных этапах развития столь глобального проекта, станут основным источником реализации программ, в рамках которых предполагается создание установок управляемого термоядерного синтеза (УТС).

На разных стадиях реализации проекта ИТЭР были поставлены и решены, как теоретические задачи в области физики плазмы, так и прикладные (технологические) проблемы создания систем и компонентов сложнейшей электрофизической установки и, в частности, сверхпроводниковой ЭМС. Полученный опыт позволяет

определить направления дальнейшего развития и сформулировать требования к проводам и обмоткам сверхпроводниковых ЭМС будущих термоядерных реакторов, включая TRT.

Установка TRT предназначена для отработки технологий обеспечения длительного (свыше 100 с) разряда токамака-реактора при мощном нагреве плазмы. Основной целью разработки токамака реакторных технологий является интеграция в одной установке ключевых термоядерных технологий, связанных с созданием электромагнитной системы из ВТСП, мощной системы нагрева и неиндуктивной генерации тока, технологии дистанционного управления, системы охлаждения первой стенки и дивертора, а также других подсистем, совместимых с термоядерным реактором.

Таблица 1. Базовые характеристики токамаков TRT, SPARC, DTT и JT-60SA

	R_0 , м	a , м	k_{95}	B_{t0} , Тл	I_p , МА	P_{aux} , МВт	Плазма	Тип проводника	Длительность плато тока, с
TRT	2.15	0.57	1.8	7.5–8	5	40–50	D-D, D-T	ВТСП	100 (<10 D-T)
SPARC	1.85	0.57	1.75	12	8.7	11–24(*)	D-T, D-D	ВТСП	10
DTT	2.11	0.64	1.8	6	5.5	45	D-D	Nb ₃ Sn	100
JT-60SA	3	1.14	1.8	2.7	5.5(**)	41	D-D	NbTi, Nb ₃ Sn	100

Пояснения к таблице 1 и обозначения:

*)SPARC: значение мощности нагрева плазмы 11 МВт соответствует разряду в L-моду удержания, 24 МВт – в H-моду.

(**)JT-60SA: значение тока плазмы для полностью неиндуктивного режима $I_p = 2.3$ МА.

R_0 и a – большой и малый радиусы плазмы, k_{95} – вытянутость сечения плазмы, B_{t0} – тороидальное поле на оси плазмы, I_p – ток плазмы, P_{aux} – мощность нагрева плазмы.

Физические задачи, которые предполагается решить на токамаке TRT, изложены в работе [1]. Решение этих физических задач обусловлено необходимостью работы установки при больших значениях магнитного поля. Данная статья акцентирована на проблемах создания ЭМС TRT с сильным магнитным полем.

Применение ВТСП в обмотках ЭМС TRT призвано объединить преимущества компактного токамака с сильным полем и плотной плазмой в достижении высокой мощности термоядерных реакций с достоинствами больших установок в обеспечении значительного интегрального потока нейтронов.

Существенный прогресс параметров и практическое освоение технологий с использованием ВТСП-проводов на основе REBCO (rare-earth barium copper oxide) дают уникальную возможность создания ЭМС токамака с высоким магнитным полем, характеризуемым индукцией на оси плазмы B_{t0} масштаба 8–12 Тл. Основными техническими проблемами при этом являются разработка конструкции сверхпроводниковой ЭМС, использующей преимущества ВТСП, и выбор конструкционных материалов, способных воспринять электромагнитные нагрузки, возникающие в условиях сильных (более 7.5 Тл на оси разряда) магнитных полей.

В свою очередь, большие значения магнитного поля позволяют, при той же термоядерной мощности реакций в плазме, уменьшить размеры ЭМС и сделать ее более дешевой и компактной. Реализация такого подхода обеспечит продвижение к созданию промышленного термоядерного реактора в варианте использования как чисто реакций синтеза, так и гибридных (синтез-деление) систем [1].

При создании ЭМС TRT следует обратить внимание на возможность использования еще одной уникальной особенности ВТСП REBCO – широкого диапазона рабочих температур (5–

30 К). Это значительно упрощает криогенное обслуживание по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками (НТСП), у которых диапазон рабочих температур в высоких магнитных полях гораздо уже (5–8 К).

Разрабатываемая в настоящее время в России установка TRT [2], занимает свою нишу среди других, проектируемых и строящихся за рубежом токамаков со сверхпроводниковой магнитной системой (SPARC [3], DTT [4, 5], JT-60SA [6, 7]).

В разд. 1 кратко приведены особенности и некоторые параметры ЭМС указанных зарубежных проектов. В разд. 2 в сопоставительном ключе описано нынешнее состояние проектирования ЭМС токамака TRT.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТАХ TRT, SPARC, DTT И JT-60SA

Базовые характеристики токамаков TRT, SPARC, DTT и JT-60SA показаны в табл. 1. Вид сечений токамаков SPARC, JT-60SA и DTT показан на рис. 1. Некоторые технические параметры в токамаках TRT, SPARC, DTT и JT-60SA приведены в табл. 2.

Во всех проектах, указанных в табл. 1, предполагается использование дейтерия (в DTT, JT-60SA и TRT), а в проекте SPARC и на втором этапе в токамаке TRT – также и смеси дейтерия с тритием. Реакции D-D, D-T при нагреве плазмы приводят к появлению нейтронов синтеза, что делает необходимым применение защиты обмоток магнитного поля от нейтронов и гамма-излучения. Назначение защиты – снижение ядерного нагрева обмоток до допустимого уровня (~10 кВт на всю тороидальную обмотку) и предотвращение повреждения электрической изоляции в конструкции обмоток.

Электромагнитная система в токамаках является одной из основных, наиболее сложных и дорогостоящих систем токамака. Тип сверхпровод-

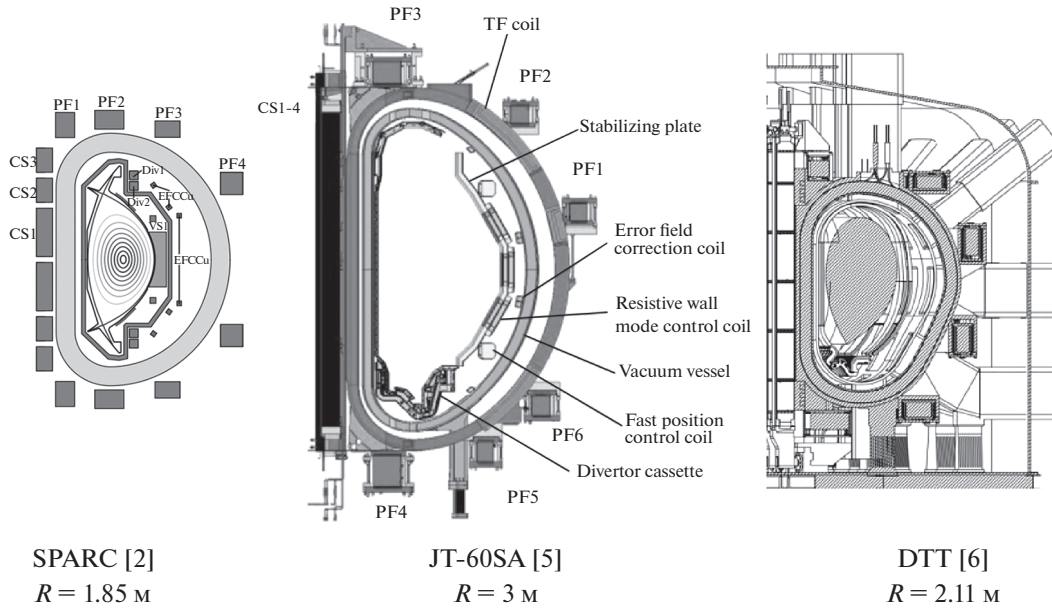


Рис. 1. Сечения токамаков SPARC, JT-60SA и DTT..

ника ЭМС, используемый в проектах SPARC, DTT и JT-60SA, различен, что во многом определяется проектной величиной магнитного поля (NbTi, Nb₃Sn или ВТСП на основе REBCO). Впервые сверхпроводниковые обмотки были использованы в отечественных токамаках Т-7 [8] и Т-15 [9].

Основное отличие ЭМС установок – уровень тороидального магнитного поля на оси плазмы: в TRT – до 8 Тл, в DTT – меньше (6 Тл), в JT-60SA – существенно меньше (менее 3 Тл), в SPARC – очень большое (12 Тл). При этом, если в TRT, DTT и JT-60SA предполагается достичь длительного более 100 с горения D-D-плазмы, то в SPARC при использовании D-T-плазмы ожидают получение мощного, но короткого импульса термоядерного энерговыделения (~140 МВт [3]). Указанные выше величины тороидального маг-

нитного поля на оси плазмы приводят к соответствующим значениям на обмотке и к различиям в выборе сверхпроводника тороидальной обмотки: NbTi (в JT-60SA), Nb₃Sn (в DTT) и ВТСП REBCO (в TRT и в SPARC).

2. ЭМС ТОКАМАКА TRT

ЭМС токамака TRT предназначена для иницирования, формирования и удержания в равновесии плазмы и корректировки рассеянных полей.

При проектировании ЭМС TRT для реализации базового индуктивного сценария плазменного разряда и в предположении существенного развития будущих ВТСП кабелей были приняты следующие допущения:

Таблица 2. Некоторые технические параметры в TRT, SPARC, DTT и JT-60SA

	B_{tc} , Тл	N_{TF}	j_{TF} , MA/m ²	δ_{ripple} , %	$\Delta_{Sh,i}$, см	Δ_{PL-TF} , см	$\Delta\Psi$, Вб
TRT	15	16	35	0.5	22	42	34
SPARC	21	18	60	0.2	8–17 ^(*)	17	42
DTT	12	18	27	0.5	12	25	43
JT-60SA	6.5	18	15	0.8	18.8	40	40

Обозначения к таблице 2:

B_{tc} – максимальная величина магнитного поля на тороидальной обмотке; N_{TF} – количество тороидальных катушек; j_{TF} – конструктивная плотность тока по внутренней ноге тороидальной катушки; δ_{ripple} – уровень гофрировки на наружном обводе плазмы; $\Delta_{Sh,i}$ – толщина защиты на внутреннем обводе; Δ_{PL-TF} – зазор между плазмой и ОТП; $\Delta\Psi$ – запас вольт-секунд.

(*) – минимальное значение соответствует защите, встроенной в вакуумную камеру, максимальное – защите, занимающей все пространство между плазмой и тороидальной обмоткой на внутреннем обводе.

– как основные обмотки ЭМС – обмотка тороидального поля (ОТП), обмотки индуктора (ОИ), обмотки управления (ОУ), так и корректирующие катушки (КК) являются сверхпроводниковыми из ВТСП;

– тороидальная обмотка охлаждается в ходе импульса. Мощность энерговыделения в тороидальной обмотке складывается из собственного нагрева ВТСП кабеля и ядерного нагрева от продуктов реакций синтеза в плазме (нейтроны и гамма-излучение) [10];

– вакуумная камера (ВК) – разборная, катушки OTP многovitковые – неразборные;

– средний радиус наружной тороидальной ноги выбран из условия допустимой гофрировки тороидального магнитного поля на наружном обводе плазмы δ_{ripple} , (см. табл. 2);

– количество тороидальных катушек N_{TF} определяется условием ввода мощности дополнительного нагрева с помощью инжекторов быстрых нейтральных атомов через косые патрубки (вдоль тора);

– наружный радиус внутренней тороидальной ноги определяется условием расположения между плазмой и тороидальной обмоткой ряда элементов суммарной толщиной (Δ_{PL-TF}): скрэп-слоя (SOL), первой стенки, двухслойной вакуумной камеры и защиты обмотки от нейтронного потока из плазмы и вторичного гамма-излучения, теплового экрана, а также необходимых конструктивных зазоров;

– допустимое удаление тороидальной обмотки от плазмы по вертикали определяется условиями размещения диверторных зон и вакуумной камеры;

– ограничения на величину гофрировки тороидального магнитного поля на внешней границе плазмы $\delta_{ripple} < 0.5\%$ при конечном выборе количества тороидальных катушек $N_{TF} = 16$ определило положение так называемой внешней ноги OTP;

– форма тороидальной обмотки принимается D-образной, близкой к безмоментной;

– полоидальные обмотки закреплены на тороидальных;

– кроме силовых сильноточных обмоток (ОТП, ОИ, ОУ) используется обмотка управляющего горизонтального поля (ОГУП) для быстрого управления положением плазмы по вертикали, а также корректирующие катушки – для юстировки общей конфигурации магнитного поля в установке. Ток по этим катушкам существенно меньше, чем по основным силовым. Катушки ОГУП являются теплыми (медный сплав), они расположены снаружи вакуумной камеры. Корректирующие катушки помещаются вне обмотки тороидального поля.

В качестве площадки для размещения TRT наиболее предпочтительной в настоящее время представляется площадка комплекса ТСП в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. С учетом ограничений, накладываемых размерами экспериментального зала, доступной энергетикой и имеющимися в наличии элементами инфраструктуры, выполненные итерации по выбору основных параметров установки привели к концепции токамака с большим радиусом $R_0 = 2.15$ м.

Приведем некоторые комментарии к принятым при проектировании ЭМС TRT решениям в сравнении с DTT, JT-60SA и SPARC:

– уровень гофрировки тороидального магнитного поля в TRT $\delta_{ripple} \sim 0.5\%$ тот же, что и в проекте DTT. Отметим, что в JT-60SA допускают существенно больший уровень гофрировки, близкий к ИТЭРовскому (0.8%). В проекте SPARC ориентируются на очень низкий уровень гофрировки $\sim 0.2\%$;

– количество катушек обмотки тороидального поля в проектах DTT, JT-60SA и SPARC $N_{TF} = 18$. В токамаке TRT эта величина немного снижена до $N_{TF} = 16$ из-за необходимости размещения косых тангенциальных патрубков для инъекции. Большой радиус R_0 SPARC несколько меньше, чем в TRT (1.85 м в SPARC против 2.15 м в TRT), однако в SPARC не используется инъекция быстрых атомов, а в качестве основного метода нагрева предполагается применить ионно-циклотронный нагрев с помощью антенн, расположенных внутри вакуумной камеры [11]. В JT-60SA радиус тора довольно большой – 3 м и проблем с трассировкой пучков быстрых нейтралов из инжекторов не возникает;

– сопоставление уровня токов по проводу обмотки тороидального поля, центрального соленоида и обмоток тороидального поля приведено в табл. 3. Для проекта SPARC такой детальной проработки с указанием токов по проводу в TF, CS и PF пока нет. Как следует из данных табл. 3, уровень токов по проводу в TRT существенно (в 2–3 раза) превышает принятый в DTT и JT-60SA;

Таблица 3. Уровень токов по проводу в проектах TRT, SPARC, DTT и JT-60SA

	I_{npTF} , кА	I_{ITF} , кА	I_{npCS} , кА	I_{npPF} , кА
TRT	74	5160	60	45
SPARC		6200		
DTT	27	3500	28	≤ 29
JT-60SA	26.5	2250	20	20–21

Обозначения в таблице 3: I_{npTF} – ток в проводнике OTP, I_{ITF} – ток в катушке OTP, I_{npCS} – ток в проводнике обмотки индуктора, I_{npPF} – ток в проводнике полоидальной катушки.

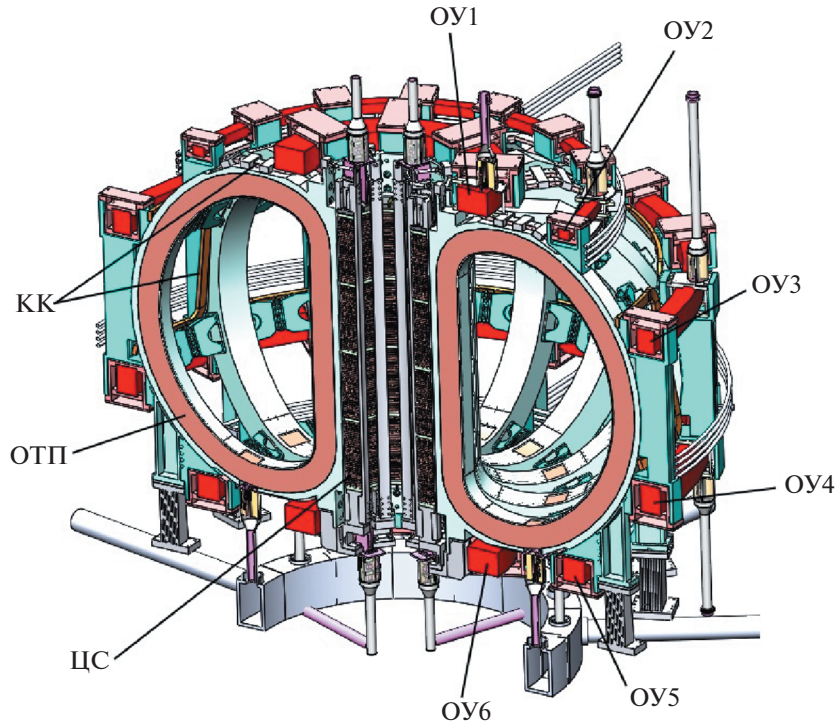


Рис. 2. Общий вид ЭМС TRT.

– величины токов по одной катушке тороидального поля $I_{TF} = 2\pi B_0 R_0 / \mu_0 N_{TF}$ приведены в табл. 3.

Общий вид ЭМС токамака TRT приведен на рис. 2.

ЭМС TRT включает в себя:

– 16 D-образных катушек ОТП, равномерно распределенных вдоль окружности тора и формирующих тороидальное магнитное поле. D-образная форма катушек ОТП не является классически безмоментной. Она обусловлена в основном конфигурацией плазменного шнура, габаритными размерами вакуумной камеры с дивертором, требованиями к гофрировке и инжекции;

– 6 обмоток управления. Их положение определяется размерами патрубков и опорной системой для ЭМС;

– 4 обмотки индуктора;

– 24 корректирующие катушки (8 верхних, 8 нижних и 8 боковых);

– 4 катушки обмотки горизонтального управляющего поля;

– 2 катушки для качания сепаратриссы в диверторе [12].

Размеры подсистем токамака по большому радиусу в экваториальной плоскости показаны на рис. 3.

Посредством механических силовых структур ЭМС объединена в жесткую интегрированную сборку.

Выбор типа обмоточного провода для ЭМС TRT

Для токамака TRT принято решение о конструировании всех основных обмоток ЭМС с использованием одного типа сверхпроводника – ВТСП REBCO. Решение касается как ОТП и центрального соленоида с максимальным магнитным полем до 15 Тл, так и обмоток управления с полем до 6.5 Тл. Это связано с единым подходом как к организации эксплуатации криогенной системы (одинаковый рабочий диапазон по температуре сверхпроводника), так и к организации защитного вывода энергии из сверхпроводниковых обмоток в случае их перехода в нормальное состояние.

На данном этапе проектирования и анализа ЭМС TRT для всех обмоток (ОТП, ОИ и ОУ) рассмотрены варианты проводов, отвечающие следующим требованиям:

– конструктивное исполнение: “кабель-в-оболочке” – транспонированные сверхпроводящие субкабели в требуемом количестве помещены в силовую теплопроводящую структуру и заключены в герметичную оболочку из нержавеющей стали;

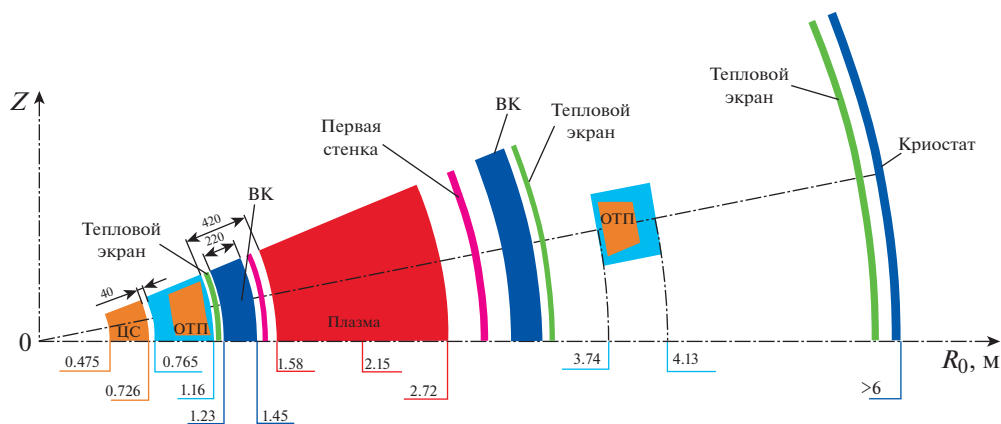


Рис. 3. Размеры подсистем TRT по большому радиусу.

— по механическим свойствам, тепло- и электропроводности материал силовой структуры кабеля должен быть аналогичен серебро-содержащей меди;

— провод охлаждается косвенно потоком хладагента, прокачиваемого через отверстие в центре силовой структуры;

— в качестве субкабелей, размещаемых в силовой структуре, используются скрутки ВТСП-2 лент типа CORC (Conductor on Round Core) [13–15]. Возможность применения других конструкций субкабелей обсуждаются в работе [17].


Высокая плотность тока и небольшие размеры субкабелей типа CORC [13–15], представляющих собой компактную скрутку лент на медном формере, дают определенную свободу в выборе конфигурации, размеров и рабочего тока обмоточных проводов ЭМС. Из публикаций, посвященных данной теме, доступна информация о токовых, механических и диссипативных характеристиках. Уже изготовлены и испытаны образцы CORC, которые предполагается использовать в качестве субэлементов сильноточных высокопотенциальных обмоточных проводов установок УТС.

В табл. 4 приведены технические характеристики субкабеля типа CORC, предложенного в качестве базового варианта, на начальных этапах проектирования и анализа ЭМС TRT.

Следует подчеркнуть, что варианты проводов, рассмотренные при проектировании и анализе обмоток ЭМС TRT, представляют собой условные конструкции, возможность применения которых требует как теоретического, так и экспериментального подтверждения. Это касается как использования субкабелей типа CORC, так и конструкции провода в целом. Однако предложенные конструкции проводов отвечают заявленным целям проектирования ЭМС TRT, опираются на единственный в своем роде опыт разработки и квалификации проводов ЭМС ИТЭР и, что немаловажно на начальной стадии проектирования, позволяют без принципиальных изменений конструкции регулировать технические характеристики обмоточных проводов за счет: а) материала и конструкции структурных элементов, количества используемых субкабелей типа CORC; б) числа ВТСП-2 лент, составляющих субкабель; в) рабочего тока ленты и другое.

В результате, задание явным образом параметров и характеристик провода, несмотря на некоторую условность его конструкции, позволяет ставить и решать задачу разработки обмоток ЭМС TRT в полном объеме, включая электромагнитный и термогидравлический анализ, расчет сил и подтверждение механической устойчивости силовых конструкций в сценарных условиях.

Таблица 4. Типовые параметры субкабеля типа CORC

 <p>CORC Wire Ø 2–4 мм</p>	<p>Субкабель – аналог CORCW7 ([9]) Диаметр формера – 2.55 мм Ширина лент – 2 и 3 мм Толщина подложки – 30 мкм Внешний диаметр – 4.5 мм Площадь сечения – 15.9 мм² Hastelloy – 35%, медь – 44%</p>
---	--

Более того, требования к критическим характеристикам ленты, конструктивной плотности тока кабеля, к площади сечения и характеристикам несверхпроводящих элементов кабеля, к диссипативным характеристикам провода и условиям криогенного обеспечения обмотки, полученные в результате анализа ЭМС из расчетного провода, остаются справедливыми для проводов любой реальной конструкции.

Для оценки токонесущей способности субкабелей типа CORC и провода в целом были взяты близкие к рекордным характеристики ВТСП-2 лент [17], изготавливаемых российской компанией ЗАО “СуперОкс”. Результаты измерений критического тока для ленты шириной 4 мм представлены на рис. 4.

Рабочие токи обмоточных проводов ЭМС токамака TRT были выбраны с запасом – таким, чтобы при “наихудших” сценарных условиях (по магнитному полю и температуре) рабочий ток оставался меньше критического.

При разработке обмоточных проводов для сверхпроводниковых ЭМС важнейшим этапом является выбор температуры “рабочей точки”. Для ее определения впоследствии потребуются проведение термогидравлического анализа ЭМС токамака TRT в целом с полноценным моделированием динамики тепловыделений. Предварительные расчеты потерь энергии в обмоточных проводах, оценка мощности тепловыделений и анализ возможностей вывода тепла из обмоток показали, что выбор рабочей точки должен быть выполнен с учетом сценарных условий работы TRT, вызывающих изменение температуры провода ЭМС на 10–15 К.

Основные расчетные характеристики обмоточных проводов ЭМС токамака TRT представлены в табл. 5. Рабочая точка для каждого из проводов задана набором следующих параметров: а) максимальная индукция магнитного поля; б) рабочий ток в ВТСП-2 ленте, заданный на миллиметр ширины ленты; в) отношение рабочего тока провода к критическому для “реперных” точек рабочих сценариев установки – параметр, характеризующий запас по току.

Следует обратить внимание на две важные особенности использования ВТСП для обмоточных проводов ЭМС токамака TRT. Во-первых, использование ВТСП дает возможность выбора запаса по температуре, обеспечивающего стабильную работу установки во всех сценарных режимах. Это не исключает необходимости мониторинга состояния ЭМС, более того, проблеме диагностики в дальнейшем придется уделить особое внимание, также, как и вопросу организации защитного вывода энергии из систем со столь высокими плотностями энергии как у разрабатываемой ЭМС токамака TRT. В выбранных для пред-

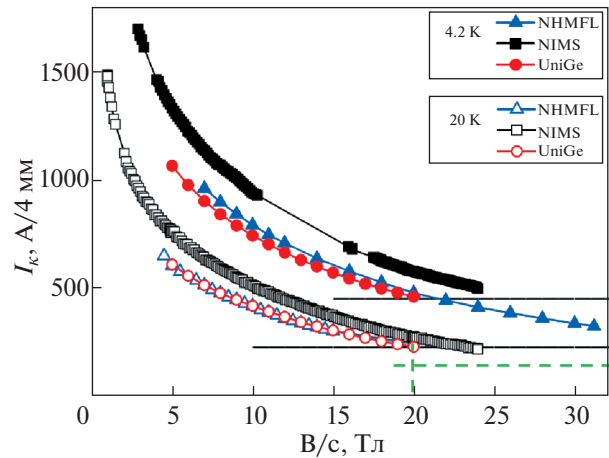


Рис. 4. Критический ток ВТСП-2 ленты, производства компании СуперОкс.

варительного анализа конструкциях провода количество нормально проводящего материала достаточно для того, чтобы при защитном выводе энергии температура кабеля не превышала 200 К, а электрическое напряжение на обмотке составляло не более 10 кВ. При расчете учитывалась электропроводность силовой структуры провода, выполненной из серебросодержащей меди (площадь поперечного сечения 215–245 мм²) и медных элементов субкабелей (площадь поперечного сечения 40–56 мм²).

Во-вторых, для ВТСП магнитных систем характерным является очень высокий уровень потерь энергии в изменяющемся магнитном поле. Речь, в первую очередь, идет о потерях на гистерезис для компоненты магнитного поля, ориентированной перпендикулярно поверхности ВТСП ленты. По результатам расчетов, выполненных для рабочего сценария токамака TRT в обмоточном проводе ОИ ЭМС, суммарные тепловыделения за цикл работы установки, включающий фазы “Подъема тока”, “Пробоя”, “Горения” и “Вывода тока”, находятся на уровне 4000 Дж/м для внутреннего витка и 70 Дж/м для внешнего витка галеты обмотки ОИ. Эти результаты согласуются с оценками тепловыделений для прототипа кабеля CS/TF установки EU-DEMO [18] приведенных в статье [19] и представленных в табл. 6.

В связи с этим становится уместным мнение одного из экспертов [20]: “Большой запас по температуре для магнитов, работающих в изменяющемся магнитном поле, привлекателен только тогда, когда нам доступны криогенные мощности, способные эти потери отвести”. Из чего следует, что одним из определяющих факторов

Таблица 5. Основные характеристики обмоточных проводов ЭМС токамака TRT

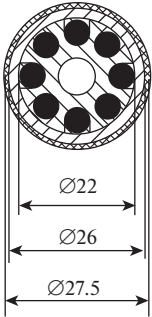
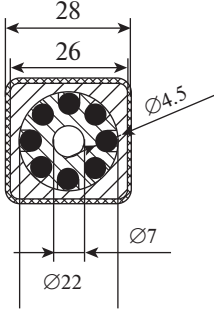

<p>Обмотка тороидального поля (ОТП):</p> <p>Индукция магнитного поля на проводе – 15 Тл Рабочий ток в ленте – 74 А/мм Отношение рабочего тока (I_p) провода к критическому (I_k):</p> <ul style="list-style-type: none"> – I_p/I_k ($T = 5$ К “на входе”) – 0.6 – I_p/I_k ($T = 10$ К “целевой”) – 0.7 – I_p/I_k ($T = 15$ К “минимальный”) – 0.82 <p>Число субкабелей – 8 Рабочий ток субкабеля – 9435 А Рабочая плотность тока по субкабелю – 590 А/мм²</p>	 <p>Рабочий ток провода – 74 кА Рабочая плотность тока:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по проводу в тонком кожухе – 140 А/мм² – по обмотке (центральная галета в радиальной пластине) – 70 А/мм²
<p>Обмотки индуктора (ОИ):</p> <p>Индукция магнитного поля на проводе – 15 Тл Рабочий ток в ленте – 60 А/мм Отношение рабочего тока провода к критическому:</p> <ul style="list-style-type: none"> – I_p/I_k ($T = 5$ К “на входе”) – 0.5 – I_p/I_k ($T = 10$ К “целевой”) – 0.6 – I_p/I_k ($T = 20$ К “минимальный”) – 0.8 <p>Число субкабелей – 8 Рабочий ток субкабеля – 7650 А Рабочая плотность тока по субкабелю – 480 А/мм²</p>	 <p>Рабочий ток провода – 60 кА Рабочая плотность тока:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по проводу без изоляции – 89 А/мм² – по обмотке – 77 А/мм²
<p>Обмотки управления (ОУ):</p> <p><u>ОУ1, ОУ6</u></p> <p>Индукция магнитного поля на проводе – 6.5 Тл Рабочий ток в ленте – 120 А/мм Количество лент в субкабеле – 25 Отношение рабочего тока провода к критическому</p> <ul style="list-style-type: none"> – I_p/I_k ($T = 5$ К “на входе”) – 0.6 – I_p/I_k ($T = 15$ К “минимальный”) – 0.8 <p><u>ОУ3, ОУ4, ОУ5</u></p> <p>Индукция магнитного поля на проводе – 5 Тл Рабочий ток в ленте – 130 А/мм Количество лент в субкабеле – 23 Отношение рабочего тока провода к критическому</p> <ul style="list-style-type: none"> – I_p/I_k ($T = 5$ К “на входе”) – 0.5 – I_p/I_k ($T = 15$ К “минимальный”) – 0.75 	 <p>Рабочий ток провода – 45 кА Рабочая плотность тока:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по проводу без изоляции – 57 А/мм² – по обмотке – 41 А/мм²

Таблица 5. Окончание

<p>ОУ2</p> <p>Индукция магнитного поля на проводе – 2.5 Тл</p> <p>Рабочий ток в ленте – 150 А/мм</p> <p>Количество лент в субкабеле – 20</p> <p>Отношение рабочего тока провода к критическому</p> <p>– I_p/I_k ($T = 5$ К “на входе”) – 0.5</p> <p>– I_p/I_k ($T = 15$ К “минимальный”) – 0.65</p> <p>Число субкабелей – 6</p> <p>Рабочий ток субкабеля – 7650 А</p> <p>Рабочая плотность тока по субкабелю – 480 А/мм²</p>	
--	--

Таблица 6. Оценки потерь энергии для прототипа кабеля CS и TF установки EU-DEMO

Режим изменения магнитного поля		Потери, Дж/м	
амплитуда, Тл	скорость, Тл/с	гистерезис	кооперативные
от +16 до –16	0.2–0.3	1200	70
от +16 до +15	1–2	35	90
от +15 до –2	0.04–0.06	610	150
от –2 до –16	0.002	600	1.2

выбора концепции обмоточных проводов для ЭМС токамака TRT становится выбор адекватной системы криогенного обеспечения (СКО).

В качестве заключения можно отметить сложность задач, стоящих перед разработчиками и производителями проводов ЭМС токамака TRT. Переход от условных, использованных для целей проектирования токонесущих элементов к реальным конструкциям из ВТСП потребует большого количества расчетных и экспериментальных работ. Варианты конструкций субкабелей, кабелей и проводов могут быть разные, но все они должны отвечать конструктивным требованиям, вытекающим из результатов анализа и проектирования ЭМС токамака TRT. Проблемы токонесущей способности, тепловыделений и механической прочности разрабатываемых субкабелей должны решаться в соответствии с ограничениями по геометрии и возможностями криогенного охлаждения проводов. Последние, в свою очередь, необходимо разрабатывать в понимании предельно жестких условий работы обмоток ЭМС токамака TRT. Предложенные в данной статье решения должны стать своеобразным каркасом, опираясь на который разработчики реальных проводов должны выйти на качественно новый уровень в части токонесущей способности в рабочей точке с заданными температурой и магнитным полем.

*Обмотка тороидального поля TRT,
сопоставление с ОТП в DTT и JT-60SA*

В конструкциях тороидальных обмоток проектов DTT и JT-60SA с одной стороны и TRT с другой имеется принципиальное отличие. Сечение внутренней тороидальной ноги и расположение проводов в проекте TRT показаны на рис. 5, а для DTT и JT-60SA – на рис. 6.

Использование радиальных пластин в обмотке тороидального поля установки TRT (см. рис. 5, справа), как и в проекте ИТЭР, позволяет индивидуально опереть каждый провод на радиальную пластину и тем самым избежать “кумулятивного” эффекта в клиновой части сечения обмотки, вызванного тем, что электромагнитные силы направлены к оси установки и стремятся “вдавить” провода друг в друга в радиальном направлении. Плотность тока в обмотке тороидального поля такова, что без радиальных пластин в проводах, находящихся ближе к оси, механические напряжения существенно превосходят допускаемые величины. Альтернативой радиальным пластинам является секционирование обмотки, но и в этом случае в клиновой области обмотки механические напряжения могут превышать допускаемые. В качестве материала для изготовления радиальных пластин планируется сталь 03X20H16AG6, характеризующаяся более высокими механическими свойствами по сравнению со сталью AISI 316LN.

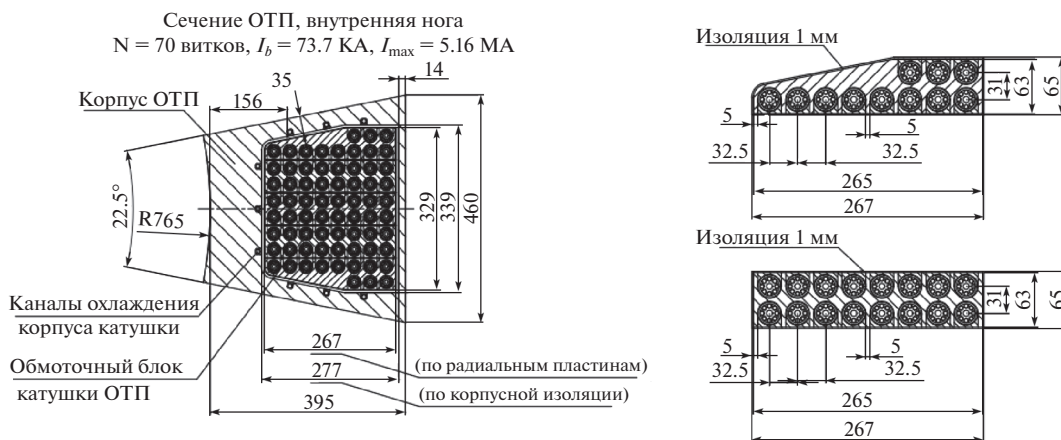


Рис. 5. Общий вид сечения тороидальной обмотки TRT на внутреннем обводе (слева), конструкция наружной и внутренней радиальной пластины (справа). Показан вид кабеля ВТСП круглой формы.

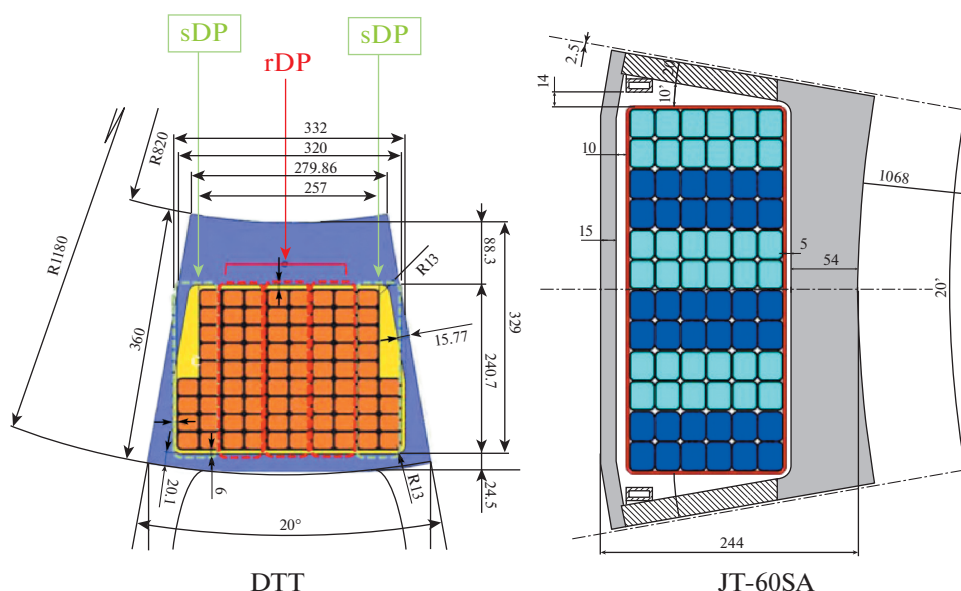


Рис. 6. DTT и JT-60SA: общий вид сечения тороидальной обмотки на внутреннем обводе. Показан вид кабеля НТСП прямоугольной формы.

В случае DTT и JT-60SA напряжения неоднородны, по механике такие обмотки сложнее, но по технологии исполнения проще. При проектировании установки TRT с целью защиты внутренней части сверхпроводниковой ОТП от нейтронного потока уровня 5×10^{17} н/с размеры вакуумной камеры на внутреннем обводе составляют 220 мм, включая защиту. Согласно выводам, приведенным в статье [10], при использовании D-T-реакции уровень тепловыделения на “внутренней ноге” ОТП может достигать значений 30 мВт/см^3 , в результате чего, как показывают оценки (см. рис. 7), корпус ОТП нагреется до температур 20–25 К за 20–30 с.

В табл. 5 показано поперечное сечение провода ОТП для установки TRT.

Обмоточный блок содержит 70 витков провода. При этом величина тока в проводе $I_B = 73.7 \text{ кА}$, в катушке $I_{w_{\text{кат}}} = 5.16 \text{ МА}$. Обмоточные блоки катушек ОТП заключены в массивные корпуса из листовой немагнитной стали, образуя, совместно с силовыми элементами, замкнутую механическую структуру. При анализе силовой конструкции ОТП были заложены прочностные свойства сталей, применяемых для аналогичных элементов ЭМС ИТЭР. Однако условия работы TRT приводят к необходимости применения более

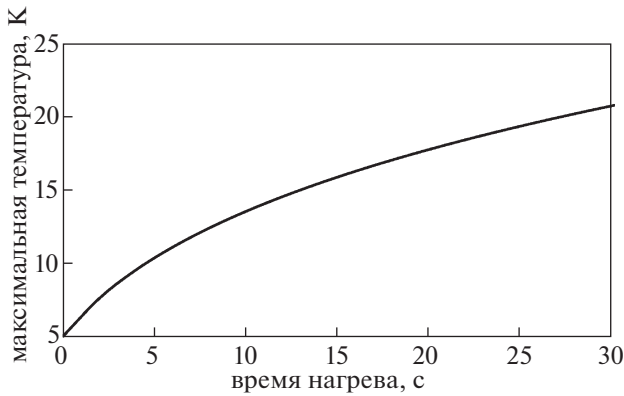


Рис. 7. Динамика максимальной температуры корпуса ОТП токамака TRT при воздействии радиационной нагрузки.

прочных нержавеющей, немагнитных сталей для корпусов ОТП и радиальных пластин.

Обмоточный блок катушки ОТП, состоящий из пяти двухслойных секций и помещенный внутрь стального корпуса, воспринимающего электромагнитные силы, действующие на катушку, имеет общую для всего пакета секций корпусную электрическую изоляцию, рассчитанную на 8 кВ (напряжение, возникающее на катушках при быстром аварийном выводе энергии магнитного поля из ОТП). Изоляция состоит из слоев полиимидной и стеклянной лент, пропитанных вакуумно-нагнетательным способом смесью цианатэс-

теровой и эпоксидной смол, обеспечивающих высокую радиационную стойкость.

Для поддержания температуры корпуса катушки ОТП на уровне 5–15 К в его внутренней части со стороны обмоточного блока предусмотрены каналы, в которых располагаются трубки с внутренним диаметром 10 мм для прокачки гелия (табл. 5). Свободное пространство между трубкой и стенками канала заполняется присадочным материалом с высокой степенью теплопроводности, каналы с трубками по всей длине завариваются крышкой толщиной 5 мм.

“Арочный распор”, образуемый прямолинейными частями катушек во внутренней части тора (рис. 8), воспринимает центростремительную силу около 94 МН, действующую на каждую катушку. Наружные межблочные структуры образуют четыре кольца в тороидальном направлении и выступают в качестве панелей сдвига в сочетании с корпусами катушки ОТП.

Гравитационные опоры, воспринимающие вес компонентов электромагнитной системы, показаны на рис. 9 и 10. Опоры являются частью корпуса ОТП и расположены в районе наружного радиуса корпуса на расстоянии 3.6 м от центральной оси между полоидальными катушками ОУ4 и ОУ5 и состоят из жесткой и гибкой вертикальных частей, имеющих болтовое соединение. Кроме того, между опорными площадками жесткой и гибкой частей установлены конические штифты, как в радиальном, так и в тороидальном направлении.

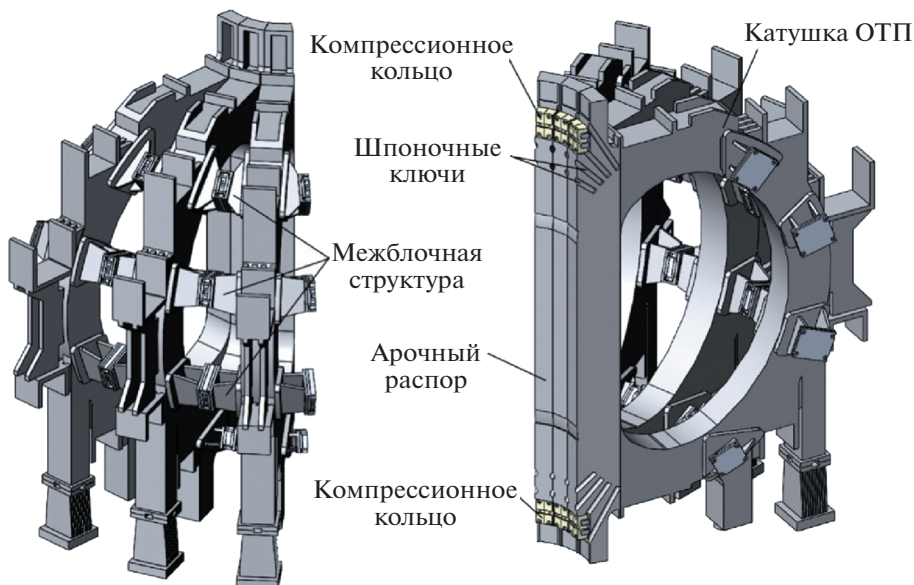


Рис. 8. Общий вид расположения элементов на корпусе катушки ОТП токамака TRT для восприятия силовых нагрузок.

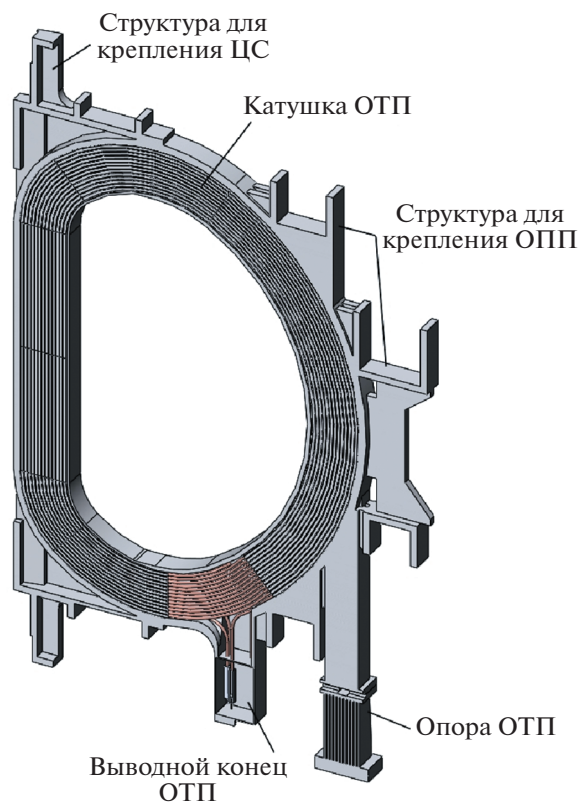


Рис. 9. Общий вид катушки ОТП.

Индуктор

Обмотка индуктора представляет собой самонесущую конструкцию, выдерживающую все действующие на нее магнитные нагрузки за счет структурных материалов и, в основном, за счет материала оболочки провода, которым она намотана. Основной нагрузкой являются электромагнитные силы, которые создают окружные растягивающие напряжения в материале провода. Кроме того, на модули соленоида действуют вертикальные составляющие электромагнитных сил. Максимальное поле на оси центрального соленоида $B_{CS,max} = 14$ Тл.

Индуктор показан на рис. 11, а некоторые его параметры приведены в табл. 7. Индуктор устанавливается в вертикальной “шахте”, образованной прямолинейными частями корпусов катушек ОТП, состоит из четырех одинаковых электрически-независимых обмоток, а каждая обмотка, в свою очередь, из нескольких секций, исходя из возможной длины провода. Каждая обмотка индуктора питается от своего источника тока.

Провод для индуктора выполнен по типу “кабель-в-оболочке”. Восемь ВТСП-2 субкабелей заключены в матрицу из серебросодержащей меди или бронзы и охлаждаются гелием при температуре 5–20 К, который прокачивается через центральный канал. Матрица, в свою очередь, располагается внутри стального кейса (табл. 5). Выбор прочной серебросодержащей меди (или материала, аналогичного по тепло- и электропроводности и по прочностным свойствам) обусловлен значительными механическими напряжениями в матрице и позволяет ей выполнять силовую функцию внутри оболочки провода индивидуально поддерживая каждый субкабель.

В центре провода расположен канал охлаждения для прокачки гелия. Провод имеет межвитковую изоляцию, состоящую из нескольких слоев полиимидной пленки и стеклоленты. Для компенсации возможных отклонений по диаметру и по толщине предусмотрены регулировочные изоляционные прокладки. Секции собирают в отдельную обмотку индуктора, осуществляют их электрические соединения и формируют фидеры

Общим основанием опор всех 16 катушек ОТП служит опорная конструкция. Весовые и динамические нагрузки от электромагнитной системы передаются через опорную конструкцию на фундамент здания через 16 цилиндрических опорных колонн.

Тепловые нагрузки от опорного кольца, имеющего комнатную температуру, перехватываются тепловыми развязками на гибких опорах, представляющими собой змеевики с охлаждающими каналами, по которым прокачивается жидкий азот или газообразный гелий при температуре 80–100 К. В дополнение к тепловым развязкам на гибких опорах установлены пластины теплового экрана, перехватывающие тепловое излучение на опору.

Таблица 7. Основные параметры обмоток индуктора токамака TRT

	R , м	Z , м	ΔR , м	ΔZ , м	$N_{\text{витк}}$	AW_{max} , МА	B_{max} , Тл
ОИ2_В	0.600	1.545	0.251	0.982	256	11.7	14
ОИ1_В	0.600	0.515	0.251	0.982	256	14.5	14
ОИ1_Н	0.600	-0.515	0.251	0.982	256	11.9	14
ОИ2_Н	0.600	-1.545	0.251	0.982	256	11.7	14

Обозначения в таблице 7: ОИ – обмотка индуктора, R – средний радиус катушки, Z – расстояние от центра плазмы до центра катушки, ΔR – ширина катушки, ΔZ – высота катушки, $N_{\text{витк}}$ – количество витков в катушке, AW – ампер-витки, B_{max} – максимальное поле.

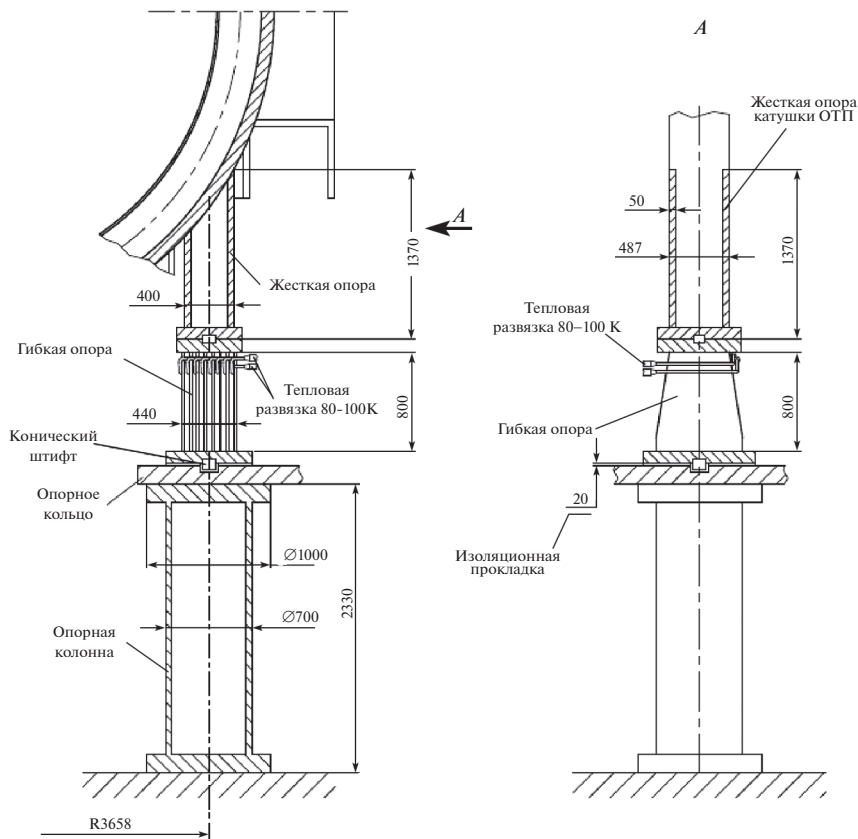


Рис. 10. Опора электромагнитной системы TRT.

для подвода гелия; после этого производят наложение корпусной изоляции толщиной 10 мм. Изолированную обмотку пропитывают эпоксидной смолой.

Магнитное поле полоидальной системы создает радиальные и вертикальные электромагнитные силы, действующие на обмотки индуктора. В момент перемагничивания ОИ вертикальные силы направлены к средней плоскости, но в момент формирования плазменного разряда, могут возникнуть расталкивающие обмотки ОИ силы. Это означает, что необходима структура, удерживающая обмотки индуктора в вертикальном направлении. В конструкции ОИ предусматривается механизм предварительного осевого сжатия для того, чтобы обмотки индуктора оставались в плотном контакте друг с другом при любых рабочих режимах. Необходимая осевая нагрузка в ОИ создается этим механизмом и обеспечивает при комнатной температуре давление на поверхностях модулей, которое будет немного ослаблено за счет сжатия изоляции во время охлаждения солениода до криогенной температуры. Для того чтобы получить равномерное осевое сжатие вдоль ОИ, должна использоваться конструкция, состоящая из внешних и внутренних вертикальных многослойных плоских стержней (пластин), сва-

ренных из тонких листов, расположенных равномерно по окружности с наружной и внутренней сторон ОИ. Стержни соединены с жесткими фланцами сверху и внизу обмотки индуктора. С помощью этого механизма для вертикального предварительного сжатия ОИ всегда будет находиться в предварительно напряженном состоянии. Дополнительным требованием является обеспечение того, чтобы верхний и нижний фланцы оставались в контакте с катушками при начальном намагничивании, когда пакет подвергается наибольшему сжимающим электромагнитным нагрузкам. Требуемое осевое натяжение в конструкции достигается частично предварительным натяжением при комнатной температуре и частично во время захлаживания.

Система обмоток управления

Обмотки управления предназначены для генерирования полоидальных и корректирующих магнитных полей, необходимых для формирования и удержания плазмы внутри вакуумной камеры.

Система обмоток управления TRT состоит из шести обмоток – ОУ1–ОУ6. Для снижения токов, протекающих по обмоткам, расположение

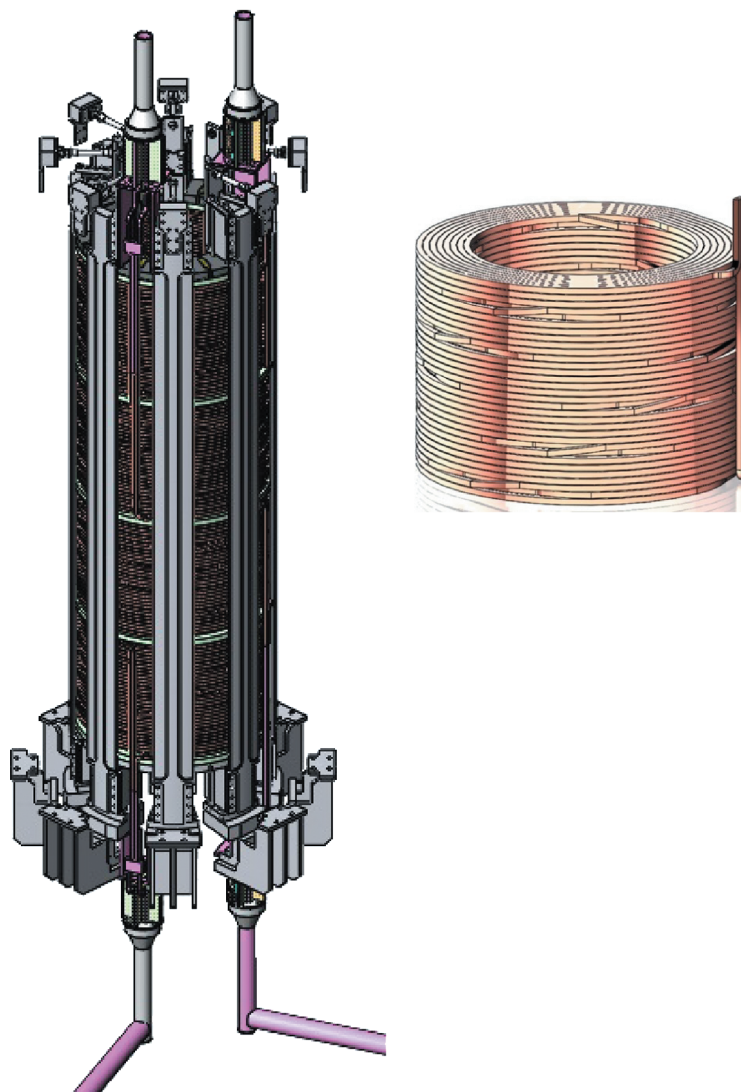


Рис. 11. Индуктор TRT. Слева – общий вид, справа сверху – вид одной из четырех обмоток индуктора.

обмоток выбиралось с максимальным приближением к области плазмы. Схема расположения обмоток показана на рис. 12. Основные параметры обмоток управления представлены в табл. 8.

В качестве провода для системы обмоток управления предполагается использовать ВТСП с каналом для охлаждения газообразным гелием. Структурно ВТСП-провод будет состоять из

Таблица 8. Основные параметры обмоток управления TRT

№	R , мм	Z , мм	ΔR , мм	ΔZ , мм	Витки	Провод, мм	AW , кА	Длина провода в катушке, м	Кол-во галет в катушке
ОУ1	1500	2730	497	363	140	28×28	6030	1320	5
ОУ2	3000	2550	188	154	20	28×28	890	380	2
ОУ3	4300	1200	291	363	80	28×28	3510	2160	5
ОУ4	4300	-1200	325	432	108	28×28	4610	2920	6
ОУ5	3000	-2550	360	363	100	28×28	4220	940	5
ОУ6	1500	-2730	497	363	140	28×28	6030	1320	5

Обозначения в таблице 8: ОУ – обмотка управления, R – средний радиус катушки, Z – расстояние от центра плазмы до центра катушки, ΔR – ширина катушки, ΔZ – высота катушки, AW – ампер-витки.

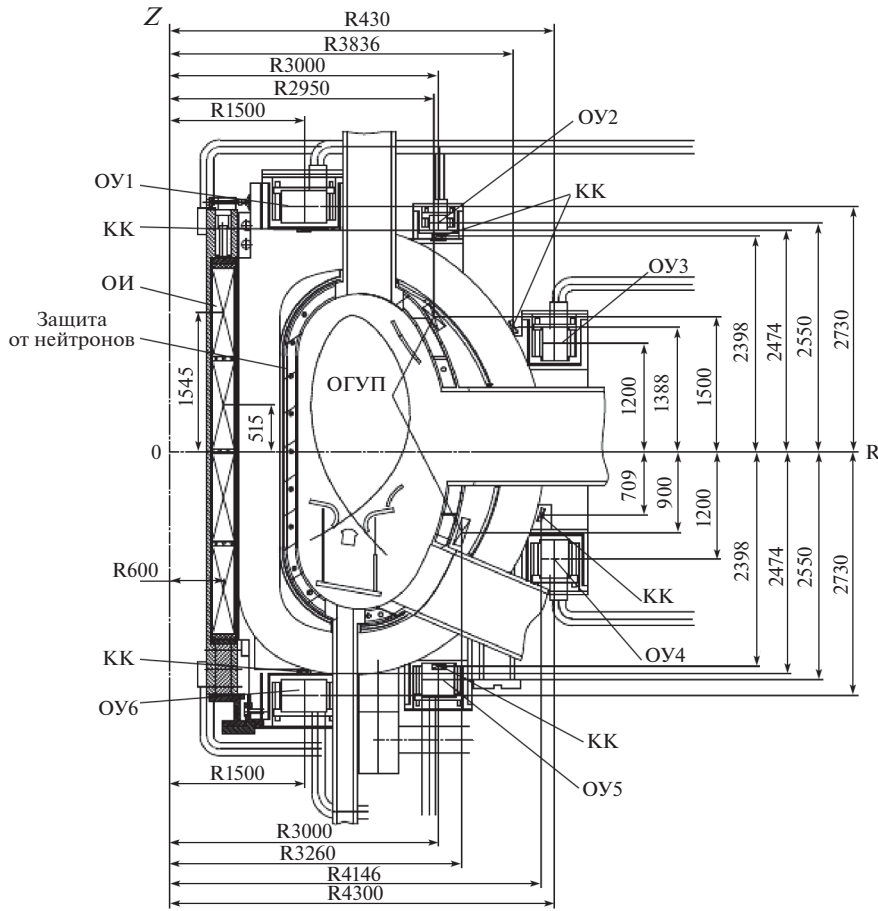


Рис. 12. Схема расположения обмоток управления ОУ1–ОУ6.

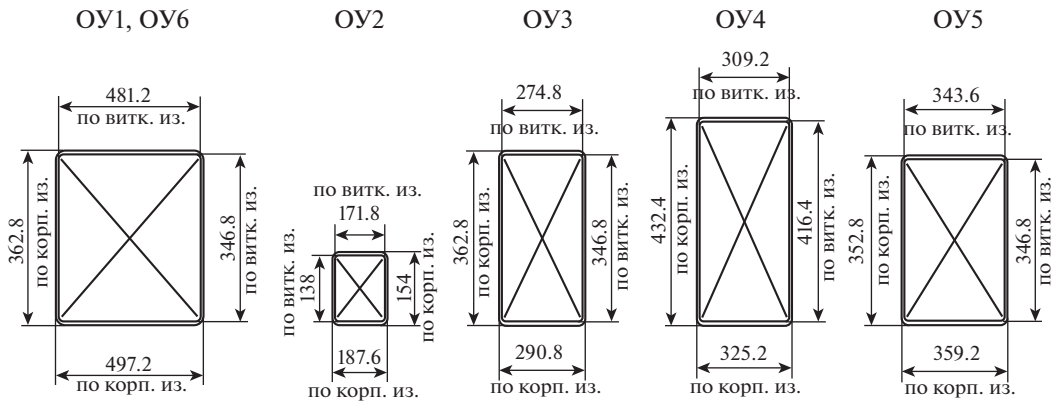


Рис. 13. Обмотки управления ОУ1–ОУ6 с проводом на 45 кА.

стрендов, заключенных в матрицу из бронзы или серебросодержащей меди, помещенной внутри стального кейса (табл. 5). Вид сечений обмоток управления приведен на рис. 13.

Корректирующие катушки

Сверху, снизу и с внешней стороны ОТП расположены три группы корректирующих катушек (рис. 14). Они предназначены для компенсации

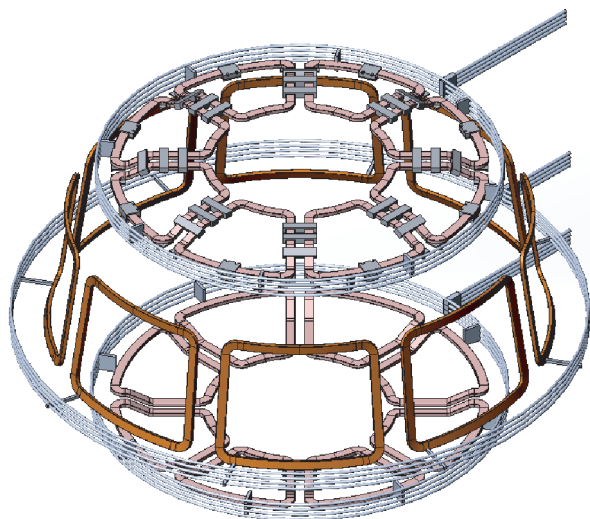


Рис. 14. Корректирующие катушки.

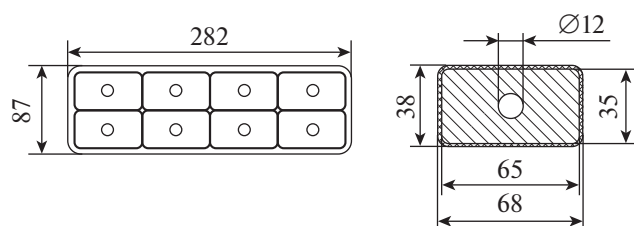


Рис. 15. Провод ОГУП.

дефектов магнитного поля, вследствие возможных отклонений от номинальных размеров в пределах допусков при изготовлении и при осевом размещении обмоток ЭМС.

Каждая из корректирующих катушек охватывает в тороидальном направлении угловой сектор

протяженностью 45° , включающий в себя две катушки тороидального поля. Радиальные и вертикальные участки каждой корректирующей катушки совпадают с положением корпусов катушек тороидального поля. Катушки крепятся к корпусам катушек ОТП с помощью зажимов. Провод для корректирующих катушек предполагается изготовить из ВТСП по примеру остальных систем.

Обмотка горизонтального управляющего поля

Для стабилизации вертикального неустойчивого положения плазмы с сильно вытянутым по вертикали сечением в токамаке ТРТ (вытянутость $K \approx 2$) используется “теплая” обмотка горизонтального управляющего поля (ОГУП), показанная на рис. 12 (за вакуумной камерой). Обмотка управления вертикальным положением плазмы состоит из двух приблизительно симметрично расположенных относительно средней плоскости секций (верхняя и нижняя), соединенных электрически последовательно и магнитно встречно. Выбор проводника этой обмотки из бронзы или серебросодержащей меди обусловлен тем фактом, что ток обмотки в течение разряда колеблется около нулевого значения, поэтому применение сверхпроводника для нее не имеет смысла и приведет лишь к удорожанию ЭМС. Особенность источника питания этой обмотки – более высокая по сравнению с другими обмотками частота изменения напряжения, которая может достигать уровня нескольких десятков килогерц. Обмотка горизонтального управляющего поля – по примеру токамака Т-15МД [21] – состоит из четырех седлообразных катушек (рис. 16), которые крепятся к вакуумной камере при помощи зажимов. Максимальные ток (≈ 50 кА в каждом из 8 витков) и напряжение (≈ 2.4 кВ) источника ОГУП выбраны таким образом, чтобы обеспечить стабилиза-

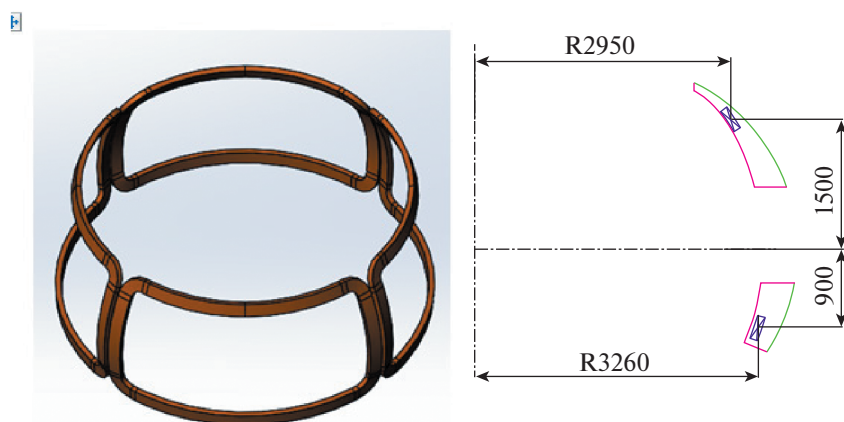


Рис. 16. Слева – 3D-вид катушек ОГУП, справа – схема расположения ОГУП.

цию вертикального положения плазмы при ее неконтролируемых смещениях до ≈ 6 см с учетом собственной индуктивности обмотки и ее магнитной связи с плазмой и вакуумной камерой (≈ 1.3 МГн) и сопротивления обмотки (≈ 2.6 МОм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опорой в проектировании электромагнитной системы токамака TRT послужил многолетний проектно-технологический опыт создания термоядерных установок с магнитным удержанием плазмы [22]. По результатам всестороннего анализа известных принципиальных конструкторских и технологических решений, а также с учетом новых, разрабатываемых конструкционных материалов и технологий, предложены облик и параметры электромагнитной системы, которые позволяют обеспечить реализацию токамака TRT с высокими плазменными характеристиками. На установке TRT предполагается решить широкий круг физических проблем плазмы, в частности, экспериментально проверить теоретические обоснования параметров, проектируемых стационарных и гибридных реакторов. Реализация проекта установки TRT придаст новый мотивационный импульс для развития работ по проводкам из ВТСП с высокими электротехническими характеристиками, пригодных для работы в магнитных полях уровня 15 Тл и выше, с конструктивной плотностью тока $j_{TF} \approx 35$ МА/м² и при значительных электромагнитных нагрузках. Предлагаемый вариант электромагнитной системы TRT может быть применен при выработке стратегии реализации программы создания гибридного термоядерного реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuteev V.V., Goncharov P.R. // Fusion Science and Technology. 2020. V. 76. P. 836.
2. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. В печати.
3. Greenwald M. // J. Plasma Physics. 2020. V. 86. P. 861860501–861860508.
4. DTT. Divertor Tokamak Test Facility. Interim Design Report. April 2019. DTT_IDR_2019_WEB.pdf.
5. Albanese R. // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. 016010.
6. Matsukawa M. Engineering Future in the Design of JT-60 SA. IAEA06_ftp7_5_matsukawa Radial build.pdf.
7. Ishida S, Barabaschi P., Kamada Y. and the JT-60SA Team // Int. Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-9), Dalian, China, 2009. 08-001.
8. Лелехов С.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 4. С. 51.
9. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Динабург Л.Б., Калинин В.В., Константинов А.Б., Костенко А.И., Малышев И.Ф., Монозон Н.А. Электрофизическая аппаратура / Под. ред. В.А. Глухих. М.: Атомиздат, 1979. В. 17.
10. Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кащук Ю.А., Родионов Р.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. В печати.
11. Lin Y., Wukitch S.Y., Bonoli P.T., Seltzman A. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2254. 030003.
12. Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Лутуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Танчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. В печати.
13. Van der Laan D.C. // Supercond. Sc. Technol. 2019. V. 32. 033001.
14. Weiss J. // Proc. MT-26. Intern. Conf. Magnet Technology, Vancouver, 2019. <https://indico.cern.ch/event/763185/contributions/3415952/>
15. Mulder T. // Proc. MT-26. International Conference on Magnet Technology, Vancouver, 2019. <https://indico.cern.ch/event/763185/contributions/3415491/>
16. Сытников В.Е., Лелехов С.А., Красильников А.В., Зубко В.В., Фетисов С.С., Высоцкий В.С. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. В печати
17. Molodyk A. Recent advances in SuperOx 2GHTS wire manufacturing facilities, performance and customization. www.s-innovation.ru.
18. Bykovsky N. // Supercond. Sc. Technol. 2017. V. 30. 024010.
19. Uglietto D. // J. Cryogenics. 2020. doi: 10.1016. 103118
20. Amemiya N. // Int. Conf. Magnet Technology (MT-26), Vancouver. 2019. V. 10. P. 1.
21. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Инютин Н.В., Крылов В.А., Левин И.В., Минеев А.Б., Соколов М.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. Вып. 1. С. 15.
22. Fundamentals of Magnetic Thermonuclear Reactor Design / Ed. by Vasilij Glukhikh, Oleg Filatov, Boris Kolbasov, Elsevier Ltd., Woodhead Publishing, 2018.