# СОДЕРЖАНИЕ

\_

-

# Том 47, номер 12, 2021

# ТОКАМАКИ

Сценарий подъема тока плазмы в токамаке TRT

Э. Н. Бондарчук, А. А. Кавин, А. Б. Минеев, С. В. Коновалов, В. Э. Лукаш, Р. Р. Хайрутдинов	1059
Инженерно-технические аспекты электромагнитной системы установки TRT	
Э. Н. Бондарчук, А. А. Воронова, С. А. Григорьев, Е. Р. Запретилина, А. А. Кавин, Б. А. Китаев, О. А. Ковальчук, Н. М. Кожуховская, С. В. Коновалов, А. В. Красильников, А. Н. Лабусов, И. И. Максимова, А. Б. Минеев, В. П. Муратов, И. Ю. Родин, В. Н. Танчук, В. А. Трофимов, А. К. Чердаков, В. В. Черненок	1070
Перспективные варианты ВТСП-проводов для электромагнитной системы TRT	
В. Е. Сытников, С. А. Лелехов, А. В. Красильников, В. В. Зубко, С. С. Фетисов, В. С. Высоцкий	1087
Обращенные к плазме компоненты токамака TRT	
И. В. Мазуль, Р. Н. Гиниятулин, А. А. Кавин, Н. В. Литуновский, А. Н. Маханьков, П. Ю. Пискарев, В. Н. Танчук	1103
Режимы работы традиционного дивертора в TRT	
А. С. Кукушкин, А. А. Пшенов	1123
Сравнительный анализ концепций литиевой первой стенки для токамака реакторных технологий	
А. В. Вертков, М. Ю. Жарков, И. Е. Люблинский, В. А. Сафронов	1130
Криостат и вакуумная камера TRT	
Д. А. Антропов, А. В. Бондарь, И. В. Кедров, Е. Г. Кузьмин, Т. А. Марченко	1146
Система вакуумной откачки токамака TRT	
Д. А. Карпов, А. Г. Иванов, А. И. Лившиц, А. Н. Драничников	1152
Токамак с реакторными технологиями (TRT): предварительный анализ ядерного энерговыделения в катушках тороидального поля	
Д. В. Портнов, Ю. Г. Высоких, Ю. А. Кащук, Р. Н. Родионов	1170

———— ТОКАМАКИ ——

УДК 533.9

# СЦЕНАРИЙ ПОДЪЕМА ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ TRT

© 2021 г. Э. Н. Бондарчук<sup>*a*, *b*</sup>, А. А. Кавин<sup>*a*, *b*, \*, А. Б. Минеев<sup>*a*, *b*, *d*</sup>, С. В. Коновалов<sup>*b*, *c*</sup>, В. Э. Лукаш<sup>*b*, *c*</sup>, Р. Р. Хайрутдинов<sup>*b*, *c*</sup></sup>

<sup>а</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом", "Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия

<sup>с</sup> НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия <sup>d</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия \*e-mail: kavin@sintez.niiefa.spb.su Поступила в редакцию 12.04.2021 г. После доработки 27.05.2021 г. Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлены результаты моделирования начальной стадии разряда плазмы в токамаке TRT (Tokamak with Reactor Technologies) и индуктивного сценария ввода тока в нее с использованием кодов SCENPLINT, TRANSMAK и DINA. Рассчитаны начальный запас полоидального магнитного потока в центральном соленоиде, расход потока на пробой и расход потока для получения в плазме тока 5 MA за 30 с при ограничениях максимального поля в обмотках соленоида в 14 Tл, а в остальных обмотках менее 7 Tл. В начале сценария плазма имеет лимитерную конфигурацию, вытянутость которой увеличивается от  $K \approx 1$  до  $K \approx 1.5$ . Диверторная конфигурация формируется к 13 с при токе в плазме  $I_p \approx 2$  MA. Подъем тока до проектной величины  $I_p \approx 5$  MA осуществляется одновременно с формированием равновесной конфигурации с  $K \approx 2.0$  при постепенном наращивании плотности плазмы и увеличением мощности ЭЦР-нагрева до 10 MBт.

*Ключевые слова*: токамак, плазма, моделирование, сценарий, форма плазмы **DOI:** 10.31857/S0367292121110160

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в стадии анализа и разной степени проработки находится новое поколение токамаков со сверхпроводниковой магнитной системой: SPARC [1], TRT [2], DTT [3] и JT-60SA [4–6].

Параметры указанных токамаков менялись в ходе проработки (так, размеры SPARC несколько выросли,  $R_0 = 1.65 \text{ м} \rightarrow 1.85 \text{ м}$ ; размеры TRT уменьшились,  $R_0 = 3.2 \rightarrow 2.15 \text{ м}$  при росте магнитного поля  $B_t = 6 \rightarrow 8$  Тл; размеры DTT немного снизились,  $R_0 = 2.15 \rightarrow 2.11$  м вместе со снижением тока плазмы  $I_P = 6 \rightarrow 5.5$  MA).

Уровень инженерной проработки этих установок также различен. С некоторой условностью перечислим установки в порядке роста уровня и детализации разработки: SPARC, TRT, DTT, JT-60SA. При этом создаваемый Японией и Евросоюзом токамак JT-60SA к настоящему времени уже построен и будет введен в эксплуатацию в 2021 г. Современные значения базовых параметров этих установок приведены в табл. 1.

Наименьшее значение тороидального магнитного поля на оси плазмы в токамаке JT-60SA ( $B_t \leq 2.7$  Tл), что позволяет использовать в обмотке тороидального поля NbTi. Магнитное поле в центральном соленоиде достигает 9 Tл, для него используется Nb<sub>3</sub>Sn. В токамаке DTT с тороидальным полем на оси плазмы 6 Tл и максимальным полем на обмотке 12 Tл естественным является переход на Nb<sub>3</sub>Sn (в DTT в зоне центрального соленоида предполагается испытать небольшую вставку из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)). В токамаках TRT и SPARC с высоким значением тороидального магнитного поля электромагнитная система (ЭМС) проектируется из ВТСП.

Во всех указанных установках подъем тока плазмы индуктивный. Использование сверхпроводимости в ЭМС приводит к дополнительным ограничениям (по сравнению с "теплой" ЭМС) на допустимую скорость изменения поля в центральном соленоиде во времени. В результате,

	<i>R</i> <sub>0</sub> , м	а, м	k <sub>95</sub>	<i>B</i> <sub>t</sub> , Тл	<i>I<sub>P</sub></i> , MA	<i>Р<sub>аих</sub></i> , МВт	Плазма	Тип с/п
SPARC-2020	1.85	0.57	1.75	12	8.7	11-24(*)	DT, DD	ВТСП
TRT-2020	2.15	0.57	1.8	8	5	40-50	DD	ВТСП
DTT	2.11	0.64	1.8	6	5.5	45	DD	Nb <sub>3</sub> Sn
JT-60SA	3	1.14	1.8	2.7	5.5(**)	41	DD	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn

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

<sup>(\*)</sup>SPARC: значение мощности нагрева плазмы 11 МВт соответствует разряду в H-моде, 24 МВт – в L-моде удержания. <sup>(\*\*)</sup>JT-60SA: значение тока плазмы для полностью неиндуктивного режима  $I_P = 2.3$  MA.

подъем тока до базового значения, как правило, довольно длительный.

#### 1. ОСОБЕННОСТИ СЦЕНАРИЕВ РАЗРЯДА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ SPARC, JT-60SA И DTT

До изложения базовых сценариев в токамаке TRT коснемся кратко особенностей сценариев в токамаках SPARC, JT-60SA и DTT.

#### 1.1. SPARC

В данной установке предполагается довольно короткий импульс разряда (10 с плато тока) при очень большой скорости подъема тока плазмы  $I_p$  (за 10 с подьем тока до 8.7 MA, т.е. средняя скорость подъема тока 0.87 MA/с). Инженерных подробностей реализации такого сценария не приводится [1].

## 1.2. DTT

Пробой предполагается осуществить в центральной части вакуумного объема, геометрия области пробоя –  $R_{bd} = 2.11$  м,  $a_{bd} \sim 0.6$  м,  $Z_{bd} = 0$ . Напряжение на обходе:  $U_{bd} = 10.6$  В (E = 0.8 В/м), полоидальное поле рассеяния  $B_{str} = 30$  Гс.

После пробоя (100 мс) предполагается, что ток плазмы  $I_p$  растет до 3 MA за 15 секунд (со средней скоростью 0.5 MA/с) в лимитерной конфигурации с сечением плазмы, меняющимся от круглого к эллиптическому. За период 15–22 с ток растет до 4.3 MA, при этом граница плазмы отдаляется от внутренней стенки на 3 см. В течение 22–27 секунды конфигурация плазмы достигает базовых значений  $\delta_{95} = 0.3$  и  $k_{95} = 1.65$ , а ток плазмы  $I_p - 5.5$  MA.

На 28-й секунде включается дополнительный нагрев (45 МВт) и происходит переход в Н-моду. После 36-й секунды физические параметры предполагаются примерно постоянными вплоть до конца плато (73-я секунда). При этом  $q_{axis} = 1.0$ ,  $q_{95} = 2.55$ . В конце плато, ток плазмы  $I_p$  выводится со скоростью 100 кА/с (до 500 кА/с) при сохранении однонулевой конфигурации с низкой величиной относительного давления, низкой вытянутостью и контролируемой плотностью (не более 0.5 от предела Гринвальда). Затем конфигурация плазмы переходит в лимитерную с касанием внутренней стенки, и ток плазмы  $I_p$  снижается до нуля.

Длительность стадии подъема тока и горения плазмы на плато тока до 100 с. При этом подъем тока плазмы  $I_p$  до 5.5 MA занимает 27 с (средняя скорость подъема тока 0.2 MA/c) [3].

# 1.3. JT-60SA

Базовое значение длительности разряда 100 с. Такая длительность должна достигаться как в режиме чисто *индуктивного* разряда, так и в *гибридном* разряде (индуктивный старт + переход на неиндуктивное поддержание тока) и в т.н. стационарном режиме с неиндуктивным поддержанием тока [6].

Пробой предполагается осуществить на внутреннем обводе, геометрия области пробоя –  $R_{bd} = 2.83$  м,  $a_{bd} = 1$  м,  $Z_{bd} = 0$ . Напряжение на обходе:  $U_{bd} = 5.3$  В, полоидальное магнитное поле рассеяния  $B_{str} = 10$  Гс.

Скорость роста тока на начальной стадии разряда 0.4 МА/с. Максимальный запас потока в полоидальной системе 40 В·с, максимальное значение магнитного поля в соленоиде 9 Тл.

В JT-60SA предполагается исследование плазмы в лимитерной и диверторных конфигурациях с одним (LSN, USN) и двумя нулями (DN) при вытянутости сечения плазмы  $k_{95} \le 1.7 - 1.8$  и треугольности  $\delta_{95} \le 0.3 - 0.4$ .

## 2. СЦЕНАРИЙ ПОДЪЕМА ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ TRT

# 2.1. Анализ старта разряда в токамаке TRT с помощью кодов SCENPLINT и TRANSMAK

Пробой плазмы в токамаке TRT целесообразно осуществлять на внутреннем обводе камеры,



**Рис. 1.** Полоидальные обмотки, вакуумная камера, лимитер, пассивные витки и область пробоя в тока-маке TRT.

поскольку там больше тороидальное магнитное поле и вихревое электрическое поле и легче обеспечить область с низкими полоидальными полями. Полоидальные обмотки, вакуумная камера, лимитер, пассивные витки и область пробоя (выделена пунктиром) токамака TRT показаны на рис. 1. Следует отметить, что все полоидальные обмотки токамака предполагается изготовить из высокотемпературного сверхпроводника.

**2.1.1. Математическая модель задачи.** Для описания переходных процессов на старте разряда в токамаках используется система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть представлена в матричном виде

$$\frac{d(LI)}{dt} + RI = U, \tag{1}$$

где L — матрица индуктивностей, I — вектор токов в контурах с током, R — матрица сопротивлений контуров с токами, U — вектор напряжений на источниках питания полоидальных обмоток. Матрица индуктивностей L полностью определяется геометрией проводящих элементов конструкции токамака и плазмы.

В данной математической модели токамака все проводящие элементы конструкции представляются в виде системы аксиально-симметричных контуров. Это относится как к катушкам полоидального поля, так и к описанию вакуумной камеры и других пассивных проводящих элементов. Что касается матрицы R, то ее элементы полностью определяются проводящими свойствами соответствующих материалов.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

Расчетная модель может учитывать дополнительные резисторы в электрических цепях катушек полоидального поля с целью повышения напряжения на них на стадии пробоя плазмы.

Целью решения этой задачи являлось нахождение таких начальных токов полоидальных катушек и программных напряжений на них как функций от времени, которые позволяют реализовать условия пробоя, то есть одновременное формирование в нужный момент времени необходимой величины электрического поля  $E_{bd}$  в зоне пробоя и низких рассеянных магнитных полей. Величина рассеянных магнитных полей не должна превышать, как правило, 1–2 мТл в зоне пробоя.

После пробоя горизонтальная компонента магнитного поля должна поддерживаться близкой к нулю, чтобы избежать возникновения больших смещений плазмы от положения равновесия в вертикальном направлении. В то же время примерно однородная вертикальная компонента магнитного поля, которая обеспечивает равновесие плазмы с круглым поперечным сечением по большому радиусу, должна соответствовать величине, определяемой по формуле Шафранова. Два последних условия могут быть записаны в виде

$$\langle B_r(R,Z) \rangle \approx 0$$
  
$$\langle B_z(R,Z) \rangle + \frac{\mu_o I_p}{4\pi R} \left[ \ln\left(\frac{8R}{a}\right) + \beta_p + \frac{l_i}{2} - \frac{3}{2} \right] \approx 0$$
(2)

Как правило, на этой стадии форма плазменного шнура имеет приблизительно круглое поперечное сечение. Это достигается, если показатель спада магнитного поля, определяемый как:

$$\langle n \rangle = -\frac{R}{\langle B_z \rangle} \frac{d \langle B_z \rangle}{dR},$$
 (3)

в зоне пробоя плазмы находится в диапазоне  $0.1 \le \langle n \rangle \le 0.7$ . Помимо этих условий в модели учитываются ограничения на величины токов и напряжений на катушках полоидального поля, определяемые выбором источников питания, а также на величину максимального магнитного поля на катушках.

Указанная математическая модель реализуется в вычислительном коде TRANSMAK [7], который решает задачу синтеза сценария для стадии инициации плазмы, то есть позволяет найти напряжения на катушках полоидального поля, токи в полоидальных обмотках с момента начального запаса потока и значения сопротивлений в контурах обмоток (если требуется). Математически описываемая здесь задача сводится к оптимизационной задаче, где целевым функционалом является либо максимальная величина внешнего магнитного потока в зоне инициации плазмы в момент пробоя, либо максимальная величина



**Рис. 2.** Ток плазмы  $(I_p)$ , внешнее напряжение  $(U_{loop})$  и магнитный поток ( $\Psi$ ) в течение старта разряда в области пробоя.



**Рис. 3.** Линии постоянного потока (слева) и линии постоянного модуля полоидального поля в момент пробоя ( $t_{bd} = 0.2$  с) в области пробоя (справа). Указаны величины полоидального магнитного поля в Гс.

магнитного потока в зоне инициации плазмы в начальный момент времени.

Для оценки омического сопротивления плазменного шнура на стадии инициации плазмы в коде TRANSMAK используется нульмерная многокомпонентная транспортная модель (код SCENPLINT [7]), которая служит для оценки омического сопротивления плазмы и входит в состав вычислительного комплекса TRANSMAK.

Следует отметить, что коды SCENPLINT и TRANSMAK широко используются для расчета начальной стадии в токамаке-реакторе ИТЭР.

**2.1.2 Данные для расчета начальной стадии разряда.** Принято, что лимитер на внутреннем обводе располагается на  $R_{lim} \approx 1.53$  м (см. рис. 3), малый радиус области пробоя  $a_{bd} = 0.4$  м, поэтому большой радиус –  $R_{bd} = 1.93$  м ( $Z_{bd} = 0$ ). Тороидальное поле в центре области пробоя  $B_{t,bd} \approx 8.3$  Тл.

Для начальной стадии разряда в TRT (до величины тока плазмы  $I_p \approx 0.25$  MA) используется индуктивный сценарий. В качестве ограничения на параметры сверхпроводящих катушек принято, что максимальное поле катушек соленоида не должно превышать  $B_{OYj} \leq 14$  Tл, а максимальное поле внешних полоидальных катушек  $B_{OHj} \leq 7$  Тл. Эти ограничения позволяют обеспечить приемлемые электромагнитные нагрузки на указанные катушки.



Рис. 4. Токи в обмотках в течение старта разряда.

Для формирования условий пробоя в токамаке TRT необходимо обеспечить низкий уровень полоидальных магнитных полей  $B_{str}$  (полей рассеяния) в области пробоя в момент пробоя, достаточно большое напряжение на обходе  $U_{bd}$ , определенный уровень давления рабочего газа в камере *p*. Расчеты показали, что при учете наведенных токов в проводящих структурах установки требуется достижение полей рассеяния в момент пробоя на уровне  $B_{str} \approx 2$  мТл.

Если принять, что рабочий газ — дейтерий с давлением  $p \approx 0.5$  мПа, напряжение пробоя  $U_{bd} \approx 6.5$  В (при этом напряженность электрического поля в центре области пробоя  $E \approx 0.5$  В/м), то основные критерии пробоя могут быть выполнены. В частности, выполнено эмпирическое условие "реализуемости пробоя"  $E \times B_{t,bd}/B_{str} > 1000$  В/м [11].

Расчеты по коду SCENPLINT позволяют найти требуемую эволюцию сопротивления плазмы и оценить некоторые исходные параметры. Приведем важнейшие из них:

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

– напряжение в момент пробоя  $U_{bd} = 6.5$  B, соответствующее электрическое поле в центре области пробоя  $E \approx 0.5$  B/м;

— радиус области пробоя  $a_{bd} = 0.4$  м;

давление рабочего газа (дейтерий) p = 0.5 мПа;

 – относительный уровень содержания бериллия (примеси) ≈4%;

— тороидальное магнитное поле в центре области пробоя  $B_{t,bd} = 8.3$  Тл;

— для осуществления пробоя полоидальное магнитное поле рассеяния в момент пробоя в области пробоя не более  $B_{str} = 2$  мТл.

В качестве пассивной структуры рассматривались две стальные оболочки вакуумной камеры толщиной 25 мм и с удельным сопротивлением  $\rho_{vv} = 0.74 \text{ мкOm} \cdot \text{м}.$ 

Тороидальное сопротивление внутренней оболочки 42.9 мкОм. Тороидальное сопротивление внешней оболочки 36.9 мкОм. Полное торо-



Рис. 5. Напряжения на обмотках в течение старта разряда.

идальное сопротивление вакуумной камеры 20 µOhm.

В качестве внутрикамерных элементов рассматривались медные пассивные витки с сопротивлением 40 мкОм, соединенные магнитно встречно и показанные на рис. 3 красным цветом.

**2.1.3** Результаты расчетов начальной стадии. Результаты расчета основного сценария начальной стадии представлены на рис. 1–10. Исследования показали, что в электрических цепях обмоток ОУ1, ОУ3, ОУ4, ОУ5, ОУ6 следует использовать следующие сопротивления до момента времени  $t \approx 0.54$  с (конец начальной стадии, ток плазмы  $I_n \approx 0.25$  MA)

$$R_{OY1} = 0.1 \text{ Om}, \quad R_{OY3} = 0.8 \text{ Om}, \quad R_{OY4} = 0.4 \text{ Om},$$
  
 $R_{OY5} = 0.5 \text{ Om}, \quad R_{OY6} = 0.05 \text{ Om}.$ 

Максимальное напряжение на резисторах составляет примерно 5.5 кВ. Как правило, резисторы используются только на начальной стадии разряда, в конце которой происходит их отключение. На рис. 2 показаны ток плазмы (до величины  $I_p \approx 0.25$  MA), внешнее напряжение и магнитный поток в течение старта разряда (от токов полоидальных обмоток и токов вакуумной камеры) в области пробоя. В этом сценарии при конструктивном ограничении на максимальное поле обмоток в 14 Тл начальный поток может достигать величины  $\Psi_{ext}(0) \approx 16.45$  BG, а поток в момент пробоя  $t_{bd} = 0.2$  с равняется  $\Psi_{ext}(t_{bd}) \approx 15.7$  BG. Напряжение в момент пробоя составляет  $U_{bd} \approx 6.5$  В. В конце этого сценария поток составляет  $\Psi_{ext}(t = 0.54$  с)  $\approx 13.9$  BG.

На рис. 3 показаны линии постоянного потока и линии постоянного модуля полоидального поля в момент пробоя  $t_{bd} = 0.2$  с в области пробоя. Как следует из рисунка, в области пробоя в момент пробоя наблюдается низкий уровень рассеянных полей с нулем поля (меньше 20 Гс).

На рис. 4 показаны токи в обмотках полоидальной системы в течение начальной стадии. Максимальные токи в обмотках центрального соленоида в начальный момент разряда примерно

1064



**Рис. 6.** Суммарная мощность источников питания на старте разряда.

46 кА, что обеспечивает поле на катушках соленоида не более 14 Тл.

На рис. 5 показаны напряжения источников электропитания на полоидальных обмотках в течение начальной стадии. Максимальное напряжение 4 кВ достигается на обмотке ОУ5.

На рис. 6 показана суммарная мощность источников электропитания полоидальных обмоток в течение начальной стадии. Максимальная мощность не превышает 120 МВт. В качестве источников питания полоидальных обмоток предполагается использовать управляемые тиристорные преобразователи, которые в инверторном режиме (ток и приложенное напряжение разных знаков) отдают электрическую мощность обратно в сеть (отрицательная мощность).

На рис. 7 приведена конфигурация плазмы в конце начальной стадии разряда (t = 0.54 с), когда ток плазмы достигает  $I_p \approx 250$  кА, малый радиус  $a_p \approx 0.4$  м. При этом плазма имеет круглую форму с вытянутостью примерно равной 1.

Таким образом, моделирование показало, что полоидальная система установки обеспечивает условия пробоя и ранний подъем тока плазмы  $I_p$  на внутреннем лимитере. При этом:

 начальный запас потока при ограничении максимального поля на обмотках центрального соленоида в 14 Тл составляет 16.45 Вб,

– уровень полей рассеяния в момент пробоя  $t_{bd} = 0.2$  с в области пробоя ( $R_{bd} = 1.93$  м,  $Z_{bd} = 0$ ,  $a_{bd} = 0.4$  м) не превышает 20 Гс,

- напряжение в момент пробоя 6.5 B,

– в течение старта разряда до тока плазмы  $I_p \approx 250$  кА (t = 0.54 с, средняя скорость подъема ≈0.5 МА/с) расход потока составляет ≈2.6 Вб,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

— использование резисторов в цепях некоторых обмоток на старте разряда позволяет уменьшить максимальные напряжения источников питания обмоток до 4 кВ и обеспечить уровень мощности в пределах ≈120 МВт. Резистивные напряжения обеспечивают требуемый быстрый вывод токов из некоторых обмоток на старте разряда, который может быть осуществлен без резисторов только при больших напряжениях источников питания,

 максимальное поле на обмотках индуктора на старте разряда не превышает 14 Тл, на остальных обмотках максимальное поле не более 7 Тл.

#### 2.2. Транспотрная модель, используемая для расчета ценария ввода тока плазмы после начальной стадии

Расчеты эволюции плазмы токамака TRT в процессе ввода тока выполнены с помощью плазмофизического кода DINA [8]. Код включает в себя осесимметричную по тороидальному обходу двумерную модель расчета равновесия плазмы со свободной границей во внешних магнитных полях, одномерные уравнения диффузии полоидального магнитного потока и энергии электронов и ионов, а также систему контурных уравнений для расчета тороидальных токов в проводящих структурах вакуумной камеры токамака. Плазмофизическая модель включает также неоклассическое выражение для расчета бутстрептока [9].

При моделировании сценария ввода тока в плазму принято допущение относительно использования выражения для глобального времени удержания энергии в режиме L-моды [10]

$$\tau_{L} = 0.023 I_{p}^{0.96} B^{0.03} P_{heat}^{-0.73} n_{19}^{0.41} \times \times M^{0.2} R^{1.83} (a/R)^{-0.06} K^{0.64},$$
(4)

на которое нормируется энергетическое время жизни плазмы

$$\tau_E = \frac{E_{th}}{\left(P_{heat} - P_{rad} - dE_{th}/dt\right)}.$$
(5)

В выражениях (4) и (5) приняты обозначения:  $E_{th}$  – тепловая энергия плазмы;  $P_{heat}$  – мощность теплового нагрева;  $P_{rad}$  – мощность радиационного излучения; R и a, соответственно, большой и малый радиусы плазмы; K – вытянутость плазмы;  $B_t$  – тороидальное магнитное поле, определенное в геометрическом центре камеры  $R_0$ ;  $n_{19}$  – средняя плотность ионов в единицах  $10^{19}$  м<sup>-3</sup>; M – средняя масса иона. В выражении (4) используются единицы измерения с, МА, Тл, МВт,  $10^{19}$  м<sup>-3</sup>, м. Радиальная зависимость коэффициента теплопроводности задается в виде  $f(\overline{\rho}) = 0.3 + \overline{\rho}^2$ . Здесь  $\overline{\rho}$  – радиальная координата магнитной поверхности



**Рис.** 7. Конфигурации плазмы в моменты сценария ввода тока плазмы *I*<sub>0</sub> до 5 MA (фиолетовая линия – лимитер).

 $(\overline{\rho} = \sqrt{\Phi/\Phi_{max}}, где \Phi - тороидальный магнитный поток, заключенный внутри текущей магнитной поверхности и <math>\Phi_{max}$  – поток внутри плазменной границы). Для расчета электрической проводимости плазмы используется неоклассическое выражение.

Предполагается, что после начальной стадии дейтериевая плазма в отсутствии примесей имеет

параболический профиль плотности. Распределение ЭЦР-мощности дополнительного нагрева по радиусу плазмы также принято параболическим. Эволюция мощности дополнительного нагрева в процессе ввода тока показана на рис. 8. Относительно граничной температуры электронов и ионов используется условие  $T_{e,i}(a) = 0.1 \langle T_{e,i} \rangle$ , где  $\langle T_{e,i} \rangle$  – средняя по объему плазмы величина.



**Рис. 8.** Эволюция мощности дополнительного нагрева в процессе ввода тока.

#### 2.3. Сценарий ввода тока плазмы до 5 МА

С использованием транспортной модели п. 2.2 был рассчитан сценарий ввода тока плазмы до 5 МА. Расчет сценария продолжался с момента времени t = 0.54 с (конец начальной стадии разряда). В этот момент времени внешний полоидальный поток составляет  $\Psi_{ext} \approx 13.85$  Вб.

Эволюция формы плазмы в течение подъема тока плазмы  $I_p$  до величины 5 МА показана на рис. 7. Дополнительный нагрев плазмы значительно облегчает индукционный ввод тока. В рассматриваемом сценарии используется ЭЦР-нагрев с линейным ростом мощности от 2 до 10 МВт (см. рис. 8). Одновременно с ростом тока и температуры осуществляется также подъем плотности плазмы (рис. 9).

В момент времени t = 7.5 с ток плазмы достигает значения  $I_p \approx 1$  МА, при этом внешний поток составляет  $\Psi_{ext}(t = 7.5 \text{ c}) \approx 7.5$  Вб. Лимитерная конфигурация плазмы имеет вытянутое сечение (вытянутость  $K \approx 1.46$ ) с малым радиусом  $a_p \approx 0.5$  м.

В момент времени t = 12.7 с плазма имеет однонулевую диверторную конфигурацию с током  $I_p \approx 2$  МА, показанную на рис. 7. Большой и малый радиусы плазмы достигают базовых значений ( $R_p \approx 2.15$  м,  $a_p \approx 0.57$  м), однако величина вытянутости плазмы по *x*-точке ( $K_x \approx 1.85$ ) еще меньше базовой. Ветви сепаратрисы проходят практически через заданные точки на диверторных мишенях (strikepoints), отмеченные на рисунке красными маркерами. В этот момент времени внешний поток составляет  $\Psi_{ext}(t = 12.7 \text{ c}) \approx 2.6$  Вб.

В моменты времени t = 17.8 и 23 с плазма имеет однонулевую диверторную конфигурацию с то-



**Рис. 9.** Эволюции средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур и концентрации электронов в процессе ввода тока.

ками в плазме соответственно  $I_p \approx 3$  и 4 МА. Большой и малый радиусы плазмы сохраняют базовые значения ( $R_p \approx 2.15$  м,  $a_p \approx 0.57$  м), а величина вытянутости плазмы возрастает до  $K_x \approx 1.95$ . Ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных мишенях. В эти моменты времени внешний полоидальный поток составляет, соответственно,  $\Psi_{ext} \approx -2.1$  и -6.8 Вб.

Эволюции средних по объему плазмы величин электронной и ионной температур, а также концентрации электронов в процессе ввода тока показаны на рис. 9.

Плато тока плазмы ( $I_p \approx 5$  MA) начинается в момент времени t = 30 с. Однонулевая конфигурация плазмы в этот момент времени имеет базовые параметры: большой радиус плазмы  $R_p \approx 2.15$  м, малый радиус плазмы  $a_p \approx 0.57$  м, вытянутость по *x*-точке  $K_x \approx 2$ . Ток в обмотке центрального соленоида ОИ1\_В достигает максимального значения – 57 кА. Ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных мишенях. Внешний поток составляет  $\Psi_{ext}(t = 30$  с)  $\approx -12.9$  B6.

Таким образом, в этом сценарии усредненное внешнее напряжение, приложенное к плазме на стадии подъема тока до 5 MA, составляет  $U_p \approx 1$  В и расход потока составляет  $\Delta \Psi_{ext} \approx -29.3$  BG.

На рис. 10 показаны эволюции тока плазмы  $I_p$ , токов в полоидальных обмотках и внешнего потока в течение рассмотренного сценария. Максимальный ток в обмотках центрального соленоида не превышает 57 кА, в остальных обмотках существенно меньше. В рассмотренном сценарии максимальные поля на обмотках центрального



Рис. 10. Ток плазмы, токи в полоидальных обмотках и внешний поток в течение стадии подъема тока плазмы до 5 МА.



**Рис. 11.** Примеры равновесий плазмы TRT с двумя *X*-точками, с отрицательной треугольностью и SOL с шириной более 5 см.

соленоида около 14 Тл. Эта величина была выбрана в качестве предельно допустимой для сверхпроводящей полоидальной системы установки. Следует отметить, что рассмотренный выше сценарий ввода тока ориентировался на одновременное формирование базовой конфигурации

том 47

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

№ 12

2021

нако, как для оптимизации операционных режимов разряда, так и для обеспечения возможности экспериментальной апробации различных инновационных концепций дивертора, ЭМС ТRТ обладает широкими возможностями по созданию магнитных конфигураций различной геометрии включая двухнулевую конфигурацию, конфигурации с отрицательной треугольностью и др. Примеры равновесий плазмы TRT с двумя *X*-точками, с отрицательной треугольностью (~-0.13) и SOL с шириной более 5 см показаны на рис. 11.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты моделирования сценария ввода тока в плазму TRT до 5 MA, рассчитанного с помощью кода DINA. Для расчета начальной стадии в этом сценарии были использованы коды SCENPLINT и TRANSMAK.

Начальный запас потока при ограничении максимального поля на обмотках центрального соленоида в 14 Тл составляет 16.4 Вб. Расход потока в начале разряда до тока плазмы  $I_p \approx 0.5$  MA равняется  $\approx 2.6$  Вб.

В начале сценария плазма имеет лимитерную конфигурацию, вытянутость которой увеличивается от  $K \approx 1$  до  $K \approx 1.5$ . Диверторная конфигурация формируется приблизительно к 13 с (ток плазмы  $I_p \approx 2$  MA).

Плато тока плазмы ( $I_p \approx 5$  MA) начинается в момент времени t = 30 с. Однонулевая конфигурация плазмы в этот момент времени имеет базовые параметры: большой радиус плазмы  $R_p \approx$  $\approx 2.15$  м, малый радиус плазмы  $a_p \approx 0.57$  м, вытянутость  $K_x \approx 2$ . Внешний полоидальный поток составляет  $\Psi_{ext}(t = 30 \text{ c}) \approx -12.9$  Вб. Усредненное внешнее напряжение, приложенное к плазме на стадии подъема тока до 5 MA, составляет  $U_p \approx 1$  В.

Изменение полоидального потока в  $\approx 29.3$  Вб позволяет обеспечить подъем тока плазмы  $I_p$  до 5 MA за 30 с.

Начиная с момента времени  $t = 12.7 \text{ с} (I_p \approx 2 \text{ MA})$  и до начала плато тока плазмы, ветви сепаратрисы проходят через заданные точки на диверторных пластинах.

Максимальные поля на обмотках центрального соленоида в течение сценария около 14 Тл, на остальных обмотках максимальные поля менее 7 Тл.

Рассматриваемая полоидальная система TRT позволяет формировать двухнулевую плазменную конфигурацию, а также конфигурацию со слабой отрицательной треугольностью плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Status of the SPARC Physics Basis // Journal of Plasma Physics. 2020. V. 86. P. 861860501–861860508.
- 2. *Красильников А.В., Коновалов С.В. и др. //* Физика плазмы. 2021. Т. 46. В печати.
- 3. DTT. DivertorTokamak Test Facility. Interim Design Report, April 2019, DTT\_IDR\_2019\_WEB.pdf.
- Matsukawa M., Terakado T., Yamauchi K., Shimada K., Cara P., Gaio E., Novello L., Ferro A., Coletti R., Santinelli M., Coletti A. // J. Plasma Fusion Res. Series, 2010. V. 9. P. 264.
- Matsukawa M. // Engineering Future in the Design of JT-60 SA. IAEA06\_ftp7\_5\_matsukawa Radial build.pdf.
- 6. Conceptual Design Report on JT-60 SA, 05-2. Physical Assessment.pdf.
- Belyakov V.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Vasiliev V.V. // Plasma Devices and Operations. 2003. V. 11. P. 193.
- 8. *Khayrutdinov R.R. and Lukash V.E.* // Journal of Computational Physics. 1993. V. 109. № 2. P. 193.
- 9. *Hinton F.L., Hazeltine R.D.* // Review of Modern Physics. 1976. V. 48. № 2. Part, P. 239.
- ITER Physics Basics, Chapter 2 // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 2206.
- Tanga A., Thomas P.R., Cordey J.G., Christiansen J.P., Ejima S., Kellman A. et al. Tokamak Start-up / Ed. by U.Knoepfel. N.Y.: Plenum Press, 1986.

УДК 533.9

# ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ Электромагнитной системы установки трт

© 2021 г. Э. Н. Бондарчук<sup>a, c,\*</sup>, А. А. Воронова<sup>a, c</sup>, С. А. Григорьев<sup>a, c</sup>, Е. Р. Запретилина<sup>a, c</sup>, А. А. Кавин<sup>a, c</sup>, Б. А. Китаев<sup>a, c</sup>, О. А. Ковальчук<sup>a, c</sup>, Н. М. Кожуховская<sup>a, c</sup>, С. В. Коновалов<sup>b, c, \*\*</sup>, А. В. Красильников<sup>c, \*\*\*</sup>, А. Н. Лабусов<sup>a, c</sup>, И. И. Максимова<sup>a, c</sup>, А. Б. Минеев<sup>a, c, d, \*\*\*\*</sup>, В. П. Муратов<sup>a, c</sup>, И. Ю. Родин<sup>a</sup>, В. Н. Танчук<sup>a, c</sup>,

В. А. Трофимов<sup>а, с</sup>, А. К. Чердаков<sup>а, с</sup>, В. В. Черненок<sup>а, с</sup>

<sup>а</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия <sup>c</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом",

"Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия

<sup>d</sup> 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.

	<i>R</i> <sub>0</sub> , м	а, м	k <sub>95</sub>	<i>B<sub>t0</sub></i> , Тл	<i>I<sub>P</sub></i> , MA	<i>P<sub>aux</sub></i> , MBт	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 <sub>3</sub> Sn	100
JT-60SA	3	1.14	1.8	2.7	5.5(**)	41	D-D	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn	100

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

Пояснения к таблице 1 и обозначения:

\*)SPARC: значение мощности нагрева плазмы 11 MBт соответствует разряду в L-моде удержания, 24 MBт – в H-моде. (\*\*)JT-60SA: значение тока плазмы для полностью неиндуктивного режима  $I_P = 2.3$  MA.

 $R_0$  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 ТRТ 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–

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

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 K).

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, Nb<sub>3</sub>Sn или ВТСП на основе REBCO). Впервые сверхпроводниковые обмотки были использованы в отечественных токамаках T-7 [8] и T-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 MBT [3]). Указанные выше величины тороидального магнитного поля на оси плазмы приводят к соответствующим значениям на обмотке и к различиям в выборе сверхпроводника тороидальной обмотки: NbTi (в JT-60SA), Nb<sub>3</sub>Sn (в DTT) и ВТСП REBCO (в TRT и в SPARC).

# 2. ЭМС ТОКАМАКА TRT

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

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

	<i>B<sub>tc</sub></i> , Тл	N <sub>TF</sub>	<i>j<sub>TF</sub></i> , МА/м <sup>2</sup>	$\delta_{ripple}, \%$	$\Delta_{Sh,i}$ , см	$\Delta_{PL-TF}$ , см	$\Delta \Psi$ , Bố
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

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

Обозначения к таблице 2:

 $B_{lc}$  — максимальная величина магнитного поля на тороидальной обмотке;  $N_{TF}$  — количество тороидальных катушек;  $j_{TF}$  — конструктивная плотность тока по внутренней ноге тороидальной катушки;  $\delta_{ripple}$  — уровень гофрировки на наружном обводе плазмы;  $\Delta_{Sh,i}$  — толщина защиты на внутреннем обводе;  $\Delta_{PL-TF}$  — 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 ОТП многовитковые – неразборные;

– средний радиус наружной тороидальной ноги выбран из условия допустимой гофрировки тороидального магнитного поля на наружном обводе плазмы  $\delta_{ripple}$ , (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 ( $\Delta_{PL-TF}$ ): 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 ОТП;

– 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 ~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 инжекции. 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 инжекция 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>I<sub>пр ТF</sub></i> , кА	<i>I<sub>1TF</sub></i> , кА	<i>I<sub>прСS</sub></i> , кА	<i>I<sub>прРF</sub></i> , 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 ОТП,  $I_{1TF}$  – ток в катушке ОТП,  $I_{npCS}$  – ток в проводнике обмотки индуктора,  $I_{npPF}$  – ток в проводнике полоидальной катушки.



Рис. 2. Общий вид ЭМС ТВТ.

— величины токов по одной катушке тороидального поля  $I_{ITF} = 2\pi B_{t0} R_0 / \mu_0 N_{TF}$  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 ТRT для всех обмоток (ОТП, ОИ и ОУ) рассмотрены варианты проводов, отвечающие следующим требованиям:

 конструктивное исполнение: "кабель-воболочке" — транспонированные сверхпроводящие субкабели в требующемся 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 серебросодержащей 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 высокополевых обмоточных проводов установок УТС.

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



Субкабель — аналог СОRСW7 ([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 мм<sup>2</sup> Hastelloy — 35%, медь — 44% 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 потребуется 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 ТRТ. 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 мм<sup>2</sup>) и медных элементов субкабелей (площадь поперечного сечения 40–56 мм<sup>2</sup>).

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-DE-МО [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

#### Обмотка тороидального поля (ОТП):

Индукция магнитного поля на проводе — 15 Тл Рабочий ток в ленте — 74 А/мм Отношение рабочего тока  $(I_p)$  провода к критическому  $(I_k)$ :  $-I_p/I_k (T = 5 \text{ K "на входе"}) - 0.6$  $-I_p/I_k (T = 10 \text{ K "целевой"}) - 0.7$ 

 $-I_p/I_\kappa$  (T = 15 К "минимальный") -0.82

Число субкабелей — 8 Рабочий ток субкабеля — 9435 А Рабочая плотность тока по субкабелю — 590 А/мм<sup>2</sup>

#### Обмотки индуктора (ОИ):

Индукция магнитного поля на проводе — 15 Тл Рабочий ток в ленте — 60 А/мм Отношение рабочего тока провода к критическому:  $-I_p/I_\kappa$  (T = 5 K "на входе") — 0.5  $-I_p/I_\kappa$  (T = 10 K "целевой") — 0.6  $-I_p/I_\kappa$  (T = 20 К "минимальный") — 0.8

Число субкабелей — 8 Рабочий ток субкабеля — 7650 А Рабочая плотность тока по субкабелю — 480 А/мм<sup>2</sup>

#### Обмотки управления (ОУ):

<u>ОУ1, ОУ6</u> 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 –  $I_p/I_\kappa$  (T = 5 K "на входе") – 0.6 –  $I_p/I_\kappa$  (T = 15 K "минимальный") – 0.8

<u>ОУ3, ОУ4, ОУ5</u> 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 –  $I_p/I_k$  (T = 5 K "на входе") – 0.5 –  $I_p/I_k$  (T = 15 K "минимальный") – 0.75



Рабочий ток провода — 74 кА Рабочая плотность тока:

 по проводу в тонком кожухе – 140 А/мм<sup>2</sup>
 по обмотке (центральная галета в радиальной пластине) – 70 А/мм<sup>2</sup>



Рабочий ток провода – 60 кА Рабочая плотность тока: – по проводу без изоляции – 89 А/мм<sup>2</sup> – по обмотке – 77 А/ мм<sup>2</sup>



Рабочий ток провода — 45 кА Рабочая плотность тока: – по проводу без изоляции — 57 А/мм<sup>2</sup> – по обмотке — 41 А/ мм<sup>2</sup>

# Таблица 5. Окончание

<u>OY2</u>	
Индукция магнитного поля на проводе – 2.5 Тл	
Рабочий ток в ленте – 150 А/мм	
Количество лент в субкабеле – 20	
Отношение рабочего тока провода к критическому	
$-I_p/I_\kappa$ ( <i>T</i> = 5 K "на входе") $-0.5$	
$-I_p/I_\kappa$ ( $T = 15$ К "минимальный") $-0.65$	
Число субкабелей – 6	
Рабочий ток субкабеля — 7650 А	
Рабочая плотность тока по субкабелю — 480 $\mathrm{A/mm^2}$	

Таблица 6.	Оценки потерь	энергии для	прототипа	кабеля	CSи	TF установки	<b>EU-DEMO</b>
------------	---------------	-------------	-----------	--------	-----	--------------	----------------

Режим изменения	и 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 03Х20Н16АГ6, характеризующаяся более высокими механическими свойствами по сравнению со сталью AISI 316LN.

# 1078



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 ОTП от нейтронного потока уровня  $5 \times 10^{17}$  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<sup>3</sup>, в результате чего, как показывают оценки (см. рис. 7), корпус ОТП нагреется до температур 20–25 К за 20–30 с.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

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

Обмоточный блок содержит 70 витков провода. При этом величина тока в проводе  $I_{\rm B} = 73.7$  кА, в катушке  $Iw_{\rm кат} = 5.16$  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 нержавеющих, 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 цианатэстеровой 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.

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.

#### 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

	-	-	• •				
	<i>R</i> , м	<i>Z</i> , м	<i>ΔR</i> , м	ΔΖ, м	$N_{\rm butk}$	AW <sub>max</sub> , MA	<i>B</i> <sub>max</sub> , 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
<b>ОИ</b> 1_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

Таблица 7. Основные параметры обмоток индуктора токамака TRT

Обозначения в таблице 7: ОИ — обмотка индуктора, R — средний радиус катушки, Z — расстояние от центра плазмы до центра катушки,  $\Delta R$  — ширина катушки,  $\Delta Z$  — высота катушки,  $N_{\text{витк}}$  — количество витков в катушке, AW — ампер-витки,  $B_{\text{max}}$  — 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 возникать 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 соленоида 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), сваренных из тонких листов, расположенных равномерно по окружности с наружной и внутренней сторон ОИ. Стержни соединены с жесткими фланцами вверху 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 наибольшим сжимающим электромагнитным нагрузкам. Требуемое осевое натяжение в конструкции достигается частично предварительным натяжением при комнатной температуре и частично во время захолаживания.

#### 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 то-ков, протекающих по обмоткам, расположение



Рис. 11. Индуктор ТВТ. Слева – общий вид, справа вверху – 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 обмотов	с управления TRT
---------------------	-------------------	------------------

N⁰	<i>R</i> , мм	<i>Z</i> , мм	$\Delta R$ , мм	Δ <i>Ζ</i> , мм	Витки	Провод, мм	AW, кА	Длина провода в катушке, м	Кол-во галет в катушке
ОУ1	1500	2730	497	363	140	$28 \times 28$	6030	1320	5
ОУ 2	3000	2550	188	154	20	$28 \times 28$	890	380	2
ОУ 3	4300	1200	291	363	80	$28 \times 28$	3510	2160	5
ОУ 4	4300	-1200	325	432	108	$28 \times 28$	4610	2920	6
ОУ 5	3000	-2550	360	363	100	$28 \times 28$	4220	940	5
ОУ 6	1500	-2730	497	363	140	$28 \times 28$	6030	1320	5

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

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021



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.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

цию вертикального положения плазмы при ее неконтролируемых смещениях до  $\approx 6$  см с учетом собственной индуктивности обмотки и ее магнитной связи с плазмой и вакуумной камерой ( $\approx 1.3 \text{ мГн}$ ) и сопротивления обмотки ( $\approx 2.6 \text{ мОм}$ ).

#### 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 проводам из ВТСП с высокими электротехническими характеристиками, пригодных для работы в магнитных полях уровня 15 Тл и выше, с конструктивной плотностью тока  $j_{TF} \approx 35 \text{ MA/m}^2$  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 B.V., Goncharov P.R. // Fusion Science and Technology. 2020. V. 76. P. 836.
- 2. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Е.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. В печати.
- 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.
- Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Динабуре Л.Б., Калинин В.В., Константинов А.Б., Костенко А.И., Малышев И.Ф., Моносзон Н.А. Электрофизическая аппаратура / Под. ред. В.А. Глухих. М.: Атомиздат, 1979. В. 17.
- 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.
- Мазуль И.В., Гиниятулин Р.Н., Кавин А.А., Литуновский 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.
- Weiss J. // Proc. MT-26. Intern. Conf. Magnet Technology, Vancouver, 2019. https://indico.cern.ch/event/763185/contributions/3415952/
- 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.
- Bykovsky N. // Supercond. Sc. Technol. 2017. V. 30. 024010.
- 19. Uglietty D. // J. Cryogenics. 2020. doi: 10.1016. 103118
- 20. *Amemiya N.* // Int. Conf.Magnet Technology (MT-26), Vancouver. 2019. V. 10. P. 1.
- 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.

УДК 533.9

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ВТСП-ПРОВОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ TRT

© 2021 г. В. Е. Сытников<sup>*a*, *b*, \*, С. А. Лелехов<sup>*b*, \*\*</sup>, А. В. Красильников<sup>*b*</sup>, В. В. Зубко<sup>*c*</sup>, С. С. Фетисов<sup>*c*</sup>, В. С. Высоцкий<sup>*b*, *c*, \*\*\*</sup></sup>

<sup>а</sup> Научно-технический центр Федеральной сетевой компании единой энергетической системы — НТЦ ФСК ЕЭС, Москва, Россия <sup>b</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный Центр ИТЭР", Москва, Россия <sup>c</sup> ОАО "Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности-ВНИИКП", Москва, Россия \*e-mail: sytnikov@ntc-power.ru \*\*e-mail: s.lelekhov@iterrf.ru \*\*\*e-mail: vysotsky@gmail.com Поступила в редакцию 02.04.2021 г. После доработки 26.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Обсуждается возможность создания обмоточных проводов для электромагнитной системы токамака реакторного типа с использованием высокотемпературных (ВТСП) сверхпроводников, работающих при температуре ниже 20 К. Приведены требования к ВТСП-проводам с точки зрения их использования в TRT. Обсуждаются свойства современных ВТСП-лент производства компании СуперОкс. Рассмотрены и предложены перспективные варианты исполнения мощных ВТСП-проводников для TRT.

*Ключевые слова*: токамак TRT, электромагнитная система, высокотемпературные REBCO-сверх-проводники, рабочий ток, плотность тока

DOI: 10.31857/S036729212111024X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт, полученный на разных стадиях проекта ИТЭР и, в частности, при разработке сверхпроводниковой электромагнитной системы (ЭМС) позволил определить направления дальнейшего развития применительно к проводам для сверхпроводниковых ЭМС будущих установок УТС, включая TRT. Основной целью создания токамака TRT является разработка и интеграция в одной установке ключевых термоядерных технологий, реализация многих из которых связана с созданием электромагнитной системы, генерирующей сильное стационарное магнитное поле на оси плазмы. Современные концептуальные проекты магнитов термоядерных установок и иных крупных магнитов предусматривают разработку технических решений для ЭМС с использованием высокотемпературных сверхпроводящих проводов. Применительно к ЭМС термоядерных установок типа "Токамак" одной из основных проблем, которые нужно решить для успешной реализации таких проектов, является создание сильноточных проводников для катушек ЭМС.

При этом чаще всего рассматривается конструкция типа "кабель в оболочке" (в англоязычной литературе — cable-in-conduit conductors или CICC) в различных вариациях. В ряде случаев предусматривается комбинация в одной установке как обмоток с низкотемпературными (НТСП), так и с ВТСП-проводниками. Конкретный выбор определяется техническими, технологическими и стоимостными характеристиками.

В последние годы в мире возник большой интерес к созданию относительно компактных установок с сильным магнитным полем [1–3], достигающим на оси плазмы величины 7–12 Тл. При этом максимальное поле на обмотках будет в пределах 15–21 Тл (проекты SPARC, TRT, ARC). Современные ВТСП-материалы рассматриваются как ключевой элемент таких установок, так как позволяют увеличить индукцию магнитного поля в рабочем объеме, уменьшить размер и снизить стоимость. Исходя из опыта использования НТСП-материалов, считается, что их возможности близки к достижению своего предела, а необходимым потенциалом для дальнейшего повы-



**Рис. 1.** Принципиальная схема электромагнитной системы TRT.

шения характеристик обмоточных проводов до необходимого уровня обладают ВТСП-материалы, если их использовать при пониженных температурах, вплоть до температуры жидкого гелия 4.2 К.

Применительно к ЭМС российского токамака TRT [4] задачу повышения индукции предполагается решить использованием высокотемпературных сверхпроводников. Сильноточные BTСП-провода могут быть использованы для катушек обмоток тороидального поля, секций центрального соленоида и обмоток управления.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ОБМОТОЧНЫМ ПРОВОДАМ ЭМС TRT

В качестве базы для разработки конструкции и последующего анализа проводов, будут использованы расчетные условия работы обмоток ЭМС TRT, изложенные в работе [4]. Здесь же будут показаны условные конструкции проводов, которые, наряду с предложенными в данной статье, могут рассматриваться как один из возможных вариантов при изготовлении обмоток ЭМС TRT. На текущий момент все предложенные конструкции требуют дальнейшего теоретического и экспериментального обоснования. Принципиальная схема ЭМС TRT показана на рис. 1.

Электромагнитная система включает обмотки тороидального поля (ОТП), центральный соленоид, выполняющий функции индуктора при зажигании плазмы (ОИ), полоидальные обмотки, обозначенные как обмотки управления (ОУ). Кроме того, в системе присутствуют корректирующие катушки, не показанные на рис. 1. При изготовлении всех этих обмоток планируется ис-



Рис. 2. Принципиальные конструкции проводников ОТП (слева) и ОИ (справа), предварительно заложенные в эскизный проект ЭМС ТRТ. Черными кругами условно обозначены сверхпроводящие элементы. Размеры приведены в мм.

пользование сверхпроводящих проводов. Условия работы обмоток существенно различаются. В наиболее напряженных условиях работают провода ОТП и ОИ, которым и будет уделено основное внимание ниже.

При этом отметим ряд особенностей конструкции обмоток крупных ЭМС.

 В силу ряда причин оптимальным решением для обмоточного провода оказывается сильноточная (30–100 кА) многожильная транспонированная конструкция.

– Обмотки ТРТ испытывают большие механические нагрузки и, чтобы им противостоять, примерно 70% сечения обмотки занимает структурный материал (сталь, бронза) и лишь 30% собственно провод. Кроме того, в конструкцию должны быть включены каналы охлаждения и стабилизирующий материал.

 Известно, что в ряде случаев электромагнитные силы, генерируемые током в проводе, представляют серьезную проблему для самого провода, вызывая деградацию его токонесущей способности.

Принципиальные схемы проводов ОТП и ОИ представлены на рис. 2 [4]. Сформулируем основные технические требования к проводам базируясь на результатах предварительного проектирования ЭМС TRT [4].

 Конструктивное исполнение: "кабель-воболочке" – сверхпроводящие субкабели в требующемся количестве помещены в силовую теплопроводящую структуру и заключены в герметичную оболочку из нержавеющей стали.  Диапазон изменения индукции магнитного поля на обмотке – 0–15 Тл. Провод охлаждается косвенно потоком хладагента, прокачиваемого через отверстия в силовой структуре.

Рабочий диапазон температур ОТП – 4.2–
 15 К.

– Предельная рабочая температура – 20 К.

- Рабочий диапазон температур ОИ - 4.2-20 К.

 – Рабочая линейная плотность тока по ВТСПленте проводника ОТП – 74 А/мм.

 – Рабочая линейная плотность тока по ВТСПленте проводника ОИ – 60 А/мм.

– Рабочий ток провода ОТП – 74 кА.

- Рабочий ток провода ОИ - 60 кА.

 Конструктивная рабочая плотность тока провода ОТП – 140 А/мм<sup>2</sup>.

 Конструктивная рабочая плотность тока провода ОИ без изоляции — 89 А/мм<sup>2</sup>.

– Запас по току как соотношение критического тока к рабочему при изменении температуры от 4.2 К до 20 К должен изменяться в пределах от 2.0 (при 4.2 К) до 1.2 (при 20 К) и уточняется в процессе оптимизации проводников.

 Желательно получить максимально однородное распределение тока между ВТСП-лентами, что обеспечит минимальный расход сверхпроводящих материалов.

 Должна быть предусмотрена возможность использования конструктивных решений по снижению потерь энергии в проводах.

 Конструкция ВТСП-провода должна предусматривать надежную технологию изготовления низкоомных соединений.

 Допустимый радиус изгиба провода должен допускать изготовление обмоток ЭМС без существенного снижения токонесущей способности используемых ВТСП-лент.

 Количество ВТСП-лент, элементов, размер канала и характеристики используемых материалов в конструкции провода — предмет оптимизации, которая должна быть выполнена по результатам расчетов и экспериментальных исследований образцов элементов и проводов.

#### 3. КРАТКИЙ ОБЗОР МИРОВЫХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ВТСП-ПРОВОДНИКОВ

В существующих и проектируемых крупных магнитных системах сильноточные провода обеспечивают генерацию магнитных полей с максимальной индукцией магнитного поля на обмотке 5.0–21.0 Тл. При этом рабочие токи могут составлять 5.0–100.0 кА. В таких магнитах на провод воздействуют значительные механические нагрузки, вызванные силами Лоренца. Кроме того, значительная запасенная энергия в крупных магнитах требует наличия в обмотке элементов, обеспечивающих аварийный вывод энергии при приемлемом напряжении и нагреве обмотки, не приводящем к повреждению ее элементов. Таким образом, в сверхпроводящем сильноточном проводе типа "кабель в оболочке" кроме собственно сверхпроводника должны присутствовать упрочняющие элементы, стабилизирующий металл (обычно медь или алюминий), электрическая изоляция и каналы для прокачки охлаждающего агента. Площадь этих элементов в поперечном сечении проводника определяется для каждого конкретного проекта. В настоящее время в литературе описано большое количество сверхпроволяших сильноточных проводов. предназначенных в первую очередь для создания магнитов термоядерных установок, которые условно можно разделить на несколько групп [5, 6].

#### 3.1. Проводники на основе стопок ВТСП-лент

Проводники, показанные на рис. 3, обычно называют общим термином "проводники на основе стопок лент" (Stacked-Tape Conductor). Первичным элементом в таких проводах являются стопки лент, которые либо располагаются в плоскости (рис. 3а) [7], либо скручиваются вдоль продольной оси (рис. 36, в) [8, 9]. Далее несколько таких стопок лент собираются в токопроводящую жилу провода, как это показано на рис. 3г. д [10. 11]. Токопроводящая часть провода собирается в две стадии. На первой стадии собираются стопки лент, которые могут пропаиваться (рис. 36, г), скручиваться (рис. 36, в) и/или заключаться в медную оболочку (рис. 3а, г). На второй стадии подготовленные стопки либо располагаются "в линию" (рис. 3а), либо скручиваются вокруг сердечника (рис. 3г, д).

Сильноточные провода обычно заключаются в кожух из нержавеющей стали для обеспечения механической прочности и устойчивости. Характерной особенностью таких проводов является отсутствие транспозиции лент на первой стадии и транспозиция стопок лент на второй стадии (кроме рис. 3а).

#### 3.2. Проводники на основе скруток ВТСП-лент

Первичным элементом в таких проводах является многослойная скрутка лент (рис. 4а, в), которые на последующей стадии скручиваются вдоль продольной оси (рис. 4б, г). Как и в предыдущих конструкциях, токопроводящая часть провода собирается в две стадии. Первичная многослойная скрутка получила название CORC wire [12– 14] и, соответственно, провода, показанные на рис. 4 называют проводами типа CORC. Основным стимулирующим фактором создания таких проводов послужило желание создать более гиб-



Рис. 3. Проводники на основе стопок ВТСП-лент. Проводники, предложенные компаниями: NIFS (Япония) (а), КІТ (Германия) (б), МІТ (США) (в), EPFL (Швейцария) (г), ENEA (Италия) (д).



Рис. 4. Проводники типа CORC (а, в из [14], б, г из [12]).

кий по сравнению со стопками ВТСП-лент элемент, позволяющий наматывать провод на меньший радиус. Это достигается скруткой вокруг сердечника малого диаметра большого количества очень тонких (30–50 мкм) и узких (1–3 мм) ВТСП-лент (рис. 4в). В этих проводах, как и в проводах на основе стопок лент первичный элемент не является транспонированным.

#### 3.3. Особенности проводников типа Stacked-Tape Conductor и типа CORC Conductor

Первичные элементы в обеих конструкциях не являются транспонированными, что приводит к различным импедансам отдельных сверхпроводящих лент. Напряжение, генерированное в каждом элементе при изменении тока, описывается соотношением

$$U_i = R_i I_i + l_i L \frac{dI_i}{dt},\tag{1}$$

где  $dI_i/dt$  — скорость изменения тока; L — длина провода;  $l_i$  — эффективное значение индуктивности единицы длины ВТСП-элемента и  $R_i$  — эффективное значение активного входного сопротивления *i*-го элемента.

Второе слагаемое в формуле (1) увеличивается с увеличением длины и в силу различной величины *l*, между отдельными элементами возникает разница потенциалов, что приводит к появлению токов перетекания между ВТСП-элементами и дополнительным потерям энергии. Этот нежелательный процесс зависит от скорости изменения тока, величины поперечного сопротивления и разницы в индуктивности элементов. Последствия процесса перетекания токов могут приводить к снижению критического тока провода и увеличению потерь энергии и зависят от теплоемкости провода, эффективности его охлаждения и запаса по току. Снижение негативного влияния этого процесса является одной из задач оптимизации конструкции обмоточного провода.

При испытаниях коротких образцов характер распределения токов между элементами провода определяется соотношением активной и реактивной частей импеданса элементов.

Очевидно, что при проведении экспериментов на коротких образцах следует соблюдать соотношение

$$\frac{I_i}{l_i} \ll \frac{dI_i}{dt} L \frac{1}{R_i}.$$
(2)

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

При несоблюдении условия (2) токи в элементах будут определяться не конструкцией провода, как в реальном проводнике, а качеством присоединения ВТСП-элементов к токовым вводам.

Следует отметить, что существует несколько технических решений, позволяющих создавать транспонированные первичные элементы с равномерным распределением тока между ВТСП-лентами. Примером такого решения являются многоповивные конструкции жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых возможно добиться одинаковой индуктивности повивов [15, 16] и достичь равномерного распределения токов. Важным вопросом является увеличение плотности тока в таких конструкциях и обеспечение достаточной механической устойчивости.

В качестве полностью транспонированного первичного элемента могут использоваться так называемые кабели Ребеля (Roebel cable) [17, 18]. Однако это направление пока не получило достаточного развития, что связано с низкими механическими характеристиками и высокой стоимостью кабеля, при изготовлении которого значительная часть дорогостоящей ВТСП-ленты уходит в отходы.

Недавно был предложен еще один вариант создания полностью транспонированного первичного элемента [19], который будет описан ниже в разделе 5.3.

В заключение обзорной части статьи отметим, что ни одна из вышеприведенных конструкций проводников не удовлетворяет в полной мере требованиям к проводникам TRT, изложенным в разд. 2. Отчасти это связано с тем, что в вышеприведенных работах использовались ВТСП-ленты с относительно не высоким уровнем критической плотности тока. Однако последние достижения Российской компании ЗАО "СуперОкс" в области создания ВТСП-лент, предназначенных для работы в сильных магнитных полях при температурах 4.2–20 К, позволяют считать задачу создания ВТСП-проводников для обмоток реактора ТRT вполне выполнимой.

## 4. БАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТСП-ЛЕНТ КОМПАНИИ ЗАО "СУПЕРОКС"

В дальнейших расчетах принята за базовую ВТСП-лента второго поколения производства компании СуперОкс [20, 21].

Архитектура ВТСП-ленты и ее поперечное сечение показаны на рис. 5. Лента выпускается на подложке из хастеллоя марки С276 толщиной 40, 60 или 100 мкм. Стандартная ширина ленты от 4.6 до 12 мм. По специальному заказу может быть изготовлена лента на подложке толщиной 30 мкм и любой ширины, но не более 12 мм. Финишный слой может изготавливаться из серебра, меди, припоя или изоляционного материала. Критический ток лент, в поперечном поле при температурах 4.2 и 20 К показан на рис. 6. Толщина ленты, покрытой слоем меди, толщиной 5–6 мкм с подложкой толщиной 40 мкм составит 56 мкм, с подложкой 60 мкм — 76 мкм и с подложкой 100 мкм — 116 мкм.

В зависимости от толщины ленты конструктивная плотность тока может достигать величины 1000 А/мм<sup>2</sup> в поперечном поле 20 Тл (рис. 7).

На основании данных для ВТСП-лент шириной 4 мм примем усредненное расчетное значение критического тока лент для проводов установки TRT:

 $I_c(15 \text{ Тл}, 4.2 \text{ K}) = 600 \text{ A} - \text{не менее } 150 \text{ A/мм}$ ширины;

 $I_c(15 \text{ Тл}, 20 \text{ K}) = 300 \text{ A} - \text{не менее 75 A/мм ши$  $рины;}$ 

 $I_c$ (15 Тл, 15 К) ~ 363А — не менее 90.8 А/мм ширины.

Для ВТСП-лент характерен высокий уровень тепловыделений при работе в изменяющемся магнитном поле, особенно при его ориентации перпендикулярно плоскости ленты. Для снижения тепловыделений, связанных с гистерезисными потерями в ленте, может быть предусмотрена возможность филаментизации ленты, т.е. разделение сверхпроводящего слоя на несколько тонких параллельных полос на общей подложке. Однако этот вопрос нуждается в дополнительных исследованиях с точки зрения технологичности и эффективности процесса филаментизации. С другой стороны, для снижения кооперативных потерь в ВТСП-жиле провода могут использоваться конструктивные решения, приводящие к увеличению поперечного сопротивления.

#### 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ РЕАКТОРА ТRT

Как отмечалось выше, при изготовлении сверхпроводящих проводов для ОТП и ОИ планируется использовать высокотемпературные материалы второго поколения – ВТСП-2. Это связано, в первую очередь, с наличием на обмотке высоких магнитных полей индукцией до 15 Тл. Максимальная индукция магнитного поля на полоидальных обмотках и корректирующих катушках существенно ниже 10 Тл при рабочих токах 45 кА для обмоток ОУ и 30 кА для корректирующих катушек. Для этих условий при создании двух последних типов обмоток могут использоваться как ВТСП-материалы, так и НТСП-материалы. При применении НТСП-материалов может использоваться богатый опыт изготовления сверхпроводящих обмоток, накопленный в рам-

#### СЫТНИКОВ и др.



Рис. 5. Архитектура и поперечное сечение лент ВТСП второго поколения.

ках выполнения проекта ИТЭР. Окончательный выбор типа проводника для ОУ и корректирующих катушек будет сделан по результатам технико-экономического сравнения.

Принимая во внимание тот факт, что требования, предъявляемые к проводам обмоток ОТП и ОИ наиболее жесткие (см. разд. 2), ниже будут рассмотрены преимущественно провода для этих обмоток.



**Рис. 6.** Критический ток ВТСП-лент компании ЗАО "СуперОкс", измеренный в различных лабораториях. Магнитное поле параллельно оси "с".

## 5.1. Проводник для катушек тороидального поля на основе кабеля из стопки параллельных не скрученных ВТСП-лент (раздел представил Лелехов С.А.)

Специфические электрофизические и механические свойства ВТСП-лент усложняют изготовление транспонированных проводов и магнитов на их основе. Идея использовать несколько параллельных, не скрученных стопок, состоящих из ВТСП-лент, не спаянных по длине, в качестве токопроводящей жилы сильноточного проводника для катушек тороидального поля токамаков была озвучена на ASC14 [22]. Там же были представлены и основные рекомендации для реальной конструкции проводника типа "кабель-в-оболочке".

Конструкция и технология изготовления как жилы, так и самого провода в этом случае значительно проще, рабочий ток распределяется между лентами в стопке почти равномерно согласно оценкам, сделанным в [23], сжимающая сила направлена в наиболее выгодном (перпендикулярно плоскости ленты) направлении, а критический ток ленты  $I_c(B,T,\theta)$  значительно (в 5–6 раз) выше в области максимального поля при  $B_{\rm max} = 15$  Тл и температуре 4.2 < T < 20 K, чем в скрученной стопке лент из-за анизотропии электрофизических свойств ленты [21]. Это происходит из-за близкой к параллельной ориентации вектора индукции тороидального поля к плоской поверхности ленты (угол 0° <  $\theta$  < 20° градусов,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021


Рис. 7. Конструктивная плотность тока лент при толщине подложки 40, 60 и 100 мкм.



**Рис. 8.** Зависимость критического тока ленты фирмы "СуперОкс" шириной 4 мм от угла наклона  $\Theta$  компоненты вектора внешнего поля  $B_{\parallel}$  к плоскости ленты при различных  $B_{\parallel}$  и T (а) и "наиболее выгодная" взаимная ориентация компонент векторов  $B_{\parallel}$  и I (б).

рис. 8) в большинстве точек по объему тороидальной катушки. Основными аргументами против рассматриваемой конструкции провода являются серьезные опасения, что определенные выше идеальные условия имеют место не везде в пределах объема катушки [24] и не соблюдаются во всех режимах работы токамака, а время зарядки ОТП (введение тока и поля) должно быть неоправданно большим согласно [25], чтобы избежать превышения величины индуцированного экранирующего тока выше критического значения. Обоснованность перечисленных выше опасений лучше всего рассматривать в привязке к конкретной, предлагаемой для токамака TRT конструкции ОТП [4].

**5.1.1. Конструкция проводника** для катушки тороидального поля. Предлагаемая для катушек тороидального поля токамака TRT концептуальная конструкция проводника на основе ВТСП-жилы из стопки параллельных не твистированных лент типа СІСС представлена на рис. 9. Окончательные конструкция и размеры жилы и провода определятся на стадии разработки технологии изготовления провода и магнита как единого целого.

Согласно оценкам, сделанным на основании результатов работ [21, 23, 24] критический ток ленты шириной 12 мм при внешнем поле, параллельном плоскости ленты –  $B_{\parallel} = 15$  Тл и температуре 4.2 К составит не менее  $I_c \sim 7500$  А (или ~600 кА для стопки из 80 лент) и  $I_c \sim 2700$  А (или ~200 кА для стопки из 80 лент) при внешнем поле, перпендикулярном плоскости стопки лент,  $B_{\parallel} < 10$  Тл и температуре 4.2 К.

При рабочем токе ОТП  $I_{op} = 74$  кА запас по критическому току –  $k \approx 8.1$  и 2.7 соответственно. При температуре 20 К, величина критического



**Рис. 9.** Предлагаемая для катушек тороидального поля токамака TRT концептуальная конструкция проводника на основе кабеля из стопки параллельных не транспонированных лент типа СІСС: *1* – оболочка кабеля, *2* – стабилизирующий материал, *3* – кабель из стопки ВТСП-лент, *4* – оболочка кабеля. Размеры приведены в мм.

тока и запас по току снижаются примерно в 2 раза (рис. 6 и 10), т.е. провод остается вполне работоспособным при температуре 20 К. При дальнейшей оптимизации проводника возможно уменьшение количества ВТСП-лент или использование лент меньшей ширины. Толщина стенки внешней оболочки ~1.5 мм и внешние размеры стабилизированного проводника после компактирования 21 на 33 мм<sup>2</sup> выбраны в предположении, что проводник размещается в спиральной канавке упрочняющей пластины. Площадь, занимаемая ВТСП-лентами, сталью и стабилизирующей медью с RRR > 100 в сечении проводника равны соответственно 72, 150 и 300 мм<sup>2</sup>.

Охлаждение проводника осуществляется двумя параллельными потоками сверхкритического гелия. Один поток течет по двум полукруглым каналам оболочки кабеля общей площадью  $S_1 = 28 \text{ мм}^2$ . Второй — в зазорах между стабилизирующими медными проволоками. Здесь ожидаемое соотношение между площадью, занимаемой гелием  $S_2 = 33.3 \text{ мм}^2$  и всей площадью сечения между ВТСП жилой и внешней оболочкой проводника после компактирования примерно 1:8 (void fraction ~12.5%).

Отклонение вектора индукции магнитного поля от направления параллельного плоскости ленты на периферии катушки тороидального поля  $\Theta$ может достигать 15° и даже 20°. Но это имеет место в тех областях обмотки, где индукция магнитного поля существенно (в 2–3 и более раз) меньше его максимального значения, и где, соответственно, критическая плотность тока также в разы выше (рис. 8 и [21]).

Анализ распределения вектора индукции магнитного поля  $B(J, T, \Theta, E)$  (где J – плотность тока, Е – напряженность электрического поля) по объему катушки показывает, что наиболее напряженная точка в нашем случае (точка, где соотношение критической и рабочей плотности тока минимально) не совпадает с точкой, где магнитное поле имеет максимальное значение. Исходя из вышеизложенного, количества ВТСП-материала, необходимого для изготовления магнита тороидального поля из проводника с параллельными не транспонированными лентами, при том же коэффициенте запаса по критическому току  $k = I_c(B, T, \Theta, E)/I_{op}$  в наиболее напряженной точке обмотки, потребуется все же существенно меньше, чем в транспонированном, тем или иным образом проводнике с аналогичным запасом по току за счет преимущественно использования близкой и параллельной ориентации плоскости ленты и вектора индукции магнитного поля.

То же самое относится и к механическим напряжениям, возникающим в "невыгодном" направлении к плоскости ленты

$$\sigma = jrB_{\parallel}\sin\Theta, \qquad (3)$$

где  $\sigma$  — механическое напряжение, МПа; *j* — плотность тока в ленте А/мм<sup>2</sup>; *r* — радиус изгиба проводника в данной точке, м;  $B_p \sin \Theta < 5^\circ = B$  — составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная плоской поверхности ленты.



**Рис. 10.** Схематическое изображение ЭМС токамака (а), упрощенное распределение тороидального поля  $B_{\parallel}$  по длине проводника *L* в катушках ОТП (б), распределение полоидального  $B_{\parallel}$  по длине *l<sub>i</sub>* каждого из витков катушки ОТП (в).

По оценкам автора (на основе книги [25]) неравномерность распределения тока между лентами в стопке параллельных лент при геометрии ОТП TRT будет не более 2%. Однако эти расчетные оценки, как и оценки, сделанные в [23] нуждаются в экспериментальном подтверждении.

**5.1.2. Режимы работы проводника в ОТП ТКТ.** Все вопросы, рассмотренные в этом разделе детально проанализированы в [26] поэтому ниже будет дано лишь их краткое описание.

Продолжительность режима зарядки для рассматриваемой здесь конструкции магнитной системы и проводника ОТП (рис. 9) с учетом индуктивности проводника и волнообразного изменения поля на длине каждого из витков катушки (рис. 10) не превысит согласно [26] 3-х часов, что вполне приемлемо для магнита тороидального поля ТРТ.

В режиме зажигания и возрастания тока плазмы, составляющая вектора индукции магнитного поля, перпендикулярная плоскости ленты,  $B_{\perp}$ , которая создается катушками полоидального поля, секциями центрального соленоида и полем тока плазмы изменяется на 180° на полудлине витка. Величина этого поля, в наиболее напряженной точке (зеленая точка на рис. 10) не превышает 1 Тл, время нарастания поля 10 с и соответственно темп dB/dt = 0.1 Тл/с. Величина вектора стационарного поля, параллельного плоскости ленты в этой точке,  $B_{\parallel} \approx 10-12$  Тл.

Критический ток здесь примерно в 1.5 раза выше, чем при  $B_{\parallel} \approx 15$  Тл. Отклонение результирующего вектора поля —  $B = B_{\parallel} + B_{\perp}$  от направления параллельного плоской поверхности кабеля составляет ( $\Theta < 5^{\circ}$ ). Это не приводит к заметному снижению критического тока в каждой из лент. Индуцированный перпендикулярной составляющей поля  $B_{\perp} < 1$  Тл (dB/dt = 0.1 Тл/с), экранирующий ток и нагрев кабеля за счет потерь на переменном токе могут быть существенно снижены также и за счет филаментизации лент [27]. Гистерезисные потери энергии в пакете лент, генерированные поперечной компонентой индукции магнитного поля, могут быть уменьшены без применения филаментации за счет использования нескольких параллельных пакетов лент меньшей ширины. Например, пакет из 12 мм лент может быть заменен на три параллельных пакета 4 мм лент. Однако это стоит делать только в том случае если будет доказано, что потери энергии, вызванные поперечной компонентой поля, являются превалирующими.

При режиме защитного вывода энергии (ЗВЭ) упрощенно, все сводится к выбору разумного компромисса между допустимой максимальной температурой нагрева проводника в горячей точке  $T_{\rm max} < 200$  К и допустимым максимальным электрическим напряжением  $U_{\rm max} < \pm 3.5$  кВ. Тороидальная обмотка при защитном выводе энергии разделяется на четыре части. Количество стабилизирующей меди с RRR > 100 и теплоемкость материалов (медь + нержавеющая сталь) в сечении проводника с учетом того, что значительная часть запасенной энергии выделится из-за взаимной индуктивности контуров в упрочняющих пластинах галет и корпусе катушки [28], обеспечат допустимые с точки зрения термомеханиче-

ских напряжений и электрической прочности возрастания температуры и напряжения. Следует отметить, что при расчете максимальных значений температуры и напряжения нужно учитывать время задержки включения системы ЗВЭ. С точки зрения минимизации времени задержки срабатывания системы защиты, провод из нетвистированной стопки параллельных лент является предпочтительным, по сравнению с твистированным аналогом, так как скорость распространения нормальной зоны в нем значительно выше [29]. В нашем случае принималось, время задержки не более 2 с.

Проделанные в [26] и в данной работе оценки работоспособности предложенной конструкции проводника, предназначенного для катушек тороидального поля на основе ВТСП-провода, изготовленного из стопки параллельных нетвистированных, не спаянных между собой лент, подтверждают его надежность во всех основных режимах работы СМС ТП токамака TRT, как при T = 5 K, так и при T = 20 K. Однако, подтверждение сделанных оценок нуждается в проведении всесторонних экспериментальных исследований.

## 5.2. Провода на основе многоповивных скруток с равномерным распределением токов по повивам (раздел представили Высоцкий В.С., Зубко В.В., Фетисов С.С.)

Для обмоток тороидального поля на основе ВТСП (с относительно медленно меняющимся магнитным полем) возможным приемлемым решением могут быть проводники на основе пакетов ВТСП, лент, например типа VIPER [30] (аналог, показанному на рис. 3е). Но такое решение, по мнению авторов, непригодно для центрального соленоида и для полоидальных катушек. Для таких магнитов необходимы сверхпроводники с равномерным распределением токов по лентам. В противном случае, свойства сверхпроводников не будут полностью использованы, а потери при переменном поле значительно повысятся. Впрочем, обеспечение равномерного распределения токов весьма желательно для любого типа проводника.

Как уже упоминалось выше, в разд. 3.3, существует несколько технических решений, позволяющих создавать сверхпроводящие первичные элементы с равномерным распределением тока между ВТСП-лентами. Примером такого решения являются многоповивные конструкции жил сверхпроводящих силовых кабелей, в которых удается выровнять индуктивности повивов [15, 16]. Однако конструкции токопроводящих жил обычных силовых кабелей имеют достаточно большие размеры и относительно низкую плотность тока.

В ОАО "ВНИИКП" были проведены исследования возможности максимального снижения диаметра жилы провода со скрученными повивами и с увеличенным числом повивов [31, 32] при сохранении равномерного распределения тока по лентам. Снижение диаметра сверхпроводящей жилы позволяет снижать минимальный диаметр изгиба проводника, что является важным параметром. Малый диаметр проводника позволяет повысить плотность тока при сохранении заданного количества сверхпроводника. Для создания таких кабелей с малым диаметром и равномерным распределением тока между лентами, были разработаны специальные методы расчета и оптимизации, а также технологические приемы изготовления силовых кабелей [32].

В качестве начального примера рассмотрим самый компактный ВТСП силовой кабель, разработанный и испытанный на сегодняшний день [31] (рис. 11а). ВТСП-жила состоит из 4 повивов и 20 лент шириной 3 мм при наружном диаметре 13.06 мм. Жила кабеля была затянута в трубку из нержавеющей стали диаметром 15 мм и толщиной стенки 1 мм, а затем обжата до наружного диаметра трубы в 14 мм. Критический ток в собственном поле при температуре 77.4 К составил 3250 А. жила может быть изогнута на диаметр не менее 60 см, без потери критического тока. В конструкции использовались ленты СуперОкс предыдущего поколения, не предназначенные для работы в высоких магнитных полях при температуре 4.2 К. Все расчетные параметры и равномерность распределения тока по лентам были подтверждены в режиме постоянного тока и на частотах от единиц до 400 Гц. Легко оценить, что при этих частотах и амплитуде тока в 3200 А, амплитуда магнитного поля на поверхности внешнего повива составит порядка 0.1 Тл, а скорость изменения магнитного поля от 30 до 245 Тл/с. То есть высокая скорость изменения собственного магнитного поля не нарушает работоспособности ВТСП-ленты при ее охлаждении жидким азотом. Этот эксперимент показал принципиальную возможность создания ВТСП-проводников с упрочнением нержавеющей сталью и равномерным распределением тока по лентам. Мы рассматриваем эту жилу как прототип для кабелей с большим числом повивов. Такая конструкция обеспечивает равномерное распределение тока между лентами и достаточную механическую прочность за счет оболочки из нержавеющей стали. Достаточное количество меди для стабилизации и защиты при переходе в нормальное состояние может быть обеспечено за счет формера – центрального элемента, выполненного из медных проволок.

Токонесущую способность проводника такого типа можно существенно повысить, увеличивая количество повивов с сохранением правильно рассчитанных шагов и направления скрутки. Для



**Рис. 11.** Многоповивный (многослойный) ВТСП-проводник с равномерным распределением тока по лентам в трубе из нержавеющей стали: четырехповивный прототип изготовленный и испытанный во ВНИИКП (а); сечение предлагаемого десятиповивного кабеля в размерах близких к размерам на рис. 2 (б).

оценки возможности создания такого проводника, в качестве примера, был выполнен расчет возможной конструкции десятиповивной жилы. При этом мы строго ориентировались на размер проводника наиболее близкого к предложенному в расчетах ЭМС TRT (рис. 2). Мы сохранили все основные размеры проводника, количество меди и усиливающие элементы, просто заменив область расположения сверхпроводника между диаметрами 13 и 22.3 мм на соответствующую сверхпроводящую скрутку. Относительная рыхлость сверхпроводящей скрутки может быть преодолена дополнительным упрочнением формера центрального несущего элемента, которое здесь пока не рассматривается.

В расчете задача определения равномерного распределения тока по повивам сформулирована как задача минимизации следующей целевой функции:

$$F(X) = \min f(X) =$$

$$= \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^{m} |I_i(X) - I_j(X)| +$$

$$+ \sum_{i=m+1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} |I_i(X) - I_j(X)|,$$
(4)

где  $I_i$  — максимальные значения токов в повивах;  $X = [r_1, \beta_1, a_1, r_2, \beta_2, a_2, ..., r_N, \beta_N, a_N]$  — вектор управляющих переменных;  $r_i$  — внутренний радиус повива;  $a_i$ , — направления наложения ВТСП-лент в повиве;  $\beta_i$  — угол наложения ВТСП-лент в повиве.

Первые расчеты привели к выводу, что приемлемым вариантом будут 10 слоев, скрученных в одну сторону. Внутренний диаметр 18.6 мм. В проводе 10 слоев лент, шириной 4 мм и толщиной 105 мкм (подложка 60 мкм, слои меди по 20 мкм). В каждом слое по 14 лент, полное количество лент — 140 (рис. 11б). Направление наложения лент одинаковое. В табл. 1 приведены параметры жилы предлагаемого провода. Между повивами жилы для стабилизации и выравнивания полигональной структуры наматывается 2 слоя медной ленты толщиной 50 мкм. При поле 15 Тл и температуре 4.2 K, критический ток в ленте будет около 600 A [21].

Суммарный критический ток при 140 лентах составит порядка 84 кА при 4.2 К и 15 Тл. Конструктивная рабочая плотность тока для проводника ОТП (рис. 2, слева) – составляет 140 А/мм<sup>2</sup>, для проводника ОИ (рис. 2, справа) – 89 А/мм<sup>2</sup> (см. раздел 2).

Возможен вариант скрутки в двух направлениях, а также другие варианты соотношения диаметров скруток вписанных в габариты проводников, показанных на рис. 2. То есть в предложенной, сравнительно простой технологически, конструкции с использованием имеющихся во ВНИИКП технологий скрутки кабельных жил и джекетирования, в принципе, достижимы достаточно высокие плотности тока, при соответствии конструкции проводника размерам и параметрам, предложенным для ЭМС TRT. Конечно, требуется изготовление опытных образцов такого типа и их испытания в сильных магнитных полях и при гелиевой температуре. И возможная доработка конструкции провода. Но предварительный расчет показывает возможность реализации

Номер повива	Диаметр наложения, мм	Угол наложения, град	Количество лент			
1	18.6	8	14			
2	19.01	8.64	14			
3	19.42	10.02	14			
4	19.83	12.07	14			
5	20.24	14.7	14			
6	20.65	17.85	14			
7	21.06	21.46	14			
8	21.47	25.45	14			
9	21.88	29.75	14			
10	22.29	34.3	14			

Таблица 1. Параметры предлагаемой жилы провода

такого типа проводников для ЭМС УТС и, в частности, TRT.

В связи с тем, что провода предложенного типа не соответствуют в полной мере требованиям раздела 2, они могут быть использованы в ОПП. При этом они не должны деградировать и терять критические свойства при быстрых изменениях поля, благодаря выровненным индуктивностям повивов и равномерному распределению тока в лентах. Тем не менее деградация может быть вызвана механическими напряжениями и это вопрос требует изучения на релевантном эксперименте. Важным преимуществом таких проводов является относительная простота их изготовления с использованием уже имеющихся технологий.

При этом еще и еще раз следует подчеркнуть, что весьма важным представляется скорейшее проведение испытаний перспективных образцов ВТСП-проводника на стендах с высокими полями.

# 5.3. Провода на основе VS-элементов (раздел представил Сытников В.Е.)

Провод типа "кабель-в-оболочке" с токопроводящей жилой типа VS (V-Shape) является полностью транспонированной конструкцией (рис. 12 и 13) и может использоваться как при создании ОТП, так и при изготовлении секций ОИ. Общая концепция конструкции VS токопроводящей жилы следующая [19]:

ВТСП-ленты располагаются только в один повив;

ВТСП-ленты располагаются радиально;

 между ВТСП-лентами располагаются трапециевидные или треугольные вставки из несверхпроводящего материала, которые могут играть роль, как упрочняющего, так и стабилизирующего материала;  – каждая лента (или две ленты) с вставкой образуют V-образные элементы, которые скручиваются вокруг сердечника (рис. 12).

Такой первичный элемент может использоваться как в качестве токопроводящей жилы провода CICC однократной сборки так и в качестве элемента скрутки в жиле двукратной сборки.

ВТСП-лента и вставка могут предварительно спаиваться или соединяться непосредственно в процессе скрутки токопроводящего элемента первой стадии. При этом контакт ленты со вставкой осуществляется со стороны сверхпроводящего слоя (рис. 5), а контакт между VS-элементами происходит через два слоя хастелоя, что увеличивает поперечное сопротивление жилы и снижает потери энергии в нестационарных режимах. Границы элемента строго определяются радиальными линиями. Такие элементы наматываются на ребро в один слой по всей окружности вокруг круглого опорного элемента и обматываются сверху фиксирующей лентой. Для уменьшения влияния поперечной нагрузки на ВТСП-ленту возможно изготовление трапециевидного элемента несколько большей высоты, чем ширина ленты. В качестве материала такой вставки может использоваться медь, алюминий, бронза, латунь, композиция медь-ниобий, нержавеющая сталь или другие материалы.

Количество VS-элементов в конструкции определяется следующим образом:

$$N = \frac{2\pi r}{(2a+b)k},\tag{5}$$

где r — радиус центрального опорного элемента; a — толщина ВТСП-ленты; b — ширина нижней части трапециевидного элемента; k — коэффициент укрутки.

Основные преимущества конструкции VS токопроводящей жилы следующие.

 Полная транспозиция и, как результат, высокая конструктивная плотность тока и полное использование токонесущей способности ВТСП-лент.

Высокая жесткость конструкции за счет использования прочных клиновых вставок и защита сверхпроводника от поперечных механических нагрузок.

Возможность легко варьировать поперечное сопротивление провода и потери энергии в нестационарных режимах работы за счет использования различных материалов.

Широкие возможности варьирования количеством лент, сечением меди и диаметром элемента.

Недостатки конструкции следующие.

 Отсутствие опыта изготовления VS-элемента и сборки ВТСП токопроводящей жилы провода.



**Рис. 12.** Конструкция проводника VS-типа. Сверхроводящие ленты показаны зеленым цветом, медные вставки – красным.

 Отсутствие информации по минимальному радиусу изгиба и результатов испытаний электрофизических характеристик.

На рис. 13 представлены варианты конструкции VS-проводов однократной скрутки для обмоток токамака TRT. В качестве упрочняющего материала используется нержавеющая сталь, в качестве стабилизирующего материала медь или композиция медь-ниобий в форме цилиндра или скруток из проводок, покрытых никелем для увеличения поперечного сопротивления. В табл. 2 представлены расчетные характеристики проводов однократной сборки. За исходные приняты (с некоторым запасом) характеристики ленты из раздела 4, рис. 6, а именно, лента на подложке толщиной 40 мкм с линейной критической плотностью тока 150 А/мм ширины в поле 15 Тл, при 4.2 К. Рассмотрим конструкции с суммарным критическим током до 120 кА в поле индукцией 15 Тл при 4.2 К. Тогда максимальная конструктивная плотность тока в проводе ОИ при габаритах  $26 \times 26 \text{ мм}^2$  будет равна 178 А/мм<sup>2</sup>, что вдвое больше требуемой рабочей величины 89 А/мм<sup>2</sup>. Это значит, что проводники однократной сборки с максимальным током 120 А обеспечивают требуемый двукратный запас по току. Провода с током менее 100 кА при 4.2 К могут рассматриваться как первичный элемент в проводах двукратной скрутки.

Из табл. 2 следует, что наиболее подходящими для транспонированных проводов однократной скрутки являются конструкции VS2-4 и VS2<sub>0</sub>-4, которые обеспечивают максимальную конструктивную плотность тока для провода ЦС, что соответствует требованиям, изложенным в разд. 2.

Общее сечение сверхпроводящих элементов в условных конструкциях, представленных на рис. 2, равно 127 мм<sup>2</sup>. В конструкциях VS2-4 и VS2<sub>0</sub>-4 сверхпроводящей жилы с учетом сечения

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

вставок сечение равно 120 мм<sup>2</sup> и 95 мм<sup>2</sup>. Это значит, что появляется дополнительная возможность либо уменьшить габариты провода с соответствующим увеличением плотности тока, либо увеличить его защиту.

Конструкции VS1-4 и VS1 $_0$ -4 также представляют интерес, однако они состоят из весьма большого количества элементов, что может представлять определенные сложности при скрутке ВТСП-жилы.

Конструкции VS2-3 и VS2<sub>0</sub>-3, собранные из лент шириной 3 мм представляют интерес для проводов двукратной сборки как это показано на рис. 14а. Такой провод можно рассматривать для обмоток ОИ. При этом, общее сечение при габаритах 18.4 × 36.8 мм остается равным, предложенному в [4], а максимальный расчетный ток будет достигать 120–180 кА в поле 15 Тл при 4.2 К. При 20 К максимальный ток в таком проводнике может достигать 90 кА, т.е. существенно превышать требуемый запас по току при неизменной конструктивной плотности тока.



**Рис. 13.** Конструкции проводов однократной сборки для ОТП (слева) и ОИ (справа). В центре показан первичный элемент: *1* – упрочняющий материал, *2* – стабилизирующий материал, *3* – VS-жила. Габаритные размеры соответствуют рис. 2.

Номер п/п*	Ширина ленты в мм	Толщина ленты и вставки ( <i>a+b</i> ) мкм	Диаметр сердечника <i>r</i> , мм	Количество VS- элементов	Диаметр ВТСП- жилы, мм	Макс. ток І <sub>тах</sub> , кА	Макс. плотность тока по жиле А/мм <sup>2</sup>	Макс. плотность тока по проводу А/мм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
VS1-4	4	56 + 56	5.7	160	14	96	624	142
VS1 <sub>0</sub> -4	4	56 + 0	3.6	200	12	120	1056	178
VS2-4	4	$2 \times 56 + 56$	5.4	100	13.5	120	840	178
VS2 <sub>0</sub> -4	4	$2 \times 56 + 0$	3.4	100	11.5	120	1152	178
VS2-3	3	$2 \times 56 + 56$	3.6	67	9.6	60	828	89
VS2 <sub>0</sub> -3	3	$2 \times 56 + 0$	3.6	100	9,6	90	1248	133

Таблица 2. Оценка максимального расчетного критического тока и плотности тока в VS-проводе центрального соленоида

\*Обозначение VS1 соответствует VS-элементу с одной ВТСП-лентой, VS2 – с двумя ВТСП-лентами. Индекс "0" соответствует условию *b* = 0.

Провода типа VS могут также рассматриваться и для ОТП с рабочим током 74 кА, однако для этого должно быть увеличено количество ВТСПлент, либо увеличена ширина ленты.

Как видно из табл. 1, при изготовлении VS-жилы используется большое количество первичных элементов (67–200 шт.). Для скрутки такого количества элементов использование крутильных машин классической скрутки нецелесообразно. Это связано с тем, что в таких машинах скрутка производится путем вращения отдающих катушек, расположенных во вращающихся клетях. Стандартное количество отдающих катушек в клети 6, 12, 18, 24. Более рациональным представляется использование машин типа Dram-Twister. В таких машинах отдающие катушки располагаются на неподвижных стойках, а скрутка жилы происходит за счет вращения приемного барабана.

Технологическую операцию скрутки можно заметно упростить, сгруппировав часть ВТСПлент в пакеты, как это показано на рис. 14б. В этой конструкции ленты сгруппированы для примера в восемь пакетов, обмотанных металлической лентой из титана или из нержавеющей стали. Общее количество лент такое же, как и в конструкциях VS2-4 и VS2<sub>0</sub>-4. Количество пакетов может варьироваться в широких пределах. Трапециевидные вставки изготовлены из нормальнопроводящего материала или формованных металлических трубок, которые в зависимости от материала могут служить и стабилизатором и каналами для прокачки хладагента и упрочняющим элементом. В этой конструкции внутри пакетов транспозиция лент по отношению к собственному полю отсутствует, однако, расположение лент радиально в один слой обеспечивает транспозицию пакетов по отношению к внешнему полю.



**Рис. 14.** Конструкции проводов для обмоток ОИ двукратной сборки. Провод на основе жил VS2-3 или VS2<sub>0</sub>-3 (а); провод на основе предварительно сформованных пакетов лент (б). Поперечное сечение проводов равно сечению провода ОИ (рис. 2)

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВАРИАНТЫ ВТСП-ПРОВОДОВ

Характеристика	Условная конструкция CORC [4]	Конструкция на основе стопки лент, (5.1)	Конструкция повивной скрутки, (5.2)	Конструкция VS типа, (5.3)				
Обмотка	ОТП, ОИ	ОТП	Не определено, возможно ОУ	ОИ				
Индукция магнитного поля — 0–15 Тл	+	+	+	+				
Рабочий ток ОТП	74 кА	74 кА						
Рабочий ток ЦС	60 кА			60 кА				
Запас по току	±1.2 при 20 К	+2-3 при 5.0 К	—	+2 при 5.0 К				
Механическая структура	+	+	—	+				
Возможность снижения	_	+	—	+				
потерь энергии за счет								
конструктивных								
решений*								
Примечание	Следует оценить	Следует оценить	Недостаточна	Следует определить				
	равномерность	равномерности	токонесущая	допустимый радиус				
	распределения токов	распределения	способность	изгиба провода				
	между лентами	токов между лен-	провода					
		тами и						
		эффективность						
		филаментации						
	Следует оценить потери энергии в различных режимах работы							

Таблица 3. Сравнение конструкций предложенных проводов

\*Без снижения других характеристик.

Таким образом, предложенные конструкции проводов VS-типа позволяют достичь требуемых для ЭМС TRT-характеристик. Предложенное техническое решение позволяет использовать полностью транспонированную конструкцию однократной сборки для ВТСП-проводников магнитных систем перспективных термоядерных установок. До настоящего времени ни в России, ни в мире не предложено ни одной полностью транспонированной конструкции для подобных магнитных систем.

В качестве следующего шага разработки следует провести исследования в области электродинамики, технологические и электрофизические испытания образцов предложенных конструкций.

# 6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ВАРИАНТОВ

Варианты конструкций ВТСП-проводов для обмоток ТRT, представленные в этой статье и работе [4], следует рассматривать как предварительную оценку возможности создания проводов, отвечающих жестким требованиям, приведенным в разд. 2. Причем, эти требования не являются исчерпывающими. Так, пока не исследованы вопросы детектирования появления резистивной фазы в ВТСП-проводниках для ЭМС TRT. Это достаточно непростой вопрос, поскольку развитие перехода ВТСП-обмоток при низких температурах заметно отличается такового в НТСП-обмотках. Однако разработка методов детектирования резистивной зоны абсолютно необходима для защиты сверхпроводящих магнитов от возможного перехода в нормальнопроводящее состояние [33, 34]. Вопросы потерь энергии в переменных режимах также еще недостаточно проработаны. В процессе дальнейшей разработки проекта вероятно возникновение дополнительных требований к конструкции ВТСП-проводов.

В табл. 3 представлено сравнение предложенных проводников на предмет их соответствия основным требованиям разд. 2.

Характеристики, представленные в табл. 3, будут уточняться по мере накопления результатов теоретических и экспериментальных исследований.

При разработке проводов использовались характеристики коммерческих ВТСП-лент, доступных на рынке в настоящее время. Мировой опыт свидетельствует, что в течение последних 25 лет наблюдается постоянный рост характеристик ВТСП-лент и снижение их стоимости. Весьма вероятно ожидать, что к моменту начала строительства ТRT, характеристики ВТСП-лент возрастут, что сделает более вероятным достижение высоких характеристик ВТСП-обмоток установки TRT.

# 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка сильноточных высокополевых ВТСП-проводов для ЭМС УТС — мировая тенденция, работы активно ведутся. Тем не менее в настоящее время нет универсальных решений и каждый проект требует разработки оптимизированного под его особенности ВТСП-провода.

Предлагаемые конструкции проводов на базе ВТСП-лент с актуальным на сегодняшний день уровнем свойств позволяют достичь необходимых характеристик проводов для создания обмоток реактора TRT.

Большие возможности варьирования характеристиками проводов предложенных конструкций делают их перспективными для дальнейшего совершенствования при изменении характеристик материалов или требований, предъявляемым ЭМС ТРТ.

Для производства сильноточных ВТСПпроводников требуются объединенные усилия ведущих предприятий и организаций: АО "НИИЭФА", ВНИИКП, НИЦ "Курчатовский институт", "ФСК ЕЭС", ООО "С-Инновация" и др.

Первостепенной задачей в настоящее время является проведение полномасштабных расчетно-теоретических и технологических исследований предложенных конструкций проводников.

Авторы выражают искреннюю благодарность Панцирному В.И. за плодотворное обсуждение различных аспектов статьи и полезные советы. Работа была выполнена при финансовой поддержке госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Menard J.E. // Phil. Trans. R. Soc. A. 2019. V. 377. P. 20170440.
- Creely A.J. // J. Plasma Phys. 2020. V. 86. P. 865860502.
- 3. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Е.Н. // Физика плазмы (этот выпуск). Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N. // Plasma Phys. Reps. (this issue).
- Бондарчук Э.Н, Воронова А.А., Григорьев С.А., Запретилина Е.Р., Кавин А.А., Китаев Б.А., Ковальчук О.А., Кожуховская Н.М., Коновалов С.В., Красильников А.В., Лабусов А.Н., Максимова И.И., Минеев А.Б., Муратов В.П., Родин И.Ю., Танчук В.Н., Трофимов В.А., Чердаков А.К., Черненок В.В. // Физика плазмы (этот выпуск).
- 5. *Bruzzone P.L.* // Nuclear Fusion. 2018. V. 58. P. 103001.
- Ten Kate H. // IEEE/CSC & ESAS Superconductivity News Forum, November 2019. Plenary Presentation at MT26, September 2019, Vancouver, Canada.
- 7. *Terazaki Y., Yanagi N., Ito S., Seino Y. //* IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. P. 4602905.

- Wolf M.J., Fietz W.H., Bayer C.M. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2521323
- 9. Takayasu M., Chiesa L., Bromberg L., Minervini J.V. // Supercond. Sci. Technol. 2012. V. 25. P. 14011.
- Uglietti D., Bykovsky N., Sedlak K. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28 Art no 124005.
- Celentano G. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013. V. 24. Art no. 4601805. https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2287910
- 12. Van der Laan D.C., Weiss J.D., McRae D.M. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32. P. 033001.
- 13. Weiss J.D., Mulder T., ten Kate H.J.J., van der Laan D.C. // Supercond. Sci. Technol. 2017. V. 30. P. 014002.
- 14. Available at: www. Advancedconductor.com.
- Сытников В.Е. // Академия энергетики. 2011. № 6 [44]. С. 72.
- 16. Высоцкий В.С., Занегин С.Ю., Зубко В.В., Фетисов С.С. // Кабели и провода. 2018. Т. 5. С. 374.
- 17. Goldacker W., Nast R., Kotzyba N. // J. Phys.: Confer. Ser. 2006. V. 43. P. 901.
- Long N.J., Badcock R.A., Hamilton K. // J. Phys.: Confer. Ser. 2010. V. 234. P. 022021.
- 19. *Сытников В.Е., Лелехов С.А.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 3. С. 31.
- 20. Available at: www.s-innovation.ru
- Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 2084. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z
- Lelekhov S. // Applyed. Superconductivity Conf. ASC14, ID 1951493, 3LPo2J – Fusion, Non-ITER Machine, Charlotte, Sept. 2014.
- Uglietti D., Kang R., Wesche R., Grilli F. // Cryogenics. 2020. V. 110. P. 103118. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103118
- 24. Uglietti D. // 5th Workshop on Accelerator Magnets in HTS (WAMHTS-5), Budapest, April 11–12, 2019. https://indico.cern.ch/event/775529/contributions.
- 25. Калантаров П.И., Цейтлин Л.А. Расчет Индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергоиздат, 1986.
- 26. *Лелехов С.А.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 4. С. 51.
- 27. Kesgin G., Majkic L., Selvamanickam V. // Physica C. 2013. V. 486. P. 43.
- 28. Lelekhov S.A., Keilin V.E., Kolbasov B.N. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2002. V. 12. P. 567.
- Kang R. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2020. V. 30. P. 5700107.
- 30. Zachary S., Hartwig R., Vieira F., Brandon N., Sorbom V.// Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33. P. 11LT01.
- Fetisov S.S., Zubko V.V., Zanegin SYu., Nosov A.A., Vysotsky V.S. // J. Phys.: Confer. Ser. 2020. V. 1559. P. 012081.
- Fetisov S.S., Zubko V.V., Nosov A.A., Zanegin S.Yu., Vysotsky V.S. // A Comprehensive Guide to Superconductivity. N.Y.: Nova Science Publishers, 2021.
- 33. Marchevsky M. // ASC-2020 November 2020, paper Wk1LOr3B.
- Green M.A. // IOP Confer. Ser.: Material Sci. Eng. 2020. V. 755. P. 012134.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

УДК 533.9

# ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТЫ ТОКАМАКА ТЯТ

© 2021 г. И. В. Мазуль<sup>*a*, *b*, \*, Р. Н. Гиниятулин<sup>*a*, *b*</sup>, А. А. Кавин<sup>*a*, *b*</sup>, Н. В. Литуновский<sup>*a*, *b*</sup>, А. Н. Маханьков<sup>*a*, *b*</sup>, П. Ю. Пискарев<sup>*a*, *b*</sup>, В. Н. Танчук<sup>*a*, *b*</sup></sup>

<sup>а</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия

> <sup>b</sup> Частное учреждение "Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия \*e-mail: mazuliv@niiefa.spb.su Поступила в редакцию 09.04.2021 г. После доработки 21.05.2021 г. Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлена концепция обращенных к плазме компонентов (ОПК) токамака TRT, работающего в режиме длительных разрядов и высокой средней тепловой нагрузки на стенки. Описана структура и проблематика ОПК, взаимосвязь основных параметров и процессов, обеспечивающих комфортное сосуществование плазмы и окружающих ее стенок. Представлены конструктивные решения панелей первой стенки и дивертора, выполненные на основе технологий ИТЭР. Обсуждаются особенности применения жидких металлов в ОПК. Подробно рассматриваются возможности альтернативных решений для диверторной мишени.

*Ключевые слова:* токамак, первая стенка, дивертор, качание сепаратриссы, жидкий металл **DOI:** 10.31857/S0367292121110214

## введение

Одной из основных задач проекта компактного токамака реакторных технологий (TRT) является поиск и отработка технологий обеспечения длительного разряда плазмы (≥100 с) при средней тепловой нагрузке на обращенные к плазме материальные поверхности на уровне не менее 0.2 MBT/м<sup>2</sup> [1]. Оба параметра характерны для термоядерных установок, имеющих перспективы коммерческого применения.

Одновременное выполнение двух обозначенных выше параметров нигде в мире еще не достигнуто, хотя и является необходимым и значительным шагом на пути демонстрации осуществимости практически полезного термоядерного реактора. Решающее условие получения этого режима – создание обращенных к плазме компонентов (ОПК), которые имеют необходимый ресурс и обеспечивают необходимую "чистоту" плазмы.

В такой термоядерной установке увеличение времени воздействия горячей плазмы на окружающие поверхности, а также наличие локально перегреваемых участков обращенной к плазме конструкции, вызывает повышенную генерацию примесей, которые, в свою очередь, вероятно, ограничивают продолжительность разряда плазмы. На современных термоядерных установках достаточно других факторов, ограничивающих продолжительность разряда: недостаток вольтсекунд, короткоимпульсные средства нагрева, ограничения в системе охлаждения или ее отсутствие и т.п., но проблема поступления примесей с обращенных к плазме поверхностей, в конечном счете, представляется одной из центральных. Для практически интересных термоядерных установок с длительным временем эксплуатации эрозионное и/или "усталостное" разрушение поверхностей обращенных к плазме компонентов, а также последующий останов реактора из-за ограниченного ресурса последних также является проблемой.

Для решения указанных проблем в проекте компактного TRT предлагается использовать ряд перспективных конструктивных и технологических подходов, концептуальное описание которых представлено в данной статье.

# НАЗНАЧЕНИЕ И СТРУКТУРА ОПК

Обращенные к плазме компоненты (ОПК) – это комплекс компонентов, испытывающих воздействие вылетающих из плазмы тепловых и корпускулярных потоков, либо в результате непосредственного контакта с плазмой, либо, находясь на удалении, но в зоне прямой видимости из плазмы, под действием потоков излучения и нейтралов перезарядки. В первую очередь эти компоненты выполняют функцию перехвата всех указанных потоков, защищая от них остальные системы токамака. Помимо этого, они участвуют в ограничении/формировании пространственных параметров плазмы, обеспечивают нейтрализацию покинувших плазму заряженных частиц и способствуют их более эффективной откачке и рециркуляции, минимизируют попадание в водородную плазму чужеродных примесных частиц. И, наконец, находясь в сложнейших условиях вблизи горячей плазмы, они должны продемонстрировать необходимую "живучесть" на все время работы реактора.

Триединую задачу по "эффективной экранировке/защите структур токамака от горячей плазмы — обеспечению "чистоты" плазмы — самосохранению защитной стенки" для краткости называют проблемой "первой стенки".

Универсальный функционал ОПК в токамаке, в общем виде и, в частности, в проекте компактного TRT, требует использования всех основных составляющих данного комплекса, а именно:

 первой стенки (ПС), находящейся на максимально возможном удалении от плазмы и выполняющей экранирующие/защитные функции (для стенок вакуумной камеры и различных внутрикамерных устройств) главным образом от потоков излучения и нейтралов перезарядки;

 лимитеров, представляющих собой наиболее нагруженные выступающие части ПС, заведомо контактирующие с плазмой и задающие размеры плазмы в режиме ее формирования, гашения и при различных неустойчивостях и обеспечивающие защитный перехват плазменных потоков на ПС;

— дивертора, находящегося в обособленной нижней части вакуумной камеры (ВК) и включающего в себя приемные мишени, на которые выносится основная доля тепла и плазменных потоков, покидающих основную плазму, для их дальнейшей нейтрализации, откачки и очистки.

На рис. 1 представлена предварительная (будет оптимизирована на фазе эскизного проекта) разбивка на составные части комплекса ОПК.

Первая стенка по своей площади (в TRT около 80 м<sup>2</sup>, включая лимитеры) является основным компонентом, обращенным к плазме, располагается между плазмой и вакуумной камерой (ВК) и служит для защиты внутренней оболочки ВК и внутрикамерных устройств (вспомогательные электромагнитные катушки, элементы диагностики, средства нагрева плазмы, газонапуска и т.п.) от воздействия потоков тепла и высокоэнергетических частиц, генерируемых плазмой. Предполагается, что в будущем промышленном термоядерном реакторе ПС должна работать без замены весь срок службы реактора так как дистанционная замена громадной (~1000 м<sup>2</sup>) структуры внутри тороида представляется губительной для экономических показателей любого реактора. Для экспериментальной установки, тем не менее, целесообразно рассмотреть возможность замены всей стенки (минимум однократно), например, для полной смены бериллиевой облицовки (планируется на стартовом этапе) на вольфрамовую, как более перспективную для реактора.

ПС компактного TRT состоит из отдельных защитных охлаждаемых панелей ПС (ППС), каждая из которых устанавливается и заменяется по истечении ресурса или после аварии вручную с использованием специальных грузозахватных приспособлений (на финальной фазе дистанционно с помощью роботов), не затрагивая окружающие компоненты. Для максимально удаленных и затененных от плазмы ППС (панели №№ 1, 6, 8 и 9) планируемый при разработке ресурс до их замены в условиях заданных усредненных тепловых нагрузок (не менее 0.2 MBт/м<sup>2</sup>) с учетом возможного их пикирования до значений 1 МВт/м<sup>2</sup> составляет не менее 10000 циклов. Такого количества разрядов плазмы в экспериментальной установке в первом приближении может хватить на всю программу работ на TRT.

Панели №№ 4 и 5 находятся в зоне недосформированного верхнего дивертора (квази Х-точки) и поэтому могут испытывать повышенные тепловые нагрузки, проектное значение которых принимается равным 3 МВт/м<sup>2</sup>, а проектный ресурс работы не менее 1000 циклов/разрядов плазмы. Этот ресурс ограничивается допустимой величиной эрозионного износа бериллиевой облицовки, а также усталостными повреждениями элементов конструкции ППС.

Лимитер представляет собой выступающую часть профиля ПС по отношению к соседним участкам и является материальным ограничителем потока граничной плазмы, которая в идеальном случае (сформированная конфигурация плазмы, отсутствие неустойчивостей) должна полностью отводиться в дивертор.

Затенение от плазмы соседних ППС снижает пиковые тепловые нагрузки на них особенно при неустойчивостях плазмы таких как: вертикальные смещения, краевые моды и срывы плазмы. В этом заключается функция защитного лимитера, каковым в TRT являются панели в рядах № 7 и 10. Выбор полоидальных координат защитных лимитеров связан с положением двух витков пассивной стабилизации (ВПС, желтым цветом на рис. 1), для которых так же как и для лимитера необходимо максимально возможное (по сравнению с другими ОПК) приближение к плазме. Совмещение лимитеров с ВПС представляется разумным выбором.

Другим лимитером, на этот раз стартовым, удаленным также на минимальное расстояние от



**Рис. 1.** Схематичная предварительная разбивка на составные части ОПК компактного TRT с классическим дивертором.

плазмы, являются панели № 2 и 3, расположенные на внутреннем обходе. На эти панели будет опираться плазма при пробое, нарастании размера круглого сечения плазмы и до момента формирования диверторной конфигурации (D-образное сечение).

Проектные значения тепловой нагрузки и ресурса для защитных и стартового лимитера составляют 3 МВт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>/1000 разрядов и 3 МВт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>/3000 разрядов соответственно. Облицовка панелей лимитера на начальной фазе работы реактора также сделана из бериллия.

Дивертор представляет собой специальную конфигурацию полоидального магнитного поля на краю плазмы, которая обеспечивает вывод периферийных слоев плазмы в удаленную диверторную камеру, в которой поток отводимой плазмы направляется на приемную мишень для нейтрализации. Тем самым обеспечивается очистка плазмы от примесей, представляющих собой про-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

дукты термоядерной реакции (за счет вывода гелия в удаленную диверторную камеру для откачки) и продукты эрозии и газовыделения ПС (за счет экранирования основной плазмы отводимым ливерторным слоем плазмы от поступающих со стенок примесей). Дивертор является самым теплонагруженным элементом среди ОПК. В диверторной камере обеспечивается теплосъем значительной (до 80% без учета нейтронов) мощности, покинувшей основную плазму, происходит нейтрализация плазмы и откачка образовавшегося нейтрального газа с последующей рециркуляцией очищенного (вне токамака) от примесей водородного топлива. Максимальные удельные тепловые нагрузки на мишень дивертора в TRT могут достигать 30-40 MBт/м<sup>2</sup> [2]. С учетом инженерно-технологических достижений и ограничений, определенных отечественными и зарубежными разработчиками для дивертора ИТЭР [3-5], по-видимому, проектным значением допустимой тепловой нагрузки на мишень классического твердотельного неподвижного дивертора можно принять величину 15 МВт/м<sup>2</sup>. Таким образом, необходимо обеспечить заметное (в 2-3 раза) снижение максимальной нагрузки за счет специальных мер, которые будут отрабатываться в процессе экспериментов (в том числе по мере постепенного повышения мошности нагрева плазмы). Существует большое количество разных концепций дивертора, включающих как различные магнитные диверторные конфигурации, так и различные материальные воплощения диверторной мишени. Приоритетные концепции дивертора для проекта компактного TRT представлены далее в статье. В любом случае, ресурс дивертора компактного TRT вследствие более высоких тепловых нагрузок значительно меньше ресурса ПС, но должен составлять не менее 1000 циклов. Ресурс дивертора, также как в случае ППС, ограничивается эрозионным износом вольфрамовой облицовки, а также усталостными повреждениями элементов конструкции дивертора под действием термонапряжений и электромагнитных нагрузок.

# ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПАРАМЕТРОВ

Для удобства описания основных взаимосвязанных процессов и параметров, влияющих на проект ОПК токамака, сгруппируем их в несколько основных тематических блоков.

## Тепловые нагрузки

Для наиболее известных проектируемых (TRT, ДЕМО-ЕU), строящихся (DTT, ITER, JT-60SA, Т15-МД) или эксплуатируемых (AUG, WEST, JET, EAST, D-IIID) токамаков в табл. 1 приведены параметры, от которых зависят условия работы ОПК. Основным драйвером проекта ОПК для любого токамака являются тепловые нагрузки на их поверхность. От тепловых нагрузок зависят выбор материала стенки, способ ее охлаждения (теплоноситель и его параметры), конструктивные размеры (толшина стенки, степень сегментации и др.), ее срок службы и степень негативного влияния на основную плазму за счет генерации примеси. Мощность, необходимая для поддержания стационарной плазмы и в конечном счете попадающая на ОПК/PFC  $P_{PFC} = (0.2P_{fus} + P_{ah}),$ складывается из мощности дополнительного нагрева и мощности термоядерного синтеза за вычетом доли нейтронов, (которые не участвуют ни в нагреве плазмы, ни практически в нагреве поверхности стенок). Средний поверхностный тепловой поток из плазмы на ОПК в стационарном режиме определяется отношением этой мощности к проективной площади окружающих плазму стенок S<sub>FW</sub> (чуть больше площади поверхности плазмы). Для всех токамаков, представленных в

табл. 1 (от малого экспериментального типа AUG до большого демонстрационного DEMO-EU), этот тепловой поток находится в диапазоне от 0.2 до 0.6 MBт/м<sup>2</sup> (строка 12). Даже в наиболее коммерчески привлекательных, но рискованных проектах (токамак SPARC [6]), эта величина не планируется выше 1 МВт/м<sup>2</sup>. На первый взгляд создание "стенки", выдерживающей такие нагрузки, не представляет серьезной проблемы. Для примера, стенки парогенераторов в тепловых электростанциях или стенки ТВЭЛов на атомных станциях испытывают подобные тепловые нагрузки (0.1–1.5 MBт/м<sup>2</sup>) и надежно эксплуатируются годами. Однако особенности поддержания водородной горячей плазмы в магнитной ловушке приводят (помимо эрозионного износа стенок под воздействием плазмы) к появлению существенных пространственно-временных неоднородностей в распределении этой нагрузки, что драматически усложняет проблему.

#### Стационарные тепловые нагрузки

Необходимость обеспечения "чистоты" плазмы привела к использованию дивертора как фактически безальтернативного способа контроля примесей в плазме. Максимальная неоднородность распределения тепловых нагрузок связана с наличием дивертора.

Дивертор вынужденно концентрирует значительную долю тепла и примесей из плазмы в узком слое для выноса сквозь относительно узкую горловину в разрядной камере в удаленную диверторную камеру для теплосъема и откачки примесей. Плотность тепловой нагрузки на диверторную мишень (табл. 1, строка 18) по сравнению со средней вырастает более чем в 60 раз, а для ее "распушения" требуется пространство, которое в токамаке в жестком дефиците. Создание надежной диверторной мишени является наиболее сложной задачей проектирования, а исследование способов снижения пространственного пикирования нагрузки в диверторе является одной из главных задач для TRT. Поскольку в дивертор может выноситься от 40 до 90% тепла, теряемого основной плазмой, то он может, помимо своей основной функции по контролю примесей, быть серьезным подспорьем для снижения тепловых нагрузок на трудно заменяемую первую стенку. При этом диверторная мишень выступает в качестве жертвенной структуры, которая из-за очень высоких нагрузок, очевидно, будет иметь ограниченный ресурс и подлежит регулярной замене. Эту замену, в виду компактности диверторной мишени и ее расположенности на периферии внутрикамерных систем токамака, возможно осуществить через специальные диверторные патрубки, не затрагивая основные системы токамака. Так выглядит традиционный подход к распре-

		2020	EU	DTT	ITER	60SA	MД	AUG	WEST	JET	EAST	D-IIID
1.	Большой радиус плазмы <i>R</i> , м	2.15	9	2.15	6.2	3	1.48	1.65	2.5	3	1.85	1.67
2. 3.	Малый радиус <i>a</i> , м Площадь первой стенки S <sub>FW</sub> , м <sup>2</sup>	0.6 80	2.8 1000	0.7 80	2 600	1.14 170	0.67 50	0.5 50	0.5 100	1.25 180	0.45 60	0.67 ~50
4.	Магнитное поле на оси <i>B</i> <sub>t</sub> , T	7—8	5.8	6	5.3	2.25	2	2.4	3.7	3.4	3.5	2.2
5.	Ток плазмы $I_{pl}$ , MA	4-5	20	6	15	5.5	2	1.5	1	4.8	1	3
6.	Длительность раз- ряда <i>T</i> <sub>discharge</sub> , с	100	10000	100	400	100	10	5	30	20	100	5
7.	Термоядерная мощность <i>P</i> <sub>fus</sub> , МВт	≪P <sub>ah</sub>	2000	≪P <sub>ah</sub>	500	< P <sub>ah</sub>	_	_	_		_	_
8.	Мощность допна- грева <i>P</i> <sub>ah</sub> , МВт	40	50	45	50	41	23	27	16	35	30	27
9.	$P_{\rm PFC} = (0.2P_{\rm fus} + P_{\rm ah}),  \text{MBT}$	40	450	45	150	41	23	27	16	35	30	27
10.	$P_{\text{Sep}} = (0.5 - 0.9)P_{\text{PFC}}, \text{MBT}$	32	230	36	~100	32	17	21	12	28	23	20
11.	$P_{\rm Div} = (0.6 - 0.9) P_{\rm Sep},$ MBT	26	170	30	90	25	14	17	10	22	18	16
12.	$P_{\rm PFC}/S_{\rm FW}$ , MBT/m <sup>2</sup>	0.5	0.45	0.56	0.25	0.24	0.46	0.54	0.16	0.2	0.5	0.54
13.	$(P_{\rm PFC} - P_{\rm Div})/S_{\rm FW},$ MBT/m <sup>2</sup>	0.17	0.28	0.19	0.1	0.05	0.18	0.2	0.06	0.07	0.2	0.22
14.	$P_{\rm sep}/R$ , MBT/M	15	25	16.7	16	10	11	12.7	4.8	9.3	12.4	12
15.	Ширина дивертор- ного слоя на экваторе $\lambda_{q \text{ midplane}}$ , [7] мм	1.5	1	2	2					3.5		
16.	<i>BP</i> <sub>sep</sub> /R, MBт T/м	112	145	100	85	23	22	30	18	32	43	26.4
17.	Зазор плазма- стенка $\Delta_{Sep-FW}$ , мм	50 in 170 out		30 in	100 in 150 out							
18.	Пиковая нагрузка на дивертор (без газовой мишени) <i>Q</i> <sub>Div. no rad</sub> , MBт/м <sup>2</sup>	30-40	50-70	20-40	20-40							

Таблица 1. Параметры токамаков важные для проектирования ОПК

делению тепла между дивертором и первой стенкой. Оптимальное соотношение мощности в дивертор и на первую стенку, а также способы влияния на это соотношение будут предметом изучения на TRT. На первой стенке в современных токамаках также, к сожалению, реализуется режим неоднородного теплового нагружения. Так, например, в H-режиме удержания основной плазмы, который считается основным для реализации термоядерного горения, в частотном режиме развиваются неустойчивости краевых мод (ELM's), когда трубчатые сгустки турбулентной плазмы могут сравнительно легко двигаться поперек магнитного поля и выносить на первую стенку значительную мощность. Так в токамаке ИТЭР при средней по площади тепловой нагрузке на первую стенку 0.1 МВт/м<sup>2</sup> (строка 13, табл. 1) нагрузки на ту же стенку на локальных участ-

1107

ках, рассредоточенных по значительной части первой стенки, могут достигать в среднем по времени до 4.7 MBт/м<sup>2</sup> квазистационарной нагрузки [8], что не позволяет рассчитывать на длительный ресурс и несменяемость первой стенки. Отработка физических методов смягчения параметров краевых мод или избавление от них является важной частью экспериментальной программы TRT. Использование защитных лимитеров и возможность значительного радиального удаления основной стенки от плазмы в глубокую тень (см. строчку 17 в табл. 1) также возможно позволит локализовать эти нагрузки и обеспечить сменяемость компактных лимитеров по аналогии с диверторной мишенью, обеспечивая долгосрочный ресурс основной части первой стенки.

#### Переходные тепловые режимы

Помимо пространственной неоднородности теплового нагружения ОПК не меньшие проблемы создают импульсные переходные режимы теплового воздействия, вызванные такими неустойчивостями в плазме как вертикальные смещения, срывы, убегающие электроны. В этих режимах на непродолжительное время (0.01–0.1 с) на локальных участках тепловая нагрузка на стенку достигает таких величин, что неминуемо приводит к оплавлению любого облицовочного материала. Также как и в случае с краевыми модами требуется найти физические способы смягчения или устранения этих режимов или использовать заменяемые жертвенные защитные лимитеры, предохраняющие основную первую стенку.

Опыт других реализованных проектов токамаков говорит о том, что полная проектная мощность дополнительного нагрева плазмы, а, следовательно, и максимальная энергонагруженность обращенных к плазме поверхностей достигаются не сразу. Для этого, помимо экономических, существуют и технические причины. Оперировать с максимальной мощностью надо научиться, проходя постепенно через промежуточные значения параметров, которые также представляют безусловный интерес как с точки зрения физики плазмы, так и инженерных систем токамака. Поэтому с момента начала работы токамака до момента достижения им максимальной мощности происходит поэтапный ее рост и проходит значительный (от 3 до 10 лет) промежуток времени. Поэтому, целесообразно, рассматривая поэтапное соответствие межлу мошностью токамака и возможностями ОПК для последующего достижения максимальной мощности, проектировать стартовый комплект ОПК на половинную мощность 20-25 МВт, при которой все программные установки проекта начинают постепенную реализацию, но при этом снижаются как финансовые риски, так и технические. При переходе к мощности в 45 МВт возможно придется спроектировать и изготовить новый комплект ОПК. Однако нельзя исключать, что успешные эксперименты, обозначенные ниже, позволят сохранить изначальный комплект ОПК, лишь "освежив" отдельные ее элементы.

Стоит наполнить более предметным содержанием программную установку проекта в области демонстрации устойчивой работы токамака при высокой средней энергонагруженности стенок, на уровне не менее  $0.2 \text{ MBt/m}^2$ . Эта демонстрация не сводится к чисто эксплуатационной фазе (с набором статистики повреждений в различных частях ОПК), а распадается на ряд исследовательских подзадач, часть из которых обозначена ниже:

– снижение пиковых нагрузок на компоненты до значений не выше максимальных проектных значений в 15 МВт/м<sup>2</sup> для дивертора, 3 МВт/м<sup>2</sup> для лимитеров и 1 МВт/м<sup>2</sup> для собственно ПС. Решение этой подзадачи обеспечивает необходимую работоспособность и долговечность конструкции и достигается различными мерами, такими как: тщательное профилирование обращенных к плазме поверхностей на этапе проектирования, монтажа и в процессе эксплуатации; максимальным удалением ППС от плазмы; формированием режимов газового дивертора и/или качанием сепаратрисы;

 дальнейшее снижение на фазе эксплуатации пикированности тепловой нагрузки на лимитерах и снижение числа ППС, на которых достигаются лимитерные нагрузки, и перевода их в статус "нормально-нагруженных" ППС. Решение этой подзадачи снижает поступление примесей в плазму, требования к скорости теплоносителя (а, следовательно, к общему расходу), обеспечивает экономию в случае вынужденной замены более нагруженных (а, следовательно, более рискованных) компонентов за счет сокращения их общего числа. Решение достигается отработкой режимов управления положением и формой плазмы, использованием локального напуска примесных газов или пеллетов, использованием литиевых устройств и другими методами, поиск и оптимизация которых является составной частью общей экспериментальной программы на токамаке;

– разработка методов и изучение последствий для параметров разряда глобального перераспределения поглощаемой мощности между ПС и дивертором. Разработка такой технологии является важным шагом на пути оптимизации техникоэкономических показателей реакторов класса ДЕМО, минимизируя затраты на эксплуатацию и замену различных ОПК, максимальным образом увеличивая ресурс каждой составной части.

#### Примеси

Контроль примесей в токамаке является необходимым условием получения устойчивого разряда плазмы с высокими параметрами. Концентрация примесей в плазме должна быть минимальной, особенно это касается элементов с высоким атомным номером. Примеси увеличивают тепловые (излучательные) потери тепла из плазмы, мешая ее нагреву, а также вытесняют топливные компоненты, уменьшая их концентрацию и интенсивность реакции синтеза. Более того, неконтролируемое поступление примесей в основную плазму, их пространственная неоднородность и резкие изменения концентрации во времени вызывают развитие различного рода неустойчивостей, приводящих к прекращению разряда и высоким переходным тепловым нагрузкам на стенку, ее повреждающим. В свою очередь дизайн ОПК и режимы их эксплуатации влияют на интенсивность генерации примесей со стенок и их поступление в плазму. В токамаке TRT будут использоваться все известные способы обеспечения максимальной чистоты плазмы.

Для облицовки первой стенки используется бериллий, обладающий самым низким атомным номером среди всех твердых материалов. Опыт изготовления стенки с бериллиевой облицовкой для проекта ИТЭР, а также рекордные результаты по стойкости многослойной стенки под действием тепловых нагрузок, продемонстрированные на отечественных макетах и прототипах [9], позволяют в проекте TRT рассматривать бериллий как наиболее оптимальный выбор, по крайней мере, для начальной фазы эксплуатации токамака. В данном проекте для снижения рисков загрязнения плазмы ионами вольфрама, традиционно используемого для облицовки дивертора, будет также рассмотрена альтернативная схема дивертора, дающая шансы использовать бериллиевую облицовку. Использование бериллия в диверторе делает контактирующую с плазмой поверхность всех ОПК полностью бериллиевой, что позволяет на практике оценить предельные возможности твердотельных технологий. При рассматриваемых температурах поверхности, бериллий является твердым материалом, имеющим самый низкий атомный номер, и, в этом смысле, мало уступает литию, который имеет еще более низкий атомный номер, но находится в жидком состоянии. Не исключено, что успешное масштабное использование бериллия для снижения загрязнения плазмы позволит избежать использования лития, создающего серьезные дополнительные проблемы. До сих пор считалось, что использование бериллия при тепловых нагрузках более 5-10 MBт/м<sup>2</sup> не проходит главным образом из-за его низкой температуры плавления в сравнении с вольфрамом или графитом. Однако с точки зрения обеспече-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

ния приемлемой температуры поверхности в качающейся мишени такая возможность просматривается. Повышенная по сравнению с вольфрамом ионная эрозия бериллия в значительной мере компенсируется поступлением бериллия с ПС и перенапылением. Легкая замена облицовки для качающейся мишени также смягчает проблему обеспечения длительного эрозионного ресурса. Кроме того, бериллий, в отличие от вольфрама, имеет коэффициент самораспыления меньше единицы в широком диапазоне условий его бомбардировки ионами [10], что позволяет варьировать параметры пристеночной плазмы в более широком диапазоне и не добиваться режима (который труднодостижим и вероятно небезопасен для основной плазмы [11-17]) с полностью оторванной плазмой в диверторе, который, по-видимому, неизбежен для вольфрамовой облицовки.

Конкурентом бериллия с точки зрения атомного номера является литий. С самого начала проекта ОПК в TRT закладывается возможность работы с жидким литием в разрядной камере. Особенности и этапы использования лития обсуждаются в соответствующем разделе.

Другим способом снижения генерации примесей является снижение тепловых нагрузок и температуры облицовки, тем самым уменьшение испарения и распыления примесных атомов. Помиуменьшения пикированности тепловой MO нагрузки на отдельные компоненты или макроучастки для обеспечения их ресурса пристальное внимание будет уделяться предотвращению перегрева микроучастков, таких как края облицовочных плиток. В экспериментах на токамаках показано [18], что оптимизацией ширины зазоров между плитками и их ориентацией относительно магнитного поля пренебрегать нельзя. Сильный разогрев кромок плиток хоть и не сказывается на работоспособности компонента в целом, но является серьезным источником примесей.

Также требуется оптимизация формы, размеров и ориентации зазоров между отдельными ОПК и крупными элементами в каждом ОПК. Эти зазоры являются местом осаждения испаренных и распыленных примесных атомов, которые формируют пленки, которые в свою очередь со временем отшелушиваются и кусками попадают в плазму, приводя к опасным неустойчивостям. Местом роста пленок могут быть не только упомянутые зазоры, но и целые панели ОПК, расположенные в относительной тени и испытывающие положительный баланс при массопереносе/перенапылении атомов облицовки и других примесей в разрядной камере. Поэтому надо стремиться к обеспечению режимов равномерной эрозии всех панелей. Такие режимы можно организовать, только исключив плазменные неустойчивости (включая краевые моды) и убрав лимитеры, ставшие излишними. Первая стенка в этом случае будет находиться под воздействием только довольно однородных потоков излучения и нейтралов перезарядки. Такой режим возможно реализуем, если справедлива и реализуема концепция обеспечения низкого рециклинга [19].

Современные токамаки, включая ИТЭР. в силу своего экспериментального характера вынуждены использовать широкий арсенал средств диагностики, нагрева и подпитки плазмы, что приводит к высокой степени перфорации стенки различными каналами и использованию различных функциональных материалов, плохо совместимых со сверхвысоким вакуумом. Используя опыт этих токамаков, возможно, удастся снизить количество таких каналов и материалов. Кроме того, во временно незанятые каналы и порты, которые, например, будут использоваться только для монтажа/демонтажа внутрикамерных устройств, целесообразно установить облицованные бериллием заглушки. В крупных портах, например, используемых для инжекции тоже не следует экономить на облицовке стенок этих каналов, по крайней мере, вблизи плазмы.

Отдельным, возможно самым эффективным, способом уменьшения степени взаимодействия плазма—стенка и, соответственно, генерации примесей нужно рассмотреть возможность снижения рециклинга частиц на стенках (см. параграф "контроль рециклинга" далее).

Наконец, должное внимание и затраты бюджета строительства должны быть предусмотрены для создания эффективной системы охлаждения.

#### Выбор теплоносителя

Стационарный (квазистационарный) режим работы ОПК достигается уже в первые 15-20 с работы реактора, что с учетом огромной общей мощности (40 МВт) и высоких локальных плотностей мощности (до 30-40 MBт/м<sup>2</sup>) требует активного охлаждения конструкции. Учитывая компактность проектируемого токамака, использование воды под давлением является безальтернативным. В мире опыт работы ОПК в режиме активного охлаждения имеется лишь на нескольких зарубежных машинах. В первую очередь такой опыт имеется на французском токамаке "Тоre Supra/WEST", продолжают "набивать шишки" при работе с водой китайцы на токамаке "EAST". Даже крупнейшие в мире токамаки "JET" и "JT-60SA" к настоящему времени имеют ограниченный опыт использования воды внутри вакуумной камеры, работая главным образом в теплоаккумулирующем режиме, когда условия эксплуатации трубок охлаждения (если таковые есть) сравнительно мягкие. Таким образом, при конструировании первой российской машины с активным водяным охлаждением мы будем опираться на опыт этих команд, а также на промежуточный опыт проекта ИТЭР. Этот совокупный опыт требует от нас, в частности, минимизировать в контуре охлаждения число соединений разнородных металлов и обеспечить технологическую простоту, надежность, контролируемость и ремонтопригодность всех соединений. В проекте компактного TRT для всех компонентов, кроме классического дивертора, будут использованы стальные трубки охлаждения, что позволяет сделать весь контур охлаждения из единого материала и обеспечить надежные сварные соединения. Для токамака с длинным импульсом для минимизации поступления примесей в плазму необходимо обеспечить хорошее охлаждение различных внутрикамерных компонентов, находящихся не на первой линии с плазмой, но испытывающих "второстепенные" тепловые нагрузки, которые могут оказаться существенными для различных функциональных материалов менее стойких к перегреву и газовыделению.

## Газовая мишень

В качестве базового для TRT предложен ИТЭР-подобный вариант диверторной мишени (см. раздел "Конструкция традиционной диверторной мишени"), использующий водоохлаждаемую многослойную композицию W–Cu–Cu-CrZr–SS. Такая композиция, изготовленная по российским передовым технологиям, работоспособна при тепловых нагрузках до 15–20 MBT/м<sup>2</sup> и способна выдержать не менее 1000 разрядов. Первоначальные оценки теплового потока на дивертор без принятия специальных мер по его снижению дают значения выше 30 MBT/м<sup>2</sup> [2].

На сегодня наиболее популярный подход к снижению этих нагрузок, в том числе в проекте ИТЭР – реализация режима газовой мишени, которая создается вблизи точки пересечения сепаратрисы с вертикальной мишенью посредством комплекса специфических мер, и служит для упреждающего рассеяния значительной мощности диверторной плазмы в плазменно-газовом облаке прежде, чем плазма достигнет вертикальной мишени. Применяемые меры: поддержание повышенного давления нейтралов в диверторной камере, использование конструктивных элементов (дом и отражающие мишени) для обеспечения дополнительной циркуляции нейтралов вблизи мишени, подача в диверторную плазму примесных газов (неон, азот и т.п.), обеспечивающих повышенные потери тепла из плазмы излучением и другие. В экспериментах на токамаках показано [11–17], что газовая мишень может снизить нагрузку на пластины дивертора, но получаемый режим нестабилен, а эффективность экранировки падает по мере увеличения мощности в диверторной плазме. В работах также отмечено, что увеличение эффективности (более высокая плотность нейтралов и примесного излучающего газа) газовой мишени имеет ограничения, связанные с тем, что обратный поток нейтралов и примеси в основную плазму может привести к ее коллапсу по тому или иному механизму. Это обстоятельство, например, применительно к TRT, работающем в номинальном режиме (ток 5 МА, мощность допнагрева 40 МВт), не позволяет безопасно для основной плазмы снизить пиковую нагрузку на дивертор до значений ≤ 10MBт/м<sup>2</sup> посредством плотной газовой мишени [2]. По этой причине в TRT проектной пиковой тепловой нагрузкой на дивертор принято значение 15 MBт/м<sup>2</sup>, что в полтора раза выше, чем в ИТЭР.

Таким образом, изучение физики газового дивертора для определения пределов применимости этого подхода, в том числе, с учетом условий ИТЭР и ДЕМО-реактора является одной из основных задач проекта. Для адекватного моделирования этих условий требуется достижение ряда параметров. Усредненная энергонапряженность мишени пропорциональна  $P_{sep}/R$  (мощность плазмы в диверторном слое деленная на большой радиус плазмы). Плотность потока энергии в диверторном слое и на мишени, кроме того, зависит еще от ширины диверторного слоя, а она, согласно некоторым оценкам [20], обратно пропорциональна величине магнитного поля. Из табл. 1 видно, что по параметру  $P_{sep}/R$  и  $BP_{sep}/R$  (строки 14 и 16) токамак TRT, наряду с токамаком DTT, превосходит действующие токамаки, не уступает ИТЭР и является наилучшим приближением к ДЕМО для изучения условий реализации газового дивертора.

По мере истечения плазмы к мишени диверторный слой становится шире как за счет ослабления полоидального поля ("распушение" магнитных поверхностей), так и за счет поперечной диффузии. Длина силовой линии от экватора до точки пересечения с мишенью (следовательно, и степень диффузионного расширения) зависят также от размеров диверторной камеры и геометрии полоидального поля в этой камере. Эффективная плотность газовой мишени также повышается по мере удлинения силовой линии. В этом смысле большое пространство, зарезервированное под диверторную камеру, позволит варьировать (при размещении нескольких дополнительных полоидальных катушек внутри камеры) диверторную конфигурацию и менять условия, влияющие на эффективность газовой мишени. На стартовом этапе будут установлены только 2 из них, достаточные только для качания сепаратрисы. На последующих этапах проекта участки первой стенки (баффлы), формирующие горловину диверторной камеры, предполагается выполнить отдельно от ППС в рядах № 1 и 10 (см. рис. 1). Также конструктивно будет обеспечена возможность изменения ширины диверторной горловины независимо от остальных ОПК и, тем самым, будет варьироваться эффективность плазменного затвора, препятствующего нежелательному поступлению нейтралов в основную плазму из диверторной камеры.

#### Контроль рециклинга

Еще одним важным механизмом контроля примесей и снижения нагрузок на стенки является контроль рециклинга, т.е. контроль вероятности вернуться обратно в плазменный шнур частицам, покинувшим плазму и затем нейтрализованным и охлажденным после контакта со стенками или газовой диверторной мишенью. Существуют соображения [19], которые еще нужно проверять, что снижение коэффициента рециклинга ниже 50% может существенно улучшить энергобаланс и удержание плазмы, а также кардинально снизить тепловые и корпускулярные нагрузки на первую стенку, в том числе связанные с неустойчивостями плазмы. В токамаке с дивертором для снижения рециклинга надо резко увеличить откачку нейтральных частиц из диверторной камеры. Сделать это вакуумными насосами практически невозможно, но может помочь использование лития, обладающего высокой поглощательной способностью к водороду. В отсутствие газовой мишени, которая из-за высокой плотности нейтралов в диверторе не совместима с режимом низкого рециклинга, тепловые нагрузки на диверторную мишень очень высокие, чтобы использовать литий непосредственно на диверторной мишени. Для нейтрализации и теплосъема потоков плазмы необходимо будет использовать качание сепаратрисы или мишени. Но можно провести эксперименты по откачке водорода на литиевых панелях, находящихся в зонах отраженных/рассеянных потоков тепла и частиц. Возможность и целесообразность проектного обеспечения такого эксперимента будет проработана на последующих этапах проектирования.

#### Качание сепаратрисы

Если газовая мишень будет недостаточно эффективна, то плотность теплового потока на мишень в пике может достигать в компактном TRT значений в 30–40 МВт/м<sup>2</sup>, что несовместимо с традиционными лучшими твердотельными решениями, разработанными в рамках проекта ИТЭР. Выходом из положения могли бы стать меры по обеспечению вынужденного качания сепаратрисы в зоне ее пересечения с традиционной мишенью таким образом, чтобы пиковая нагрузка довольно быстро перемещалась вверх-вниз вдоль



**Рис. 2.** Ветви сепаратрисы для базовой конфигурации (красный цвет) и ветви сепаратрисы (синий цвет), смещенные на величины  $d_{sep} \approx \pm 75$  мм с частотой  $f_{sep} = 1$  Гц, g1, g2 – управляемые параметры для качания ветвей.

мишени, приводя к результирующему "размазыванию" нагрузки на большую площадь. Тепловые расчеты, выполненные в рамках проекта TRT [21], показали, что необходимый эффект "размазывания" достигается при следующих частотах и амплитудах качания:  $v \ge 0.5$  Гц,  $A \ge \pm 5$  см. На рис. 1 показаны две полоидальные катушки, встроенные внутрь диверторной камеры, расположенные так, чтобы, в первую очередь, не препятствовать установке и замене кассет дивертора и, во вторую, обеспечивать эффективное качание ветвей сепаратрисы. Эти катушки предполагается установить уже на первоначальном этапе.

Качание ветвей сепаратрисы обеспечивается с помощью системы управления на обратных связях. В качестве управляемых сигналов g1, g2 были выбраны минимальные плоскопараллельные отклонения ветвей сепаратрисы в процессе качания от точек пересечения ветвей базовой сепаратрисы с ливерторными мишенями (страйк-точки). Если задать программу поведения этих параметров в виде синусоидальных колебаний различной частоты и амплитуды, то система управления на обратных связях по этим сигналам выполняет эту программу и обеспечивает качание ветвей с заданными частотой и амплитудой. Амплитуды сигналов g1, g2 выбирались таким образом, чтобы максимальное отклонение страйк-точки от стандартного положения  $d_{sep}$  (на полоидальном срезе) составляло 75 мм.

Как показали исследования, качание ветвей сепаратрисы с частотой  $f_{sep} = 0.5$  Гц и величиной  $d_{sep} = 75$  мм можно осуществить основными поло-идальными катушками без использования допол-



**Рис. 3.** Токи в обмотках  $I_{ДИВ#1}$  (синяя линия),  $I_{ДИВ#2}$  (красная линия) в процессе качания с частотой  $f_{sep} = 1$  Гц.

нительных обмоток ДИВ#1, ДИВ#2. При этом колебания токов основных в катушках представляются допустимыми. Для осуществления качания с более высокой частотой уже не обойтись без встроенных обмоток.

На рис. 2 показаны ветви сепаратрисы для базовой конфигурации (красный цвет) и ветви сепаратрисы (синий цвет), смещенные на величины  $d_{sep} \approx \pm 75$  мм с частотой  $f_{sep} = 1$  Гц, а на рис. 3 необходимые для этого токи в дополнительных ДИВ#1, ДИВ#2 обмотках.

Предварительный анализ показал, что качание сепаратрисы с требуемыми параметрами и необходимыми токами в полоидальных катушках/обмотках вполне реалистично, а потому будет непременно протестировано в процессе экспериментов на токамаке TRT.

## СТРАТЕГИЯ И ЭТАПЫ РАБОТЫ С ЛИТИЕМ

Использование лития в проекте ОПК токамака TRT — новая задача, связанная с необходимостью демонстрации стационарного режима разряда плазмы и высокой средней энергонагруженностью стенок. Литий, обладающий рядом уникальных характеристик (низкий атомный номер, хорошие показатели в качестве охладителя, жидкое состояние, облегчающее его "транспортировку" в реакторе для различных схем "обновления"), возможно, может помочь в решении проблемы "первой стенки" [22].

Использование лития в токамаке потенциально несет новые риски для машины и экспериментальной программы. Эти риски связаны с такими особенностями лития как:  высокое давление насыщенных паров при нагреве (нежелательное "загрязнение" всей разрядной камеры);

 – расплескивание металла в плазму под действием электромагнитных и гравитационных сил (опасность срывов плазмы);

 – активное взаимодействие с другими материалами (растворение меди, "захоронение" водорода и т.п.);

 – сложность обеспечения рециркуляции (сбора распыленного) лития;

взрывоопасность при взаимодействии с водой.

Поэтому предполагается постепенное увеличение присутствия лития в камере по весовым характеристикам, охватываемым площадям стенки, температурным режимам его использования. Для получения базы сравнения характеристик различных режимов удержания плазмы (в том числе с другими установками) первые годы работы токамака (при наличии почти полной проектной мощности дополнительного нагрева) литий использоваться не будет.

#### Этапы работы с литием

На первом этапе работы с литием, очевидно, следует начать с исследования влияния "декоративных" возможностей лития ("кондиционирование" стенок литием) на снижение опасных примесей в плазме и возможного улучшения режимов удержания. Первый подход предполагает средства, позволяющие доставлять микроскопические (для постепенного повышения концентрации Li в плазме и определения критической) количества металла в плазму. Это можно делать с помощью испарителей (за счет нагрева от плазмы и/или принудительным нагревом) или с помощью инжекторов микрочастиц. Последний способ позволяет в определенной степени влиять на профиль распределения лития в плазме (а также плотности и температуры собственно плазмы), что полезно для оптимизации режимов удержания. Второй подход связан с последовательным нанесением "экранирующего" слоя лития на различные ОПК (компонента за компонентой) для выявления их влияния на поступление примесей в плазму и возможностей лития для контроля этих процессов. Для этого также потребуются, например, испарители лития, позволяющие создавать тонкие (толшиной максимум до 10 мкм) "экранирующие" покрытия с разумным пространственным разрешением для нанесения локальных экранов. На данном этапе, по-видимому, можно и желательно обойтись небольшим (<100 г) количеством лития внутри камеры. Для улучшения возможностей контроля пространственного распределения лития в плазме, на ее границе и на стенках, по-видимому, надо иметь возможность расположения литиевых устройств в нескольких местах по большому и малому обходам плазмы для режимов *in situ*, или использовать манипулятор для операций в промежутках между импульсами. На данном этапе специальные устройства сбора лития *in situ* в токамаке в силу его незначительных количеств не предусмотрены, но по мере необходимости при остановке реактора будет производиться полная очистка камеры и всех внутрикамерных устройств от лития и его продуктов. Продолжительность первого этапа исследований может составить не менее 2-3 лет.

На втором этапе работы с литием можно начать исследования схем использования лития в режиме защитного возобновляемого/подпитываемого покрытия, обеспечивающего эрозионный ресурс тепловоспринимающей компоненты, без функций активного теплосъема (для последнего требуются испарение или прокачка существенных количеств металла, что на ранних стадиях работы токамака TRT представляется нецелесообразным). Примером такой схемы может служить капиллярно-пористая структура (КПС) на охлаждаемой подложке [22]. На данном этапе надо попытаться обойтись безопасным количеством лития внутри камеры, чтобы вопросы обеспечения сохранности установки и безопасности персонала не отнимали много ресурсов. По-видимому, испытываемые устройства для ПС (верхняя и/или наружная стенки) сначала надо располагать в зоне экваториальных патрубков ВК, обеспечив перемещения этих устройств относительно плазмы, в том числе дистанционно. Для расчетов конструкции устройств величину теплового потока на первую стенку следует варьировать в диапазоне от 1 до 5 MBт/м<sup>2</sup>. Унос тепла в стационарной фазе разряда должен осуществляться традиционным теплоносителем (вода, гелий), а температуру поверхности жидкого лития желательно удерживать ниже ~400°С. Выбор материала охлаждаемой подложки для данной схемы является большой проблемой (медь в контакте с литием запрещена, стали имеют недостаточную теплопроводность и термопрочность). Временным решением для экспериментальной установки TRT может быть использование тугоплавких металлов (тантал, молибден, ванадий) или медная подложка с тонкой (0.1-0.5 мм) плакировкой из нержавеющей стали. Испарение лития в таких устройствах допустимо только изредка и кратковременно, например, в режиме срыва плазмы. Если на ПС будут в непрерывном режиме высаживаться краевые моды (ELM's), то использование схемы защитного литиевого слоя на поверхности становится проблематичным. Действие испарительного механизма защитной реакции ПС на краевые моды приведет к появлению практически квазистационарного потока лития со стенки, который основная плазма вряд ли потерпит. Собственно, изучение пределов применимости данной схемы для ПС и дивертора является предметом литиевой программы на данном этапе экспериментов на TRT.

В зоне дивертора (расчетная тепловая нагрузка на мишень  $10-20 \text{ MBt/m}^2$ ) применение подобных зашитных схем. по-вилимому. привелет к сушественно более высоким по сравнению с ПС температурам поверхности жидкого лития, а проблема выбора материала подложки становится практически не решаемой. Если для неподвижного лития не удастся предложить схему, обеспечивающую температуру поверхности менее 600-700°С (предельное давление паров лития в диверторе 10–100 Па), то потребуется схема перемещения/обновления пленки (в тень для теплообмена) за время масштаба секунлы или быстрее. что приведет к скоростям транспортировки не менее 0.2 м/с. При умеренных скоростях движения лития на поверхности мишени (≤1 м/с) требуется обеспечение гладкой поверхности. так как набегающий поток плазмы/тепла в диверторе падает на поверхность по касательной и имеет очень высокую (нормально к потоку плазмы) плотность (≥100 MBт/м<sup>2</sup>), и любые неоднородности на поверхности металла (волны, например) приведут к недопустимо сильному испарению лития. Это означает, что свободные поверхности медленно текущего металла вряд ли работоспособны. Реализация более высоких скоростей движения металла позволяет смягчить требования к "гладкости" мишени, но в условиях магнитных полей токамака является серьезным вызовом. Таким образом, устройства, которые можно предложить для дивертора являются довольно сложными и требуют тепловых и магнитногидродинамических (МГД) испытаний на симуляторах перед их установкой в токамак.

Рассмотренные выше защитные устройства являются источниками поступления лития в плазму и на обычные стенки. При длительной эксплуатации (эрозионный износ), а также в результате переходных (срывы плазмы, например) и аварийных режимов на незащищенных обычных стенках могут собираться заметные количества лития, который под воздействием гравитации и электромагнитных сил может неконтролируемым образом попадать в плазму и приводить к тяжелым срывам. Поэтому наряду с защитными устройствами (источниками) требуется спроектировать и продемонстрировать работоспособность в условиях токамака неких коллекторных устройств, препятствующих неблагоприятному накоплению лития внутри разрядной камеры, особенно на верхних ППС.

Несомненную важность в разработке и испытаниях вышеперечисленных технологий и элементов литиевых устройств имеет их применение в будущих экспериментах на токамаке T-15MД.

На третьем этапе работы с литием можно провести испытания крупномасштабных литиевых устройств, которые выборочно замещают отдельные секции ПС и/или диверторной мишени. Потребуются заметные объемы лития (>1 кг) и соответствующие меры безопасности (например, модернизация системы охлаждения для минимизации последствий взаимодействия лития с водой). Испытания полноразмерных секций в условиях реальной плазмы в сильных магнитных полях (в том числе переменных) и с плазменным "ветром" не могут быть проведены на симуляторах и представляют большой интерес с плазмофизической, технической и представительской позиций.

## Варианты компоновки и исполнения литиевых устройств

Ввиду низкой допустимой температуры поверхности лития в основной разрядной камере (менее 400-500°С) и относительно низкой (менее 30 Вт/м·град) теплопроводности доступных материалов для охлаждаемой водой подложки целесообразно использовать устройства, которые в стационарном режиме находятся в зоне низких тепловых потоков на поверхность (менее  $1 \text{ MBt/m}^2$ ). В то же время при кратковременных (менее 1 с) переходных процессах за счет испарения лития эти устройства могут защитить расположенные ниже или находящиеся в их тени элементы конструкции ПС. Испарение лития вызовет гашение плазмы, но такие переходные процессы как вертикальные смещения или "убегающие" электроны (может быть также срывы и особые краевые моды) в любом случае приводят к прекращению разряда. Предлагаемые защитные устройства при этом позволяют сохранить ПС, предотвратив ее прожиг "убегающими" электронами или глубокое оплавление облицовки при вертикальных смещениях плазмы.

С учетом вышеизложенного представляют интерес попытки спроектировать, испытать на симуляторах и установить на TRT опытные лимитерные устройства на основе КПС.

Эти же устройства при необходимости могут служить испарителями лития в плазму для декоративных целей (см. первый этап работ с литием). За счет использования более горячей воды из специального контура, используемого для прогрева стенок при обезгаживании реактора ( $T = 170^{\circ}$ С), можно поддерживать на поверхности этих устройств в рабочем режиме с учетом действую-



Рис. 4. Конфигурационные 3D-модели ППС компактного TRT.

щих тепловых нагрузок температуру в районе 300–400°С.

## КОНСТРУКЦИЯ ПАНЕЛЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

Профиль обращенной к плазме поверхности ПС разработан в условиях обеспечения согласованного сопряжения с профилем плазмы (сепаратрисой) и другими смежными системами: ВК с патрубками и ВПС. Профиль ПС в полоидальном направлении разделен на десять рядов и спроектирован, по возможности, конформно плазме (серапатрисе) с учетом ограничений в виде технологических особенностей изготовления (фасетированный профиль); сопряжения с внутренней стенкой ВК при необходимости размещения питающих трубопроводов и раздающих коллекторов. В свою очередь, каждый ряд ПС в тороидальном направлении разделен на отдельные панели ПС (ППС), количество которых определено, базируясь на ограничениях по размерам патрубков ВК и массогабаритным параметрам ППС. Таким образом, ПС компактного TRT состоит из 156 шт. отдельных панелей с бериллиевой облицовкой и активным водяным охлаждением (см. рис. 4). По своему функциональному назначению все ППС делятся на следующие виды: защитные ППС, лимитеры (старт-лимитер, защитный лимитер), баффлы (горловина диверторного объема).

В проекте компактного TRT доступная толщина слоя ПС + зазор до плазмы (например, минимальная толщина на внутреннем обходе ВК 150 мм) получается существенно меньше аналогичной толщины в проекте ИТЭР (~600 мм в аналогичном месте). Учитывая стремление максимально удалить материальные поверхности ПС от плазмы и минимизировать количество необлицованной бериллием поверхности, обращенной к плазме, мы вынуждены проектировать панели относительно тонкими. При этом отсутствует возможность выполнить конструкцию крепления и подключения к водяному контуру по принципу, разработанному для ППС ИТЭР, где доступ к элементам крепления и патрубкам системы охлаждения организован через узкий и глубокий паз со стороны, обращенной к плазме поверхности.

Крепление к ВК и подключение к контуру водяного охлаждения ППС компактного ТRT осуществляется по бокам панели в тороидальном направлении. Зона расположения крепежных элементов и патрубков системы охлаждения двух соседних (в ряду) ППС закрывается одной защитной вставкой, которая также является обращенным к плазме элементом (ОПЭ) и подключается к контуру водяного охлаждения обеих соседних ППС (подача теплоносителя из коллектора одной ППС, отвод — в коллектор другой ППС). Для получения доступа к элементам крепления, в случае необходимости замены ППС, защитные вставки с двух сторон от панели должны быть демонтированы (см. рис. 5).

Защитные вставки, закрепление которых является менее надежным по сравнению с регулярными ОПЭ, "утоплены" дальше от плазмы относительно регулярных ОПЭ, что позволяет несколько снизить нагрузки от плазмы. В связи с этим, крайние ОПЭ, граничащие с защитными вставками, профилируются с наклоном так, чтобы закрыть боковые торцы бериллиевых плиток (и снизить тепловую нагрузку на них).

Подключение ППС к магистральным трубам (подвод/отвод) осуществляется при помощи коннекторов, имеющих сквозной проход со стороны обращенной к плазме поверхности для выполнения кольцевого сварного шва изнутри, далее



Рис. 5. Крепление ППС и использование защитной вставки: элементы крепления открыты.

входное отверстие в коннекторе заваривается круглой заглушкой (рис. 6).

# КОНСТРУКЦИЯ ТРАДИЦИОННОЙ ДИВЕРТОРНОЙ МИШЕНИ

Классический дивертор компактного TRT построен по стандартной для дивертора закрытого типа  $\omega$ -образной схеме, позволяющей эффективно поглощать поток мощности, идущий из плазмы как в виде заряженных и нейтральных частиц, так и в виде излучения. В конструкции дивертора для начального этапа работы токамака предусмотрена определенная защита от влияния лития, тем не менее, он не приспособлен для работы в условиях значительного его присутствия.

Классический дивертор токамака формируется из 54 отдельных сборок-кассет, состоящих из корпуса кассеты, прикрепленных к нему обращенных к плазме элементов (ОПЭ), а также труб, обеспечивающих переток охлаждающей воды между ОПЭ и корпусом кассеты. Общий вид классического дивертора со стороны плазмы приведен на рис. 7. Все 54 кассеты классического дивертора полностью идентичны, за исключением их диагностического оснащения.

Корпус кассеты представляет собой сварную коробчатую конструкцию из стали AISI 316L. На корпусе кассеты имеются приварные крепления для фиксации на них ОПЭ методом штифтования. Откачка нейтрализованного газа из приватной области дивертора осуществляется через окна, предусмотренные в обоих плечах корпуса кассеты дивертора. На данном этапе корпус кассеты разработан только предварительно.

Корпус кассеты классического дивертора приведен на рис. 8.



**Рис. 6.** Сварные швы (выделены синим) в гидравлических коннекторах ППС.



**Рис.** 7. Классический дивертор из 54 кассет, общий вид.



Рис. 8. Корпус кассеты классического дивертора (а) и продольное сечение кассеты в сборе (б). *1* – корпус кассеты; *2* – ОПЭ BBM; *3* – ОПЭ BOM; *4* – ОПЭ купола; *5* – ОПЭ HOM; *6* – ОПЭ HBM; *7* – входной коллектор HBM; *8* – Переливной коллектор HBM; *9* – трубы Ø15х1,5 мм; *10* – переливной коллектор BBM; *11* – входной коллектор BBM.

Обращенные к плазме поверхности дивертора сформированы пятью компонентами: внутренней и наружной вертикальными мишенями (ВВМ и НВМ), внутренней и наружной отражающими мишенями (ВОМ и НОМ) и куполом. Вертикальные мишени служат для приема идущих из плазмы высокоэнергетических частиц и их нейтрализации. Многократное переотражение потока этих частиц между вертикальными и соответствующими отражающими мишенями создает в объеме между ними газовое облако, позволяющее осуществить отрыв плазмы от вертикальных мишеней, уменьшая тем самым воспринимаемую ими тепловую нагрузку. Купол дивертора, в свою очередь, перехватывает поток высокоэнергетических частиц, идущих в дивертор из плазмы при опускании по каким-либо причинам сепаратрисы ниже нижней границы вертикальной мишени, а также ограничивает отток нейтрализованных в диверторе частиц обратно в плазму. Каждая кассета содержит 39 ОПЭ – по 7 ОПЭ ВВМ, ВОМ, купола и НОМ, и 11 ОПЭ НВМ.

Основания — теплоотводы ОПЭ классического дивертора — представляют собой прямые или изогнутые бруски из хром-циркониевой бронзы БрХ1Цр с каналами охлаждения  $\emptyset$ 12 мм. Для защиты бронзы от лития вся ее внешняя поверхность, за исключением обращенной к плазме, плакируется нержавеющей сталью толщиной 0.3 мм.

Обращенная к плазме поверхность всех ОПЭ облицовывается вольфрамовыми плитками с медным подслоем толщиной 1–2 мм. Наличие относительно мягкого медного подслоя на облицовочных плитках необходимо для снижения термомеханических напряжений между вольфрамом и бронзой, коэффициент теплового расширения которых отличается почти в три раза. В качестве способа присоединения облицовочных плиток к основаниям предполагается высокотемпературная вакуумная пайка никелевым припоем. Перед пайкой медный подслой всех облицовочных плиток со всех сторон гальванически покрывается никелем толщиной 9 мкм. Общий вид ОПЭ классического дивертора приведен на рис. 9.

Охлаждение ОПЭ и корпуса кассеты дивертора будет осуществляться деминерализованной водой с давлением на входе в кассету около 30 бар и температурой в районе 70°С. Из условия, что скорость протока воды по ОПЭ наиболее нагруженной наружной вертикальной мишени должна составлять порядка 10 м/с, расход воды через одну кассету будет составлять 12.5 л/с.

Основываясь на российском опыте проекта ИТЭР можно сказать, что изготовленный по российским технологиям представленный дивертор будет надежно (тысячи разрядов) работать при пиковой тепловой нагрузке до 15 МВт/м<sup>2</sup>. Ограниченное число разрядов (несколько сотен) мишень также выдержит при нагрузке до 20– 25 МВт/м<sup>2</sup>.

# АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВАРИАНТ ДИВЕРТОРНОЙ МИШЕНИ

Аргументации в пользу разработки альтернативного варианта (в силу его новизны) и его описанию в данной статье уделено больше внимания, чем этот вариант реально занимает в разрабатываемом проекте. Базовый традиционный вариант диверторной мишени, представленный выше, имеет ряд существенных (порою критических) недостатков, которые проанализированы ниже.



Рис. 9. ОПЭ классического дивертора.

# Высокая стоимость аварийной или плановой замены

В экспериментальном реакторе TRT одной из основных является задача изучения методов снижения тепловых нагрузок и последствий их воздействия на ОПК как в основном, так и в переходных режимах плазмы. При экспериментах неизбежны критические режимы теплового нагружения, при которых базовый вариант мишени испытывает существенные повреждения. Наиболее вероятной причиной повреждения могут быть потеря/повреждение облицовочной плитки и появление усталостной трещины и протечки в бронзовой трубке охлаждения. Электромагнитные нагрузки в аномальных режимах также могут повредить элементы теплоотводящей структуры, например, в местах многочисленных сварных соединений. Тепловое воздействие при срывах плазмы или неконтролируемых ELM's также может повредить облицовку. В случае критического повреждения в одном из многочисленных трубчатых элементов мишени (всего около 2000 трубчатых элементов и 50000 вольфрамовых плиток) придется извлекать соответствующую кассету. Каждая из 54 кассет имеет входной и выходной трубопроводы для воды, при разрезании которых кассеты в определенном порядке по одной могут извлекаться из реактора через ограниченное число нижних горизонтальных патрубков, зарезервированных для этих целей. Через каждый из этих патрубков планируется устанавливать/извлекать по 9 кассет дивертора. В худшем случае для извлечения кассеты, находящейся на максимальном удалении от патрубка, для ее замены придется извлечь в общей сложности 4 кассеты. Для демонтажа и повторного монтажа тяжелых кассет потребуется разработка специальных грузообрабатывающего и сваривающих устройств. Время необходимое для замены кассеты с каким-либо повреждением (критическим может оказаться даже повреждение/потеря одной облицовочной плитки) может привести к месячной остановке реактора и большим затратам.

### Проблема совместимости с литием

В реакторе TRT предусматривается использование лития в качестве перспективного материала для контроля взаимодействия плазмы со стенками и обеспечения длительных разрядов плазмы. В большинстве предполагаемых схем использования литиевых устройств температура лития будет находиться в диапазоне от 200°С (нижний предел для обеспечения расплава) до 700°С (по-видимому, верхний предел, выше которого испарение лития и загрязнение им плазмы будут недопустимыми). Анализ литературных данных показал [22], что при температурах выше 200°С контакт лития с бронзой приводит к деградации свойств последней. Расчеты температурного состояния трубчатых бронзовых элементов классического дивертора показывают, что в наиболее нагруженной зоне температура бронзовых трубок и медной прокладки под вольфрамовой облицовкой превысит 300°С, что при контакте с литием приведет к разрушению трубки и протечкам теплоносителя. Применение защитных покрытий (Ni, Cr) в этой зоне вряд ли поможет, так как в условиях значительных пластических деформаший медного подслоя (в меньшей степени бронзы) весьма вероятно растрескивание этих покрытий и контакт лития с медью/бронзой (требуется проведение НИР). Выходом из положения могла бы стать замена бронзы в качестве материала элементов охлаждения на более стойкие к литию материалы (стали, тугоплавкие металлы). Однако для использования этих материалов требуется

снижение тепловых нагрузок до значений 1– 2 МВт/м<sup>2</sup>, что при современном уровне понимания возможностей "газовой мишени" в базовом варианте представляется невозможным.

## Ограниченная применимость подхода в реакторных условиях

Экспериментальный токамак TRT представляет собой физический прототип будущего реактора, в котором дивертор вынужден будет работать в условиях нейтронных потоков и ограничений, связанных с гибридными технологиями. Базовый вариант классического дивертора имеет решения, область применения которых плохо совместима с условиями действующей ядерной установки. Рассмотрим для примера параметры и материалы системы охлаждения. Для TRT мы используем теплую (30-100°С) воду и бронзовые трубки. Использовать существенно более горячую воду мы не можем из-за необходимости обеспечения совместимости бронзовых элементов первой стенки с литием, а также во избежание кризиса теплообмена при нагрузках более 15 MBт/м<sup>2</sup>. Также, при диверторных тепловых нагрузках бронза является единственным материалом, позволяющим обеспечить необходимый температурный режим и приемлемые термонапряжения конструкции. Бронза в условиях радиационных повреждений (начиная с уровня 0.1 сна) испытывает низкотемпературное охрупчивание, что очевидно недопустимо для материалов первого контура охлаждения. Во избежание этого охрупчивания минимально допустимая температура бронзы должна превышать 150°С, с другой стороны, длительный коррозионный ресурс бронзы в воде (особенно при высоких скоростях теплоносителя как у нас) обеспечивается при температурах менее 200°С. Таким образом допустимое температурное окно использования бронзы в условиях нейтронного облучения составляет диапазон 150-200°С [23], в который реальная конструкция не укладывается при любых параметрах теплоносителя. Кроме того, бронза малоперспективна (в сравнении со сталью Rusfer, например) с точки зрения более высокой активируемости и существенно ограниченной (по, видимому, уровнем в 10 сна максимум) радиационной стойкостью. Гибридные и тритиевые бланкеты термоядерного реактора, по-видимому, будут работать при более высоких температурах теплоносителей. что требует (для лучшей совместимости различных внутрикамерных устройств реактора) использования более "горячих" теплоносителей для ОПК. Такими теплоносителями для ОПК могли бы быть горячая вода (300°С), характерная для ядерных технологий PWR, или гелий (технологии HTGR). При тепловых нагрузках на дивертор в базовом варианте ни гелий, ни горячая

вода не смогут обеспечить теплосъем. Кроме того, в условиях облучения термоядерным спектром нейтронов проблема повторной сварки (rewelding) отдельных элементов, извлекаемой для ремонта диверторной кассеты, становится неразрешимой (для флюенсов более высоких, чем в ИТЭР). Это означает, что в случае даже локального повреждения диверторной кассеты потребуется ее замена на новую, а повторное использование поврежденной кассеты (это еще возможно в TRT) в будущем реакторе невозможно.

Приведенные выше недостатки базового варианта дивертора можно устранить при использовании диверторной мишени с качающейся облицовкой [24].

Для снижения пикированности тепла на вертикальные мишени предлагается перемещать эти мишени вертикально (качать вверх-вниз), тем самым размазывая тепловую нагрузку по большей площади мишени. Поскольку качать многотонную конструкцию дело очень непростое, предлагается качать только вольфрамовую облиновку. сохранив неподвижность теплоотводящей структуры. Для обеспечения теплового контакта между облицовкой и трубками охлаждения предлагается использовать жидкий металл (ЖМ) между ними. Рисунок 10 иллюстрирует в наиболее общем виде концепцию взаимного расположения плазмы. облицовки и теплоотводящих трубок. Отсутствие жесткой связи между облицовкой и теплоотводящими трубками позволяет свободно перемещать сравнительно небольшую и не тяжелую часть мишени, оставив в покое массивную теплоотводящую структуру (набор трубок), которая жестко и герметично связана с контуром водяного охлаждения, расположенным за пределами ВК реактора.

ЖМ (например, олово или литий) контактирует с тыльной поверхностью облицовки и забирает тепло главным образом за счет своей температуропроводности (скорость движения металла у стенки в данном случае нас мало интересует) в предположении, что на смачиваемой поверхности облицовки температурное сопротивление незначительно (требуется экспериментальное уточнение). Подхватив тепло с облицовки ЖМ затем (тем или иным образом) передает это тепло трубкам теплосъема с водяным охлаждением для дальнейшего переноса в градирню. При этом для дальнейшего "размазывания" тепла по большей площади используется более значительная площадь теплосъема по сравнению с площадью теплового воздействия на обращенную к плазме поверхность облицовки. Если принять высоту пояса теплового нагружения плазмой равной 50 мм, а плотность теплового потока в этом поясе равной 30 MBт/м<sup>2</sup> (при радиусе наружной мишени 2.4 м общая мощность на внешнюю мишень составит



**Рис. 10.** Схема расположения основных элементов диверторной мишени с качающейся облицовкой.

22.5 MBt), то при амплитуде качания  $\pm 75$  мм эффективная (в предположении очень высокой частоты качания) тепловая нагрузка на поверхность облицовки снизится в (75 + 75 + 50) мм/50 мм = = 4 раза до значения 7.5 MBt/м<sup>2</sup>. Точнее говоря, самый поверхностный слой вольфрама циклически непродолжительное время (зависит от параметров качания) будет испытывать искомую нагрузку равную 30 MBт/м<sup>2</sup>, но по мере удаления от поверхности пропускаемая через вольфрам эффективная плотность теплового потока будет снижаться вплоть до 7.5 MBт/м<sup>2</sup> (даже без учета вертикальных утечек тепла на краях зоны нагружения). Дальнейшее "размазывание" тепла до приемлемых значений для материала трубок охлаждения (например, для стали Rusfer максимально допустимая тепловая нагрузка не должна превышать 1-2 MBт/м<sup>2</sup>) обеспечивается с помощью ЖМ, который может контактировать с теплоотводящей структурой с развитой поверхностью (на рисунке металл проливается на многочисленные трубки охлаждения, расположенные в шахматном порядке). С помощью промежуточного ЖМ теплоносителя можно при желании вынести тепло из ВК, тем самым упростив ремонт теплосъемного оборудования и устранив риски протечек воды внутри токамака. Предлагаемый к использованию ЖМ совместим с высоким вакуумом в разрядной камере токамака, если не превы-



**Рис. 11.** Качающийся дивертор с платформой в нижнем положении (для обслуживания).

шать предельную температуру нагрева металла, которая ориентировочно составит ~400°С для лития. Нагрев олова может превысить 1000°С без существенного влияния на вакуум.

Таким образом, в предлагаемой концепции мишени с качающейся облицовкой устраняются все вышеперечисленные недостатки, неизбежные для базового варианта конструкции типа ИТЭР. Замена поврежденной облицовочной плитки происходит легко без воздействия на теплоотводящую структуру и не требует разгерметизации последней (т.е. отсутствует слив теплоносителя, разрезка и повторная сварка трубопроводов). Вероятность повреждения трубки охлаждения многократно снижается, так как основной повреждающий фактор, связанный с термонапряжениями, становится менее существенным ввиду многократного снижения тепловой нагрузки на трубки охлаждения. Кроме того, в виду отсутствия жесткой связи между облицовкой и трубкой отсутствуют напряжения, связанные с разностью термического расширения разнородных металлов. Снижение тепловой нагрузки на трубки охлаждения позволяет отказаться от бронзы, заменив ее на сталь Rusfer, которая позволяет контакт с ЖМ (в том числе с литием) при более высоких температурах. Реакторные перспективы предлагаемой концепции также существенно выше по сравнению с базовой. Отказ от бронзы в пользу радиационно-стойкой стали позволяет работать в условиях нейтронного облучения с горячими (250-500°С) теплоносителями. Снижение тепловой нагрузки на трубки охлаждения до уровня ~1 МВт/м<sup>2</sup> позволяет всерьез рассматривать возможность использования гелия для охлаждения дивертора, что очень перспективно с точки зрения унификации охлаждения ОПК и бланкетов. Наконец в режиме более интенсивного (требуются несколько более высокие частота и амплитуда качания по сравнению с вольфрамом) качания становится возможным использование бериллиевой облицовки. Такая потенциальная возможность в условиях дивертора является уни-



**Рис. 12.** Элементы конструкции качающегося дивертора: подвижная платформа (а); сменные платформы (3 шт.) со сменными облицовочными стаканами (б); неподвижные трубки охлаждения с коллекторами (в); купол (г).

кальной и представляет большой интерес с точки зрения удержания плазмы и ее взаимодействия со стенкой в полностью бериллиевой машине.

На рис. 11 и 12 эскизно представлена компоновка качающегося дивертора в диверторной камере TRT, а также основные элементы конструкции. Для реализации альтернативного варианта дивертора в TRT необходим значительный объем НИР, связанных, главным образом, с вопросами совместимости ЖМ с конструкционными материалами и поведением ЖМ в магнитном поле.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный концептуальный проект ОПК токамака TRT подтвердил расхожее утверждение, что проблема "первой стенки" – одна из наиболее сложных и недостаточно изученных проблем управляемого термоядерного синтеза. Анализ показал, что для выполнения защитных функций структура ОПК разбивается на многочисленные компоненты, каждая из которых оптимальным образом должна выполнять свои специфические задачи, обеспечивая приемлемый для экспериментальной установки срок своей службы. Предложенные решения, во-первых, позволяют осуществить старт работы реактора, во-вторых, позволяют оптимизировать работу ОПК в процессе постепенного роста энергосодержания плазмы, а также проводить эксперименты по апробации отечественных подходов к решению проблемы. Среди таковых наиболее перспективными можно считать следующие: качающийся дивертор, качание сепаратрисы, тотальное использование бериллия (в том числе возможно в диверторе). попытка организации откачки в диверторе с помощью лития, активное использование лимитеров, варьируемая ширина диверторной горловины и другие. Наряду с новыми подходами продемонстрирована готовность использовать накопленный опыт проекта ИТЭР, который позволяет для стартового этапа работы токамака предложить и

изготовить надежно работающие компоненты, выполненные по отечественным технологиям и из российских материалов. Для успешного завершения проекта предстоит еще много работы, необходимо также изыскать ресурсы для проведения инженерно-технологических НИР в обоснование предлагаемых решений.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11.
- 2. *Кукушкин А.С., Пшенов А.А.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11.
- Makhankov A., Berkhov N., Divavin V., Giniyatulin R., Grigoriev S., Ibbott C., Komarov V., Labusov A., Mazul I., McDonald J., Tanchuk V., Youchison D. // Fusion Engineering Design. 2001. V. 56–57. P. 337.
- Giniyatulin R.N., Komarov V.L., Kuzmin E.G., Makhankov A.N., Mazul I.V., Yablokov N.A., Zhuk A.N. // Fusion Engineering Design. 2002. V. 61–62. P. 185.
- Pitts R.A., Bonnin X., Escorbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V. et al. // Nuclear Mater. Energy. 2019. V. 20. P. 100696.
- Creely A.J., Greenwald M.J., Ballinger S.B., Brunner D., Canik J., Doody J., Fulop T., Garnier D.T., Granetz R., Gray T.K. et al. // J. Plasma Phys. 2020. V. 86. P. 865860502.
- 7. *Pizzuto A*. DTT. Divertor Tokamak Test Facility Project Proposal. ENEA. July, 2015.
- Sviridenko M., Leshukov A., Tomilov S. // Fusion Engineering Design. 2020. V. 158. P. 111897.
- Gervash A., Giniyatulin R., Guryeva N., Glazunov D., Kuznetsov V., Mazul I., Ogursky A., Piskarev P., Safronov V., Eaton R., Raffray R., Sevryukov O. // Fusion Engineering Design. 2019. V. 146. P. 2292.

- 10. *Roth J., Eckstein W., Bohdansky J. //* J. Nuclear Materials. 1989. V. 165. P. 199.
- Leonard A.W., Makowski M.A., McLean A.G., Osborne T.H., Snyder P.B. // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 519.
- Gruber O., Kallenbach A., Kaufmann M., Lackner K., Mertens V., Neuhausser J., Ryter F., Zohm H., Bessnrodt-Weberpals M., Buchl K. et al // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 4217.
- Asakura N., Nakano T., Oyama N., Sakamoto T., Matsunaga G. and Itami K. // Nuclear Fusion. 2009. V. 49. P. 115010.
- Ishida S., Fujita T., Akasaka H., Akino N., Annou K., Aoyagi T., Arai T., Arakava K., Asakura N., Azumi M., et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 3917.
- 15. Kubo H. // Nuclear Fusion. 2001. V. 41. P. 227.
- Kallenbach A., Bernet M., Beurskens M., Casali L., Dunne M., Eich N., Giannone L., Herrmann A., Maraschek M., Potzel S. et al. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 053026.

- Bernert M., Wischmeier M., Huber A., Reimold F., Lipschultz B., Lowry C., Brezinsek S., Dux R., Eich T., Kallenbach A., Lebschy A., S. et al. // Nuclear Materials Energy. 2017. V. 12. P. 111.
- Nygren R.E., Rudakov D.L., Murphy C., Watkins J.D., Unterberg E.A., Barton J.L., Stangeby P.C. // Fusion Engineering Design. 2017. V. 124. P. 271.
- 19. Zakharov L.E. // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 096008.
- Eich T., Leonard A.W., Pitts R.A., Fundamenski W., Goldston R.J., Gray T.K., Herrmann A., Kirk A., Kallenbach A., Kardaun O. et al. // Nuclear Fusion. 2013. V. 53. P. 093031.
- 21. *Мазуль И.В.* // ВАНТ "Термоядерный синтез". 2021. В печати.
- 22. Вертков А.В., Жарков М.Ю., Люблинский И.Е. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11.
- 23. Linsmeier Ch., Rieth M., Aktaa J., Chikada T., Hoffmann A., Hoffmann J., Houben A., Kurishita H., Jin X., Li M. et al. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 092007.
- 24. Mazul I.V. // Nuclear Fusion. 2016. V. 56. P. 126009.

———— ТОКАМАКИ ——

УДК 533.9

# РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАДИЦИОННОГО ДИВЕРТОРА В ТВТ

© 2021 г. А. С. Кукушкин<sup>а, b, c, \*</sup>, А. А. Пшенов<sup>а, b, c</sup>

<sup>а</sup> НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

<sup>b</sup> Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

<sup>с</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом",

"Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия

\*e-mail: ank 755@gmail.com Поступила в редакцию 12.04.2021 г. После доработки 02.06.2021 г. Принята к публикации 02.06.2021 г.

Приводятся первые результаты численного моделирования кодом SOLPS4.3 дивертора TRT в традиционном подходе: однонулевой полоидальный дивертор с твердыми металлическими приемными поверхностями. Показано, что при полной проектной величине тока в плазме ~5 MA и мощности нагрева плазмы 25–40 MBт не следует ожидать широкого "окна" рабочих параметров плазмы, обеспечивающего возможность мягкого управления режимом работы всей установки. Основные проблемы – тепловая нагрузка на диверторные пластины и совместимость с хорошим удержанием основной плазмы.

*Ключевые слова:* TRT, дивертор, режим работы **DOI:** 10.31857/S0367292121110202

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является оценка ширины рабочего окна параметров управления режимом работы дивертора в традиционной однонулевой конфигурации при определенном выборе материалов диверторных пластин и первой стенки. Основными параметрами, определяющими работу дивертора [1], являются входная мощность, определяющаяся условиями нагрева основной плазмы, плотность диверторной плазмы, определяющаяся условиями подпитки и откачки частиц, и мощность радиационных потерь, определяюшаяся, в нашем случае, количеством введенной примеси неона (Ne). В расчетах мы будем характеризовать эти параметры величинами мощности, поступающей через сепаратрису в пристеночный слой, *P*<sub>SOL</sub>, давления нейтрального газа в диверторе *p*<sub>n</sub> и полного количества ионов примеси в расчетной сетке за пределами сепаратрисы *N*<sub>Ne</sub>. При этом величина пиковой тепловой нагрузки на диверторные пластины  $q_{
m pk}$  — главный фактор, ограничивающий режим работы ливертора, – является ограничением, а не результатом расчета, предназначенным для дальнейшего использования при конструировании дивертора. Эта величина определяется техническими возможностями конструкции и выбирается, исходя из плана работы установки. Для того, чтобы дивертор мог отработать без разрушения предусмотренное планом число импульсов заданной длительности, величина  $q_{\rm pk}$  не должна превосходить определенного значения [2].

В качестве первого шага для TRT [3] рассматривается традиционный дивертор, типа дивертора ИТЭР. Это однонулевая магнитная конфигурация с относительно закрытым дивертором в нижней части камеры, рис. 1. Все поверхности, обращенные к плазме, твердотельные: диверторные пластины покрыты вольфрамом, все остальные поверхности — бериллием. Форма первой стенки выбрана в соответствии с предварительным вариантом конструкции [4] с небольшой модификацией в области дивертора.

Из опыта ИТЭРа известно, что так называемый "купол" ("dome"; в нашем случае, лучше было бы сказать "галерея") — конструкция, перекрывающая выход нейтралов из дивертора между ветвями сепаратрисы к Х-точке, — необходим для эффективной откачки частиц, а поддерживающие его структуры должны обеспечивать свободный обмен нейтральными частицами между внутренним и внешним диверторами [5]. В коде SOLPS4.3 [6], используемом в данной работе, это моделируется введением поверхностей с частичной проницаемостью для нейтралов под "куполом" (показаны штриховыми линиями на рис. 1). В наших расчетах коэффициент проницаемости выбран равным 0.2.



**Рис.** 1. Геометрическая схема расчетной модели SOLPS4.3. Показаны расчетная сетка для плазмы, первая стенка и элементы дивертора. Для наглядности приведена также вакуумная камера (два внешних контура). Стрелками показаны места напуска газа и откачки из рабочей камеры.

Плазма в модели состоит из ионов, атомов и молекул дейтерия, а также ионов и атомов неона, вводимого в плазму для увеличения радиационных потерь в диверторе. Напуск газов ( $D_2$  и Ne) осуществляется в центральной части камеры через экваториальный порт, а откачка – из дивертора, в его центральной секции (см. рис. 1). Моделирование, проведенное ранее для ИТЭРа, показало, что месторасположение впуска газа в камере не оказывает заметного влияния на параметры диверторной плазмы [7]. Эффективная откачка возможна лишь в таком месте, где имеется повышенное давление нейтрального газа – то есть, в диверторе. На внутренней границе расчетной сетки предполагается равенство потока ионов плазмы из центральной области шнура потоку нейтралов через эту границу внутрь шнура — то есть, считается, что в основной плазме нет дополнительных источников частиц. Прежние расчеты для ИТЭРа (и ДЕМО) [8] показывают, что наличие дополнительных потоков частиц в центральной области слабо влияет на результат.

В этой серии расчетов мы рассматриваем разряды с максимальным проектным током плазмы  $I_{\rm p} = 5$  MA. С точки зрения пристеночной плазмы, величина I<sub>р</sub> определяет два параметра: эффективную толщину, λ<sub>a</sub>, слоя, в котором энергия выносится из основной плазмы в дивертор, и предельную плотность основной плазмы в разряде ("предел Гринвальда") n<sub>Gw</sub>. Первый из них определяет выбор коэффициентов переноса плазмы поперек магнитного поля в пристеночном слое, а второй позволяет оценить разумность полученных результатов относительно плотности плазмы на сепаратрисе. Использование экспериментального скейлинга [9] дает для наших условий  $\lambda_q \cong 0.9$  мм, а формула из [10] –  $n_{\rm Gw} \cong 5 \times 10^{20}$  м<sup>-3</sup>. Чтобы по-лучить такое значение  $\lambda_q$ , следуя процедуре, предложенной в [11], и обеспечить более медленное спадание профилей температуры и плотности к внешнему краю сетки, коэффициенты переноса в модели были выбраны следующими: внутри и вблизи сепаратрисы  $D_{\perp} = 0.3 \text{ м}^2/\text{с}, \chi_{\perp} = 1 \text{ м}^2/\text{с}, a$  далее они двумя "ступеньками" повышаются до  $D_{\perp} = 2.4 \text{ m}^2/\text{c}, \chi_{\perp} = 8 \text{ m}^2/\text{c} (\chi_{\perp i} = \chi_{\perp e}).$ 

# 2. РЕЖИМЫ С *P*<sub>SOL</sub> = 30 MBT

Рассмотрим вначале режимы, соответствующие большой мощности нагрева, когда мощность, близкая к порогу L—H-перехода в плазме со средней плотностью  $n_e \sim 2 \times 10^{20}$  м<sup>-3</sup>, выносится из основной плазмы с заряженными частицами. Следуя технологии, разработанной для ИТЭРа [12], мы провели несколько серий расчетов кодом SOLPS4.3, в каждой из которых при сохранении величин  $P_{SOL}$  и  $N_{Ne}$  варьировалось значение  $p_n$ . Эти серии различаются величиной  $N_{Ne}$ .

На рис. 2 показана зависимость  $q_{\rm pk}$  от  $p_{\rm n}$  для разных значений  $N_{\rm Ne}$  при  $P_{SOL} = 30$  МВт. Видно, что при увеличении  $p_{\rm n}$  пиковая нагрузка на внешний дивертор снижается до значений 2–5 МВт/м<sup>2</sup> (рис. 2с), тогда как на внутренней диверторной пластине она остается примерно постоянной на уровне ~10 МВт/м<sup>2</sup>. Подобное перераспределение нагрузки с внешнего дивертора на внутренний, хотя и не так ярко выраженное, наблюдалось ранее в расчетах для ИТЭРа с добавлением неона в качестве излучающей примеси [12–14]. Полной ясности относительно физической природы это-



**Рис. 2.** Зависимость  $q_{\rm pk}$  от  $p_{\rm n}$  для разных значений  $N_{\rm Ne}$  при  $P_{\rm SOL} = 30$  MBт. (а) максимальное значение по обоим диверторам, (б) на внутренней и (в) на внешней диверторных пластинах. Вертикальные штриховые линии показывают нижнюю границу величины  $p_{\rm n}$  для минимальной и максимальной величины  $N_{\rm Ne}$  из представленных на рисунке.

го явления пока нет. По-видимому эффект связан с перераспределением неона между диверторами. Так или иначе эти результаты показывают, что если величина  $q_{pk}$  ограничена значением 10 MBт/м<sup>2</sup>, как изначально предполагалось в ИТЭРе, то 30 МВт – это максимально допустимая величина *P*<sub>SOL</sub>. Она чуть меньше мощности (35 MBт), необходимой для уверенного перехода основной плазмы в H-режим при плотности  $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Это ограничивает плотность плазмы в разряде меньшей величиной, ~ $1.5 \times 10^{20}$  м<sup>-3</sup>, чтобы иметь некоторый запас мощности для устойчивости Н-режима в основной плазме. Кроме того, условие  $q_{\rm pk}$ ≤ 10 MBт/м<sup>2</sup> определяет минимальную допустимую величину  $p_n$ , которая составляет 2–5 Па в зависимости от  $N_{\rm Ne}$ .

Следующее ограничение следует из условия "неглубокого детачмента" [12]. Как показали эксперименты на установке ЈЕТ [15], если процесс детачмента (то есть, отрыва плазмы от диверторных пластин, проявляющегося, в первую очередь, в появлении максимума на кривой зависимости тока насыщения  $I_{\rm sat}$  на диверторную пластину от плотности плазмы) заходит слишком далеко, то время удержания основной плазмы падает. Физическая природа этого явления пока неясна. Возможно, это связано с "прорывом" нейтралов из дивертора в область Х-точки. В расчетах для ИТЭРа [12] был принят эмпирический критерий, основанный на экспериментальных результатах и предполагающий, что величина *p*<sub>n</sub> не должна превышать значения, при котором I<sub>sat</sub> на любую из диверторных пластин снижается после прохождения максимума на 20%. На рис. 3 приведена зависимость  $I_{\text{sat}}$  от  $p_n$  для разных значений  $N_{\text{Ne}}$ . Видно, что применение критерия [12] ограничивает величину значением ~4-6 Па в зависимости от  $N_{\rm Ne}$ .

Дальнейшие ограничения рабочей области параметров следуют из условий сопряжения решения с основной плазмой. На рис. 4 приведена зависимость от p<sub>n</sub> некоторых параметров плазмы, усредненных по сепаратрисе. Если принять, как указывалось выше, максимальное значение средней плотности плазмы в разряде  $n_{\rm e} \sim 1.5 \times 10^{20} \, {\rm m}^{-3}$ , то плотность плазмы на сепаратрисе в допустимом интервале значений для  $N_{\rm Ne} \le 4 \times 10^{18}$  выглядит относительно высокой,  $n_{\rm es} \gtrsim 0.5 n_{\rm e}$ . Экспериментальные наблюдения на современных установках показывают тенденцию к ухудшению удержания плазмы с уменьшением пикированности профиля плотности в Н-режиме с высокой плотностью в разряде [16], так что высокие значения *n*<sub>es</sub> могут оказаться нежелательными. С другой стороны, масштаб n<sub>e</sub> определяется предельной плотностью n<sub>Gw</sub> [17, 18] и, согласно теоретическому анализу [18], наши значения  $n_{\rm es}/n_{\rm Gw} \lesssim 0.2$ не должны создавать проблем с Н-режимом. Однако этот анализ требует экспериментальной проверки. Увеличение  $N_{\rm Ne}$  снижает  $n_{es}$ , но увеличивает эффективный заряд Z<sub>eff</sub>, который становится  $\geq 2.5$ , а относительная концентрация неона на сепаратрисе достигает 2-3%, что также может отрицательно сказаться на параметрах основной плазмы.

Таким образом, грубые консервативные оценки показывают, что условие  $q_{\rm pk} \le 10 \text{ MBt/m}^2$  приводит практически к коллапсу рабочего окна параметров при  $P_{\rm SOL} = 30 \text{ MBt}$ . То есть, использование мощности дополнительного нагрева в TRT на уровне  $P_{\rm heat} = 40 \text{ MBt}$  и выше (с излучательными



**Рис. 3.** Зависимость  $I_{\text{sat}}$  на внутреннюю (а) и внешнюю (б) диверторные пластины от  $p_n$  для разных значений  $N_{\text{Ne}}$  при  $P_{\text{SOL}} = 30$  MBT. Вертикальные штриховые линии показывают рабочий диапазон значений  $p_n$  для минимальной и максимальной величины  $N_{\text{Ne}}$  из представленных на рисунке.



**Рис. 4.** Параметры плазмы, усредненные по сепаратрисе: электронная плотность  $n_{es}$  (а), эффективный заряд  $Z_{eff}$  (б) и относительная концентрация неона  $c_{Ne}$  (в) для  $P_{SOL} = 30$  MBт.

потерями из основной плазмы порядка  $30\% P_{heat}$ ) может оказаться нереалистичным.

# 3. РЕЖИМЫ С *P*<sub>SOL</sub> = 20 МВт

Аналогичные серии расчетов были выполнены для случая уменьшенной мощности нагрева плазмы, соответствующей  $P_{SOL} = 20$  MBт. В этом случае, верхняя граница  $p_n$ , связанная с детачментом плазмы в диверторе, слегка снижается до величин 3.5–4.5 Па. На рис. 5 показана зависимость  $q_{pk}$  от  $p_n$  для разных значений  $N_{Ne}$ . Видно, что есть некоторый запас до  $q_{pk} = 10$  MBt/m<sup>2</sup>, так что работа, с точки зрения нагрузок на диверторные пластины, допустима при  $p_{\rm n} \gtrsim 1-2$  Па.

Однако проблема совместимости найденных решений с основной плазмой остается. На рис. 6 показаны вариации параметров плазмы на сепаратрисе с изменением величин  $p_n$  и  $N_{\rm Ne}$ . Поскольку снижение мощности нагрева ведет к уменьшению  $n_{\rm e}$  до ~1 × 10<sup>20</sup> м<sup>-3</sup> для обеспечения перехода в Н-режим, выполнение консервативного условия  $n_{\rm es} \leq 0.5n_{\rm e}$  требует увеличения относительной концентрации неона на сепаратрисе до ~3%, что соответствует  $Z_{\rm eff}$  ~ 3. То есть, снижение мощности нагрева и, соответственно, плотности плазмы

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021



**Рис. 5.** Зависимость  $q_{pk}$  от  $p_n$  для разных значений  $N_{Ne}$  при  $P_{SOL} = 20$  MBт. (а) максимальное значение по обоим диверторам, (б) на внутренней и (в) на внешней диверторных пластинах.



**Рис. 6.** Параметры плазмы, усредненные по сепаратрисе: электронная плотность  $n_{es}$  (a), эффективный заряд  $Z_{eff}$  (b) и относительная концентрация неона  $c_{Ne}$  (b) для  $P_{SOL} = 20$  MBт.

не гарантирует приемлемых условий работы установки в H-режиме с током 5 MA.

# 4. ОБСУЖДЕНИЕ. ВОПРОСЫ ОТКАЧКИ

Первые результаты расчетов показывают, что при токе плазмы  $I_p = 5$  МА в TRT не следует ожидать широкого "окна" рабочих параметров плазмы, обеспечивающего возможность мягкого управления режимом работы всей установки. Однако эти результаты получены в предположении справедливости экспериментального скейлинга  $\lambda_q \propto B_p^{-1.19}$  [9], описывающего современные эксперименты с меньшими  $I_p$ . В то же время, имеются расчетно-теоретические исследования [19, 20], показывающие, что при достаточно большом токе плазмы и/или тороидальном магнитном поле, аномальный перенос, связанный с турбулентно-

стью, развивающейся в пристеночной плазме, эффективно размывает профиль потока энергии в диверторном слое, и  $\lambda_q$  растет с ростом  $I_p$ , достигая величины ~5 мм в условиях ИТЭРа [19] (вместо ~1 мм, соответствующего скейлингу [9]). Тем не менее, рассчитывать на это пока нельзя — тем более, что границы применимости скейлинга [9] пока неизвестны. Поэтому следует провести исследования, аналогичные описанным в данной статье, для меньших токов плазмы, в том же консервативном приближении справедливости скейлинга [9]. Увеличение  $\lambda_q$  приводит к уменьшению  $n_{es}$  [11], что облегчает сопряжение пристеночной плазмы с основной.

Еще один вопрос, не затронутый в нашем исследовании — требования к системе откачки частиц. Поток  $\Gamma_{\text{pump}}$  частиц, откачиваемых из камеры токамака, определяется скоростью откачки  $c_{\text{p}}$ 

и давлением нейтрального газа на входе в откачной патрубок  $p_n$ . Величина  $p_n$  определяется условиями работы дивертора и, как мы видели, для данной конфигурации TRT может варьироваться в пределах 1-7 Па. При заданной скорости откачки, в стационаре, эта величина определяется поступлением частиц в камеру (все, что подается внутрь, должно откачиваться). Минимальные значения Г<sub>питр</sub> определяются условиями поддержания плотности плазмы в разряде [21]. Их можно грубо оценить, зная  $n_{\rm e}$ ,  $n_{\rm es}$ , поток атомов D через сепаратрису внутрь шнура Г<sub>0s</sub> и диффузионное время удержания частиц в основной плазме  $\tau_n$ . Действительно, плотность плазмы поддерживается за счет подпитки ионами от сепаратрисы  $(n_{\rm es})$ , нейтралами ( $\Gamma_{0s}$ ) и, если надо, дополнительным источником частиц Г<sub>а</sub> (пучки нейтралов или пеллеты). В отсутствие пинчевания ионов D в плазменном шнуре, подпитка ионами поддерживает плотность *n*<sub>es</sub>. Подпитка нейтралами поддерживает плотность  $n_{\rm ef} = \Gamma_{0\rm s} \cdot \tau_{\rm pf} / V_{\rm pl}$ , где  $V_{\rm pl}$  – объем плазмы (25 м<sup>3</sup> для TRT), а  $\tau_{pf}$  – диффузионное время удержания ионов, образовавшихся от ионизации потока  $\Gamma_{0s}$  (поскольку ионизация идет на краю шнура, т<sub>р</sub> ≪ т<sub>р</sub>). Эти два источника связаны с рециклингом и не требуют, в принципе, дополнительного поступления частиц в камеру. Остальная плотность  $n_{\rm ea} = n_{\rm e} - n_{\rm es} - n_{\rm ef}$  должна поддерживаться источником Г<sub>а</sub> (характерное время  $\tau_{pa}$ ), и все эти дополнительные частицы должны откачиваться. Если взять величину  $\Gamma_{0s} \sim 3 \times$  $\times 10^{21} \text{ c}^{-1}$  из наших расчетов и положить  $\tau_{pf} \sim 0.01 \text{ c}$  и  $\tau_{pa} \sim 0.1 \text{ c}$ , то получается  $\Gamma_a \sim 10^{22} \text{ c}^{-1} \cong 20 \text{ Пa} \cdot \text{m}^3/\text{c}.$ Таким образом, при  $p_{\rm n} \sim 2$  Па минимальная скорость откачки составляет 10 м<sup>3</sup>/с. В действительности, величина с<sub>р</sub> должна быть больше, чтобы скомпенсировать неидеальную эффективность подпитки (например, пеллетами [21]) и возможные вариации выхода газа со стенок камеры в процессе разряда. В качестве разумной величины скорости откачки можно предложить  $c_{\rm p} \sim 30 \text{ м}^3/\text{c}$ , обеспечить которую может быть непросто при таком малом давлении и удаленных от плазмы насосах.

Поскольку основным фактором, ограничивающим рабочее окно параметров плазмы, оказывается совместимость приемлемых условий в диверторе и в основной плазме, рабочее окно параметров плазмы должно исследоваться совместным моделированием всего разряда [12]. Для этого необходимо параметризовать наши результаты и использовать их в качестве граничных условий в транспортном коде для основной плазмы (например, ASTRA). Эта работа ведется и результаты будут опубликованы отдельно.

## 5. ВЫВОДЫ

Первые результаты моделирования диверторной плазмы в TRT показывают, что работа с током плазмы 5 МА может быть затруднена. В этом случае скейлинг [9], основанный на экспериментальных данных с современных установок, предсказывает, что в Н-режиме энергия будет выноситься из основной плазмы в дивертор в узком слое шириной  $\lambda_a \sim 0.9$  мм. Чтобы обеспечить приемлемую тепловую нагрузку на диверторные пластины  $q_{\rm pk} \lesssim 10 \, {\rm MBt/m^2}$ , плотность плазмы на сепаратрисе должна быть высокой,  $n_{\rm es} \gtrsim 0.5 n_{\rm e}$ , что плохо согласуется с опытом работы в Н-режиме на современных токамаках. Эту плотность можно снизить увеличением количества излучающей примеси (в данном случае, неона), но тогда растет концентрация примеси на краю шнура, так что величина  $Z_{\rm eff}$  достигает 3, что тоже нежелательно. Уменьшение входной мощности P<sub>SOL</sub> с 30 до 20 МВт не решает проблему. Хотя тепловые нагрузки на диверторные пластины удается снизить до 5–7 MBт/м<sup>2</sup> при значениях  $n_{\rm es}$ , допустимых при  $n_{\rm e} \sim 1.5 \times 10^{20} \, {\rm m}^{-3}$ , такой мощности не хватает для поддержания плазмы с такой плотностью в Н-режиме. В этом случае для стабильного поддержания Н-режима плотность основной плазмы необходимо снизить примерно в 1.5 раза, что возвращает нас к тем же проблемам согласования ее с плотностью пристеночной плазмы, что и в случае  $P_{\text{SOL}} = 30$  MBт.

В условиях ТRT детачмент (отрыв плазмы от диверторных пластин с рекомбинацией в объеме дивертора) начинается при относительно низком давлении нейтралов в диверторе ( $p_n = 2-3$  Па). Это ограничивает рабочий диапазон давлений величиной 4—6 Па. С учетом ограничения снизу изза возрастания  $q_{pk}$ , этот диапазон становится ~1 Па  $\leq p_n \leq 6$  Па. В качестве ориентира для скорости откачки, необходимой для поддержания заданной плотности плазмы в разряде и компенсации вариаций выхода газа со стенок камеры в процессе разряда, можно предложить величину  $c_n \sim 30$  м<sup>3</sup>/с.

Более подробное исследование рабочего окна плазменных параметров установки TRT следует проводить путем совместного моделирования основной и пристеночной плазмы в рамках подхода, разработанного для ИТЭРа [12], в котором результаты моделирования пристеночной плазмы двумерным кодом SOLPS4.3 параметризуются и полученные скейлинги используются в качестве граничных условий для одномерного транспортного кода ASTRA, описывающего основную плазму. Эта работа ведется и результаты будут опубликованы отдельно.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках догово-
том 47

2021

№ 12

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

ра от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д. Расчеты выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования "Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса" НИЦ "Курчатовский институт", http://ckp.nrcki.ru/

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Krasheninnikov S.I., Kukushkin A.S., Pshenov A.A.* // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. № 5. P. 055602 (16 pp).
- Pitts R.A., Bonnin X., Escourbiac F., Frerichs H., Gunn J.P., Hirai T., Kukushkin A.S., Kaveeva E., Miller M.A., Moulton D., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Schmitz O., Stangeby P.C., Temmerman G.D., Veselova I., Wiesen S. // Nucl. Mater. Energy. 2019. V. 20. № 10. P. 100696 (25 pp).
- 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., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11.
- 4. *Мазуль И.В. и др.* Первая стенка и дивертор // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11.
- Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Reiter D., Coster D.P., Pacher G.W. // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. № 1–3. P. 308–313.
- Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W., Reiter D. // Fusion Eng. Des. 2011. V. 86. № 12. P. 2865–2873.
- Kukushkin A.S., Pacher H., Kotov V., Reiter D., Coster D., Pacher G.W. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. № 7. P. 698.
- Pacher H.D., Kukushkin A.S., Pacher G.W., Janeschitz G., Coster D., Kotov V., Reiter D. // J. Nucl. Mater. 2007. V. 363–365. № 1–3. P. 400.
- Eich T., Leonard A.W., Pitts R.A., Fundamenski W., Goldston R.J., Gray T.K., Herrmann A., Kirk A., Kallenbach A., Kardaun O., Kukushkin A.S., Labombard B., Maingi R., Makowski M.A., Scarabosio A., Sieglin B., Terry J., Thornton A. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. № 9. P. 093031 (7 pp).
- 10. *Greenwald M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. V. 44. № 8. P. R27.
- Kukushkin A.S., Pacher H.D., Pacher G.W., Kotov V., Pitts R.A., Reiter D. // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438. № SUPPL. P. S203–S207.

- Pacher H.D., Kukushkin A.S., Pacher G.W., Kotov V., Pitts R.A., Reiter D. // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 591.
- Pacher H.D., Kukushkin A.S., Pacher G.W., Kotov V., Janeschitz G., Reiter D., Coster D.P. // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390. P. 259.
- Kaveeva E., Rozhansky V., Senichenkov I., Sytova E., Veselova I., Voskoboynikov S., Bonnin X., Pitts R.A., Kukushkin A.S., Wiesen S., Coster D. // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2020. V. 60. № 4. P. 046019.
- Huber A., Brezinsek S., Groth M., De Vries P.C., Riccardo V., Van Rooij G., Sergienko G., Arnoux G., Boboc A., Bilkova P., Calabro G., Clever M., Coenen J.W., Beurskens M.N.A., Eich T., Jachmich S., Lehnen M., Lerche E., Marsen S., Matthews G.F., McCormick K., Meigs A.G., Mertens Ph., Philipps V., Rapp J., Samm U., Stamp M., Wischmeier M., Wiesen S., JET-EFDA contributors // J. Nucl. Mater. 2013. V. 438, № SUPPL. P. S139–S147.
- Doyle E.J., Houlberg W.A., Kamada Y., Mukhovatov V., Osborne T.H., Polevoi A., Bateman G., Connor J.W., Cordey J.G., Fujita T., Garbet X., Hahm T.S., Horton L.D., Hubbard A.E., Imbeaux F., Jenko F., Kinsey J.E., Kishimoto Y., Li J., Luce T.C., Martin Y., Ossipenko M., Parail V., Peeters A., Rhodes T.L., Rice J.E., Roach C.M., Rozhansky V., Ryter F., Saibene G., Sartori R., Sips A.C.C., Snipes J.A., Sugihara M., Synakowski E.J., Takenaga H., Takizuka T., Thomsen K., Wade M.R., Wilson H.R., ITPA Transport Physics Topical Group, ITPA Confinement Database and Modelling Topical Group, ITPA Pedestal and Edge Topical Group // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. № 6. P. S18–S127.
- Kallenbach A., Asakura N., Kirk A., Korotkov A., Mahdavi M.A., Mossessian D., Porter G.D. // J. Nucl. Mater. North-Holland, 2005. V. 337–339. P. 381–385.
- Eich T., Goldston R.J., Kallenbach A., Sieglin B., Sun H.J., ASDEX Upgrade Team, JET contributors // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2018. V. 58. № 3. P. 034001 (5 pp).
- Chang C.S., Ku S., Loarte A., Parail V., Köchl F., Romanelli M., Maingi R., Ahn J.-W.W., Gray T., Hughes J., LaBombard B., Leonard T., Makowski M., Terry J.G. // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2017. V. 57. № 11. P. 116023 (15 pp).
- 20. *Li Z.-Y., Xu X.Q., Li N.-M., Chan V.S., Wang X.-G.* // Nucl. Fusion. IOP Publishing, 2019. V. 59. № 4. P. 046014 (11 pp).
- Kukushkin A.S., Polevoi A.R., Pacher H.D., Pacher G.W., Pitts R.A. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 415. № 1 SUPPL. P. S497–S500.

УДК 533.9

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ЛИТИЕВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ТОКАМАКА РЕАКТОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2021 г. А. В. Вертков<sup>а, b</sup>, М. Ю. Жарков<sup>а, b</sup>, И. Е. Люблинский<sup>а, b, c, \*</sup>, В. А. Сафронов<sup>b</sup>

<sup>а</sup> АО "Красная Звезда", Москва, Россия

<sup>b</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом", "Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия <sup>c</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия \* e-mail: IELyublinskiy@redstaratom.ru Поступила в редакцию 09.04.2021 г. После доработки 25.05.2021 г. Принята к публикации 02.06.2021 г.

Нерешенным вопросом при разработке станионарного термоялерного реактора является конструкция его внутрикамерных элементов, обращенных к плазме. В настоящее время стало очевидным, что среди материалов, традиционно используемых для внутрикамерных элементов, нет твердых конструкционных материалов, которые бы отвечали требованиям длительной эксплуатации под воздействием потока термоядерных нейтронов (14 МэВ) с плотностью ~10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и теплового потока с плотностью 10-20 МВт/м<sup>2</sup>. Альтернативным решением этой проблемы является использование жилких металлов в качестве материала, обрашенного к плазме. И. в первую очерель лития, имеющего малый атомный номер (низкое зарядовое число Z). Рассматриваются и другие легкоплавкие металлы с высоким Z, но более низким, чем у лития, давлением пара. Это позволит создать долговечную, неповрежденную и самообновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов, которая не оказывает загрязняющего воздействия на плазму. Сформулировать основные идеи альтернативной концепции внутрикамерных элементов можно на основе всестороннего анализа проблем и требований, возникающих при разработке внутрикамерных элементов стационарного реактора, например, реактора типа ДЕМО. В статье представлен анализ возможной конструкции литиевых внутрикамерных элементов и обсуждаются основные идеи концепции литиевой первой стенки токамака реакторных технологий.

*Ключевые слова:* литий, жидкие металлы, дивертор, лимитер, первая стенка **DOI:** 10.31857/S0367292121110251

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Нерешенным вопросом при разработке стационарного термоядерного реактора является конструкция его внутрикамерных элементов (ВЭ), обращенных к плазме. В настоящее время стало очевидным, что среди материалов, традиционно используемых для ВЭ, нет твердых конструкционных материалов, которые бы отвечали требованиям длительной эксплуатации под воздействием потока термоядерных нейтронов (14 МэВ) с плотностью ~ $10^{14}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> и теплового потока с плотностью 10-20 МВт/м<sup>2</sup>.

Альтернативным решением этой проблемы является использование жидких металлов (ЖМ) в качестве материала, обращенного к плазме, и, в первую очередь лития, имеющего малый атомный номер (низкое зарядовое число Z). Рассматриваются и другие легкоплавкие металлы с высоким Z, но более низким, чем у лития, давлением

насыщенных паров. Это позволит создать долговечную, неповрежденную и самообновляющуюся поверхность ВЭ, которая не оказывает загрязняющего воздействия на плазму.

Сформулировать основные идеи альтернативной концепции ВЭ можно на основе всестороннего анализа проблем и требований, возникающих при разработке ВЭ стационарного реактора, например, реактора типа ДЕМО [1, 2]. Необходимо также учитывать современный опыт и достижения в области проектирования, материаловедения и технологии конструкционных материалов, особенностей применения ЖМ в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы [3–8]. В статье представлен анализ возможной конструкции литиевых ВЭ и обсуждаются основные идеи концепции литиевой первой стенки токамака реакторных технологий (TRT) [9].



**Рис. 1.** Результаты расчета зависимости величины отводимого теплового потока от скорости потока ЖМ при температуре поверхности  $T_{\text{Lim}} = 400, 600, 900^{\circ}$ С.



Рис. 2. Поток жидкого лития в поперечном магнитном поле экспериментального стенда. Овалом выделены места остановки потока [10].

### 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ДЛЯ ЛИТИЕВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТRT

Наиболее важным моментом, от которого зависит существо концепции, является выбор схемы использования ЖМ. Существуют четыре основных подхода к защите ВЭ с помощью ЖМ: толстая быстротекущая пленка; тонкая медленно текущая пленка; медленная текущая пленка через капиллярно-пористую систему (КПС) и паровая защита. Принципиально важно, чтобы концепция имела перспективу для использования в стационарном токамаке-реакторе. Поэтому в данном обзоре не рассматривается подробно существующее разнообразие схем, пригодных лишь для экспериментальных физических установок.

Первый подход, предложенный в США, предполагает обеспечение отвода тепла и частиц за счет потока толстого слоя (более 1 см) ЖМ по по-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

верхности ВЭ. Однако для выполнения заявленных функций требуется высокая скорость потока ЖМ (более 10 м/с) при тепловом потоке из плазмы до 10 МВт/м<sup>2</sup> (рис. 1). Высокое МГД-сопротивление течению ЖМ в магнитном поле не позволяет реализовать такой подход. Как было показано экспериментально (рис. 2) [10], поток лития со скоростью  $0.3-1.2 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$  останавливается при поперечном магнитном поле 0.2-0.3 Тл. Кроме того, трудно организовать равномерное покрытие поверхности ВЭ и обеспечить необходимое сопротивление разбрызгиванию под действием МГД-сил. Под влиянием непреодолимых проблем развитие этого направления было приостановлено.

Вторая концепция, интенсивно развиваемая сейчас в США и под их влиянием в КНР, заключается в организации медленного течения тонкой пленки ЖМ на поверхности ВЭ для защиты и



**Рис. 3.** Схема и модель ВЭ с ЖМ токамака NSTX-U: схема с подпиткой с помощью КПС без активного охлаждения (а); модель ВЭ для испытания на установке Pilot-PSI (б); схема Т-образного ВЭ стационарного токамака-реактора ДЕ-МО с активным охлаждением (в). На рисунке цифрами обозначены: *1* – подложка ВЭ, *2* – жидкий метал, *3* – текстурированная поверхность, *4* – внутренняя капиллярная структура, *5* – внутренний резервуар, *6* – пористая или текстурированная поверхность, *7* – жидкий литий, *8* – конструкционный материал (например, сталь F82H), *9* – хладагент (например, гелий).

самообновления. Отвод тепла обеспечивается теплопроводностью через конструкцию ВЭ к протекающему теплоносителю [11]. В этом случае стабилизация температуры поверхности сильно зависит от конструкции, материалов ВЭ и свойств охлажлаюшей жилкости. Основными проблемами для такой концепции являются достижение равномерного покрытия пленкой ЖМ поверхности ВЭ и разбрызгивание под действием МГД-сил. В решении этих проблем разработчикам пришлось использовать российский полход с использованием капиллярного эффекта. В США подпитку и распределение ЖМ по поверхности ВЭ стараются осуществить за счет каналов миллиметрового размера, нанесенных на поверхность конструкции (бороздки). В КНР в дополнение к этому применяют тканую сетку. Примером реализации такого подхода является разработка ВЭ для токамака NSTX-U (рис. 3) и EAST (рис. 4). Как показывают эксперименты (рис. 5) [12], относительно положительный результат по равномерном распределении потока ЖМ по поверхности достигается только при использовании капиллярного эффекта (нанесение мелких царапин, канавок или сетки, нанесение пористого порошкового слоя).

Третья концепция, разрабатываемая в нашей стране, на основе неподвижного или медленно

протекающего ЖМ заключенного в пористую структуру КПС [13] выглядит как наиболее успешное решение для защиты поверхности ВЭ. Эта концепция интегрирует все преимущества ЖМ с возможностью равномерного распределения слоя ЖМ на поверхности ВЭ независимо от ее ориентации в пространстве при высоком сопротивлении разбрызгиванию. Отвод тепла обеспечивается за счет теплопроводности через структуру ВЭ к проточному теплоносителю. Таким образом, способность ВЭ на основе КПС выдерживать тепловые потоки высокой удельной плотности сильно зависит от конструкции, конструкционных материалов и охлаждающей жидкости.

Первые эксперименты, проведенные нами с текущим по панели с КПС литием [14], подтверждают реализуемость разрабатываемой концепции.

Вторая и третья концепции достаточно близки. В перспективе они могут объединиться поскольку решение критических проблем опирается на применение капиллярного эффекта с помощью КПС.

Исходя из существующих аналитических обзоров и собственного опыта [3–8, 15], наиболее целесообразной схемой является использование медленного дрейфа жидкого металла по пористой





**Рис. 4.** Лимитер с текущим литием токамака EAST: лимитер с прокачкой ЖМ по каналам за счет термоэлектрического эффекта (а); лимитер с прокачкой ЖМ ЭМ насосом и распределением лития с помощью КПС, охлаждение теплоносителем (б, в).



**Рис. 5.** Вид поверхности литиевого лимитера LLL токамака EAST. Скорость потока лития  $V_{\text{Li}} = 1 \text{ см/c}$  (эксперименты 2016 г.): гладкая поверхность (а); капиллярные бороздки перпендикулярные направлению потока (б) [12].

поверхности КПС или непосредственно в ее структуре. Данная схема позволяет осуществлять самообновление поверхности ВЭ любой формы и ориентации, стабилизацию ЖМ под действием электромагнитных сил за счет капиллярных сил в КПС. Медленно протекающий под действием силы тяжести ЖМ (не более нескольких миллиметров в секунду) позволит удалить захваченный тритий и накопленные примеси. Причем нет необходимости осуществлять постоянную "проливку" ЖМ. Эта операция может проводиться периодически по достижении заданной концентрации трития в литии или при возникновении необходимости подпитать поверхность ЖМ и удалить осевшие загрязнения. Концепция одинаково подходит для использования любого жидкого металла. В этом случае тепловая энергия, поступающая от плазмы к поверхности, отводится через структуру ВЭ к протекающему теплоносителю. В качестве материала КПС предполагается исполь-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021



**Рис. 6.** Схема возможной конструкции жидкометаллического литиевого дивертора токамака-реактора [16, 17]. На рисунке цифрами обозначены: *1* – поток энергии, *2* – каналы зоны испарения лития, *3* – каналы зоны конденсации лития.



**Рис.** 7. Схема литиевого дивертора (а) и распределение потока пара лития в канале дивертора (б) для концепции ЖМ дивертора реактора ДЕМО типа "паровой ящик" ("дно ящика слева") [18].

зование хорошо зарекомендовавшего себя пористого материала на основе металлических волокон, свойства которого описаны в [15].

Отдельным направлением применения ЖМ в токамаках являются концепции, основанные на принципе газовой / паровой мишени [16–18]. В этих концепциях (см. рис. 6, 7) защита приемных элементов дивертора осуществляется за счет высокой скрытой теплоты парообразования ЖМ (лития). В начальный момент приходящая энергия плазмы расходуется на испарение ЖМ с поверхности приемной пластины и перераспределяется на большую поверхность стенок канала дивертора при его конденсации. Тем самым обеспечиваются щадящие условия отвода тепла через стенки канала к теплоносителю. Помимо этого, испарившийся ЖМ создает плотное облако пара ЖМ над поверхностью приемной пластины, ко-

торое играет роль "паровой" мишени. В объеме такой мишени происходит переизлучение части энергии приходящей плазмы. Переизлученная энергия в виде фотонов перераспределяется по поверхности стенок канала. Поскольку поверхность канала в разы больше поверхности приемной пластины, то падающий на стенки тепловой поток кратно снижается. При обеспечении соответствующих условий в диверторе может возникнуть режим с оторванной плазмой. Возможность реализации подобного механизма защиты продемонстрирована в экспериментах с ЖМ мишенями на установке Pilot-PSI [19].

Концепция защиты ВЭ на основе переизлучения (некоронального излучения) большей части энергии частиц плазмы, выходящих в SOL, на атомах лития предложена в работе [20]. Литий поступает в SOL за счет испарения/распыления с

Конструкционный материал	Температурный предел, °С				
	Li	Sn / Sn-Li сплав	Ga		
Ферритная / ферритно-мартенситная хромистая сталь	800	<400	<400		
Аустенитная Cr-Ni сталь	700	<400	<400		
V и V-Cr-Ті сплавы	900	<700	<700		
Мо и сплавы	1200	1000	<700		
W и сплавы	1500	1200	700-900		
Си и сплавы	>180	>230	>150		

Таблица 1. Температурный предел совместимости конструкционных материалов с ЖМ

поверхности литиевого лимитера, размещенного в области плазмы вне последней замкнутой магнитной поверхности. Выходящие на поверхность первой стенки камеры токамака ионы лития перехватываются коллекторами, находящимися в тени лимитера — источника лития. Таким образом осуществляется снижение величины тепловых потоков из плазмы, выходящих на ВЭ и организуется замкнутый цикл циркуляции лития в камере токамака без его неконтролируемого накопления.

Концепция ЖМ ВЭ для стационарного токамака-реактора типа ДЕМО подробно рассмотрена в [21].

Кроме лития в настоящее время активно рассматриваются как ЖМ для использования в термоядерном реакторе галлий, олово и сплав оловолитий [3–5]. Окончательный выбор ЖМ может быть сделан только на основании следующих критериев отбора: имеющийся опыт использования в условиях токамака, наличие отработанной технологии применения, совместимость с конструкционными материалами ВЭ, физико-химические свойства, активируемость [21–26].

Считается, что верхний температурный предел применимости ЖМ определяется допустимым потоком его испаренных или распыленных атомов в плазму. Для лития и олова он составляет ~500 и ~1000°С соответственно, но с учетом механизма переосаждения он может достигать ~700 и 1250°С соответственно [26]. Для сплава Li–Sn давление насыщенных паров лития над расплавом более чем на три порядка ниже соответствующих давлений паров для чистого Li [27]. Для олова испарение не наблюдается при температуре <1000°С. [28]. По этой причине применение сплавов Sn-Li выглядит предпочтительнее с точки зрения более высокой допустимой температуры использования в ВЭ.

Пределы рабочих температур, определяемые по совместимости ЖМ с конструкционными материалами ВЭ и КПС [29], приведены в табл. 1.

Как видно, галлий является наиболее агрессивным среди предложенных ЖМ и может быть исключен из рассмотрения. Указанные температурные пределы должны учитываться при проектировании ВЭ, выборе конструкционного материала и определении допустимого теплового потока. По этим причинам литий можно рассматривать как наиболее предпочтительный ЖМ. Во всех рассмотренных концепциях смачиваемость конструкционных материалов ЖМ является критическим аспектом. Угол смачивания лития и олова для выбранных конструкционных материалов составляет  $\sim 0^{\circ}$  и 20-30° соответственно. Проблема со смачиванием металлов оловом является нетривиальной и разработка технологии смачивания в этом случае совершенно необходима. Для сплава Li-Sn эта проблема не столь критична, поскольку присутствие лития приводит к его более высокой химической реакционной активности по отношению к оксидным слоям на поверхности твердого конструкционного материала. Тем не менее технология смачивания сплавом Li-Sn конструкционных материалов ВЭ требует дальнейшей проработки.

Из соображений безопасности общее количество лития в камере реактора не должно превышать определенного предела, который определяется исходя из предельно возможного давления водорода в камере (0.2 МПа), возникающего в результате химической реакции общего количества лития с водой [30]. Расчетное количество лития в диверторе реактора типа ДЕМО на основе литиевых КПС при предполагаемой площади приемных пластин ~66 м<sup>2</sup>, толщине КПС равной 0.5 мм и пористости КПС равной 40% составит ~13 л (~6.5 кг), что соответствует требованиям безопасности. Эта проблема не возникает, когда применяются сплавы Li–Sn.

Поскольку литий является активным поглотителем водорода, возникает проблема захвата и накопления радиоактивного трития в камере токамака-реактора. Для ДЕМО предел допустимого количества захваченного трития не должен превышать 1 кг [30]. Однако, принимая во внимание, что равновесное давление системы Li–H при 600°С составляет 270 Па, а максимальное давление в диверторе может быть выше этой величины, то для предотвращения образования тритидов или дейтеридов лития необходима организация рециркуляции лития для снижения концентрации изотопов водорода в растворе жидкого металла ниже критической величины их образования. Для сплава Li–Sn этот аспект не критичен и не нуждается в каких-либо специальных мерах. Таким образом, реализованная скорость обновления лития в диверторе не позволяет образовывать гидрид/тритид лития, а общее количество захватываемого трития в камере значительно ниже предельно допустимого значения. Для сплава Sn и Li–Sn этот аспект не критичен и не нуждается в каких-либо специальных мерах.

Сравнивая стабильность агрегатного состояния и состава рассматриваемых ЖМ, необходимо отметить, что чистые металлы, такие как Li и Sn, являются стабильными в отличие от сплава Li–Sn.

Для сплава Li-Sn возможно изменение концентрации лития вследствие его испарения при эксплуатации ВЭ. Это может приводить к тому, что сплав, находящийся в высокотемпературной области ВЭ, со временем обедняется по содержанию лития и необходимый для кондиционирования плазмы поток лития заметно снижается. Наиболее критическим результатом перераспределения лития является возможное образование на поверхности холодной зоны ВЭ тугоплавких соединений (интерметаллидов с температурой плавления ~700-800°С) вследствие осаждения лития и роста его концентрации на поверхности. Кроме прочего, температура плавления сплава Li-Sn выше по сравнению с чистыми литием и оловом. Для считающегося перспективным сплава 75 ат. % Sn + 25 ат. % Li температура плавления составляет около 350°С. В интервале температур 222-350°С расплав не является однофазным. В жидком расплаве с низкой концентрацией лития присутствует твердая фаза, обогащенная литием - Li<sub>2</sub>Sn<sub>5</sub>. Таким образом, применение сплава Li-Sn в качестве материала, обращенного к плазме, находится под сомнением.

Исходя из вышеизложенного, чистый литий является наиболее предпочтительными жидким металлом для реализации концепции ЖМ ВЭ токамака-реактора.

### 3. ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВЭ

Отметим, что с точки зрения активации и влияния радиационного повреждения на свойства конструкционных материалов в условиях ДЕМО приемлемыми считаются такие материалы, как хромистые нержавеющие стали, ванадиевые сплавы и вольфрамовые сплавы. Медные сплавы

могут применяться только в очень ограниченном количестве. При анализе следует учитывать возможную реальную конструкцию ВЭ и наличие доступных технологий их изготовления. Например, трудно предположить реальный ВЭ токамака, целиком состоящий из вольфрама или его сплавов. Вольфрам может быть успешно использован в виде волокнистого материала основы КПС или зашитных пластин ВЭ. Таким образом. хромистые стали и ванадиевые сплавы можно рассматривать как основные структурные материалы ВЭ. С этих позиций температурный порог для использования лития или олова в реальной конструкции ВЭ определяется самым низким порогом для материала, контактирующего с ЖМ. В этом случае контакт меди и ее сплавов с ЖМ недопустим по крайней мере без применения защитных покрытий. Таким образом, температурный порог (см. табл. 1) для использования лития в ВЭ, содержащих стальные элементы, составляет 800 и 900°С для ВЭ с ванадием. Для олова этот предел не превышает 400°С для стальных конструкций и 700°С для ванадиевых. Таким образом, при использовании лития приемлемой температурой поверхности ВЭ можно считать 700°С (с учетом ограничения по допустимому потоку лития в плазму). Для олова допустимая температура поверхности (контакт только с W) составляет около 1000°С. Однако для областей конструкции ВЭ, где ЖМ контактируют со сталью и ванадиевым сплавом он составляет лишь 400 и 700°С соответственно.

Учитывая влияние нейтронного облучения (радиационное повреждение до 5 сна/год) на свойства конструкционных материалов дивертора, допустимый температурный диапазон их использования в конструкции ВЭ составляет [2]: для стали типа Eurofer – 350–550°С; для сплава V-Cr-Ti – 400–700°С; для Си – 200–350°С; для сплавов W – более 650°С. Это означает, что при разработке конструкции ВЭ применяемые материалы должны размещаться в зонах конструкции ВЭ с допустимыми температурами. Таким образом, исходя из предела совместимости с ЖМ (табл. 1), тепловых свойств материала и критерия прочности (SDC-IC) можно оценить максимально допустимый тепловой поток на поверхности ВЭ для рассматриваемых материалов (табл. 2).

Из анализа приведенных в табл. 2 данных следует, что только вольфрам соответствует требованиям по стационарной работе ВЭ при потоках 10–20 МВт/м<sup>2</sup>. Следовательно, для создания реальных конструкций ВЭ необходимо разработать новый конструкционный материал для принимающей поверхности ВЭ с высокими прочностными и теплофизическими свойствами.

Предложен новый композитный материал, состоящий из 3-мерной пористой структуры на ос-

Материал	Тепловой поток, МВт/м <sup>2</sup>
Ферритная / ферритно-	3.5
мартенситная хромистая сталь	
V-Cr-Ti сплав	9.5
Композит 67% вольфрам +	21
33% хромистая ферритная сталь	
W и сплавы	48

Таблица 2. Предельный тепловой поток на поверхность конструкционных материалов ВЭ\*

\*толщина стенки 1 мм + 0.5 мм КПС с литием, температура поверхности ВЭ 650°С.

нове вольфрамового волокна заполненной ферритной сталью. Вид образца прототипа такого композиционного материала (67% вольфрамового волокна + 33% чистого железа) представлен на рис. 8. Как показали проведенные расчеты, оптимальной по составу и свойствам является композиция 67% вольфрамового волокна + 33% стали. Ожидаемые свойства композита, полученные из расчетных оценок представлены в табл. 3.

Кроме того, предлагаемый композиционный материал может быть достаточно технологичным и иметь хорошую свариваемость с другими элементами ВЭ, выполненными из стали типа Русфер (Еврофер). Для подтверждения этого предположения необходимо будет изготовить и исслетакой материал. Первые довать образцы модельного композиционного материала в настоящее время уже получены пропиткой пористого мата из вольфрамовой проволоки железом высокой чистоты. Начаты исследования их механических и теплофизических свойств. На рис. 8 при-



**Рис. 8.** Внешний вид поверхности композита 67% W + 33% Fe.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

Таблица 3. Расчетные свойства	композита	67%	воль
фрамовое волокно + 33% сталь			

Свойство	Величина
Теплопроводность, Вт/м·К	91
Предел текучести, МПа	1060
Предел прочности, МПа	1180
Модуль упругости, ГПа	327
Коэффициент Пуассона	0.36
Коэффициент теплового расширения, 1/К	$6.6 \times 10^{-6}$

веден внешний вид поверхности полученного композита.

Выбор основного материала КПС является очень важным аспектом концепции ВЭ. Волокнистые пористые материалы являются оптимальным решением с точки зрения механических свойств, стойкости к термоударам и радиационному воздействию. Более того, не спеченные материалы, такие как проволочная сетка, войлок и "металлическая резина", имеют явное преимущество в гибкости, ударной прочности и релаксации напряжений. С учетом коррозионной стойкости и теплофизических свойств предпочтительным является КПС на основе пористого материала из W волокна.

Обычно структура КПС состоит из двух слоев. Поверхностный слой определяет капиллярные свойства КПС. Малый размер пор КПС обеспечивает высокое капиллярное давление и повышенную стабильность ЖМ на поверхности ВЭ. Радиус пор для реальной структуры КПС токамака обычно составляет 10–30 мкм, что соответствует 4–7 × 10<sup>4</sup> Па для олова и  $2.5-5 \times 10^4$  Па для лития (рис. 9). Такие поры обеспечивают достаточный капиллярный подъем ЖМ для обеспечения эффективного обновления поверхности ВЭ.

Структура поверхности КПС должна удовлетворять следующему неравенству для обеспечения функциональности в условиях токамака [22]:

$$P_C \ge \Delta P_L + \Delta P_G + \Delta P_F + \Delta P_{MHD}, \tag{1}$$

где  $P_C$  – капиллярное давление,  $\Delta P_L$  – гидравлическое падение давления,  $\Delta P_G$  – гидростатическое падение давления,  $\Delta P_F$  – падение давления на испаряющейся поверхности за счет фазового перехода жидкость – пар,  $\Delta P_{MHD}$  – падение давления за счет МГД-эффекта в магнитном поле. Компоненты неравенства могут быть оценены следующим образом:  $\Delta P_L = (8m\mu L_{CPS})/(S_{CPS} \in R_{eff}^2 \gamma)$ , где m – скорость испарения,  $\mu$  – динамическая вязкость лития,  $L_{CPS}$  – размер КПС вдоль потока ЖМ,  $S_{CPS}$  – площадь поперечного сечения КПС,  $\epsilon$  – объемная пористость,  $R_{eff}$  – эффективный радиус



Рис. 9. Зависимость величины капиллярного давления  $P_C$  от эффективного радиуса пор  $R_{eff}$  в КПС с Li и Sn.

пор КПС,  $\gamma$  – плотность лития;  $\Delta P_G = \gamma gh$ , где g – ускорение свободного падения, *h* – высота от дна;  $\Delta P_F$  может быть оценено с хорошей точностью как половина давления насыщенных паров лития Р, при соответствующей температуре поверхности;  $\Delta P_{MHD} = B^2 L_{CPS} v (1 + l/\delta)^2 \delta^2 / (\rho l^2)$ , где B – магнитное поле, v – скорость потока лития,  $\delta$  – диаметр проволоки КПС и *l* – размер ячейки КПС "в свету", р – электрическое сопротивление лития. Выражение было получено по экспериментальным данным исследования влияния МГД на течение лития в КПС. Следовательно, КПС будет работать без повреждений во время нормальных разрядов. Возможность КПС обеспечить стабилизацию жидкого лития на поверхности КПС во время срыва плазмы определяется как  $P_c \ge P_{EM}$ , где  $P_{EM}$  – импульс давления в жид-ком литии, индуцированный электромагнитными силами во время срыва плазмы.

Возможность противостояния срыву и переходным процессам определяется следующими требованиями к структуре КПС [31], которые были определены экспериментальным и расчетным путем. Радиус пор КПС должен быть менее 140 мкм, а диаметр проволоки менее 200 мкм, чтобы КПС оставалась неповрежденной в условиях импульсного теплового потока ~100 ГВт/м<sup>2</sup>.

Суммарная потеря давления в КПС в условиях токамака-реактора с полем 6 Тл оценивается как 10 кПа. Следовательно, КПС с размером пор около 10–30 мкм будет работать без повреждений как при нормальном разряде, так и при срыве плазмы.

Второй (внутренний) слой должен обеспечивать протекание ЖМ в структуре КПС. Обычно оно обеспечивается за счет уменьшения падения гидравлического сопротивления созданием в КПС артериальной структуры с эффективными диаметрами артерий 100–200 мкм.

Теплопроводность пористой структуры и композиционных материалов широко изучалась. Но, для конкретных структур КПС требуется дополнительное экспериментальное исследование. Результаты расчетов для теплопроводности и данные для лития и вольфрама представлены в табл. 4.

Капиллярный эффект (капиллярное давление  $P_c$ ) сильно зависит от угла смачивания. Низкая химическая активность олова является причиной проблемы с надежным смачиванием материалов основы КПС. Это приводит к значению угла сма-

Температура, К	Теплопроводность Li	Теплопроводность W	Средняя теплопроводность КПС
700	50.6	130.2	48.6
900	55.9	120.2	49.9
1000	58.2	116.6	50.6
1200	62.1	113.5	52.3

Таблица 4. Теплопроводность Li, W и W+Li KПC, Bт/(м · K)

Теплоноситель	Давление, МПа	Скорость потока, м $\cdot$ с <sup>-1</sup>	Температура, °С	Коэффициент теплоотдачи, $\kappa B \tau \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Жидкий литий	0.01	1	200	44
Вода	5	10	200	52 (закрученный поток), 25 (нормальный поток)
Газ (гелий)	15	135	200	20
Дисперсный газо-водяной поток	0.2	40 <i>G</i> <sub>газ</sub> / <i>G</i> <sub>вода</sub> > 0.06 (отношение массового расхода газ/вода)	20	70–100

Таблица 5. Основные параметры и коэффициент теплоотдачи теплоносителей

чивания  $\Theta > \pi/2$  и, следовательно, к низкому  $P_C$ . Для олова самое низкое значение угла смачивания равного  $\Theta \sim \pi/6$  можно достигнуть только после специально разработанной методики очистки поверхности твердого металла. Кроме того, высокая удельная плотность Sn приводит к низкому капиллярному подъему в КПС, что является ограничивающим фактором для самообновления поверхности ВЭ. Поэтому чтобы обеспечить самообновление поверхности ВЭ и заполнение КПС оловом необходимо разработать специальную процедуру смачивания.

Для лития нет никаких проблем со смачиванием твердых металлических поверхностей. Угол смачивания литием стали, W и других металлов близок к нулю сразу после первой процедуры смачивания без принятия специальных мер предварительной очистки поверхности. В настоящее время испытываются конструкции ВЭ с вольфрамовой КПС, изготовленной с помощью 3D печати [32].

# 4. ВЫБОР ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Важным аспектом концепции является выбор теплоносителя и конструкции системы отвода тепла. Конструкция ВЭ должна обеспечивать сбалансированные уровни температуры поверхности  $T_{\text{пов}}$  для соответствующего ЖМ и температуры внутренней стенки канала охлаждения  $T_{\text{ст}}$ . Следует учитывать, что  $T_{\text{ст}}$  оказывает сильное влияние на необходимое давление теплоносителя (для жидких теплоносителей), что предотвращает возникновение кризиса теплопередачи.

Для концепции с медленно текущей тонкой пленкой ЖМ отвод тепла, как правило, осуществляется через конструкцию ВЭ к теплоносителю, протекающему в каналах системы охлаждения. Обычно в качестве теплоносителей ВЭ для термоядерного реактора рассматриваются такие теплоносители, как вода, жидкий металл (литий), газ (аргон) [1]. В настоящее время предложено использовать мелкодисперсный водяной спрей в газовом потоке [33, 34]. Для однофазного теплоносителя (литий, вода, гелий) в процессе теплопередачи основную роль играют теплопроводность самого теплоносителя и конвективный теплообмен. Для газо-водяной смеси испарение является основным процессом теплопередачи при T<sub>ст</sub> > > 100°С. Этот процесс является наиболее эффективным. При сравнении рабочих параметров и коэффициентов теплопередачи (табл. 5) различных теплоносителей видно, что эффективность отвода тепла, уровень давления и расход газо-водяного спрея имеют большие преимущества. Например, давление воды должно увеличиваться в диапазоне 1-160 атм. при повышении температуры охлаждаемой стенки от 100 до 350°С. Для газоводяного спрея давление 2–4 атм. приемлемо при всех температурах  $T_{\rm cr} > 100^{\circ}$ С. Для Li в качестве теплоносителя достаточно давления <0.1 атм.

Таким образом, только жидкий литий и газоводяной спрей можно считать подходящими теплоносителями, обеспечивающими приемлемые температуры поверхности ВЭ при требуемых тепловых потоках до 20 МВт/м<sup>2</sup>. Другие теплоносители должны иметь слишком высокие давления и расход, что приводит к большим толщинам стенок и превышению пределов для температуры поверхности ВЭ.

Для жидкого лития критической проблемой является высокое сопротивление потоку в системе охлаждения из-за МГД-сил. Для него имеется хорошая совместимость с литий- и оловосодержащими ВЭ.

Вода рассматривается как приемлемый теплоноситель для оловосодержащего ВЭ, в случае, когда температура стенки канала охлаждения ниже 200°С. Можно отметить, что в вакууме или в атмосфере инертного газа реакция лития с водой не приводит к взрыву, а только к выделению водорода. Протечка воды не должна приводить к катастрофическим последствиям, если количество лития в камере токамака-реактора не превышает заданного предела. Расход воды на охлаждение ВЭ при тепловом потоке 10 MBt/m<sup>2</sup> составляет ~4 л · m<sup>-2</sup> · c<sup>-1</sup>, а газа – 1.7 м<sup>3</sup> · c<sup>-1</sup>. С точки зрения последствий пролива воды в вакуумную камеру реактора с литийсодержащим ВЭ такой теплоноситель менее опасен. Таким образом, газо-водяная струя может рассматриваться как оптимальный хладагент для ВЭ с ЖМ.

### 5. ВЫБОР БАЗОВОЙ КОНЦЕПЦИИ Для литиевой первой стенки ткт

Концепция литиевой первой стенки токамака TRT определяется проектными рабочими параметрами ее элементов. Предполагается, что основная часть поверхности первой стенки подвергается стационарной (более 100 с) тепловой нагрузке на уровне 0.1-0.2 MBT/м<sup>2</sup>. Кроме того, на ее поверхность возможно кратковременное (<1 с) воздействие плазмы при переходных процессах. В верхней и нижней части первой стенки камеры при зажигании разряда (режим старт-лимитера) ожидаются тепловые потоки 1-5 MBт/м<sup>2</sup>. В области. прилежащей к входу в дивертор, можно ожидать воздействие вертикального смещения плазменного шнура с высокими тепловыми потоками. Исходя из приведенных выше условий и результатов анализа, можно предложить следующие виды элементов первой стенки для защиты плазмы от поступления нежелательных тяжелых примесей и сохранение целостности конструкнии ВЭ.

### 5.1. ИТЭР-подобные ВЭ первой стенки

Предполагается, что основная часть первой стенки будет формироваться из панелей на основе ИТЭР-подобных элементов с активным охлаждением потоком воды. Базовый элемент панели состоит из трубки охлаждения, изготовленной из медного сплава, облицованной пластинами бериллия. При тепловом потоке на поверхность  $0.1-0.2 \text{ MBT/m}^2$  на поверхности панелей ожидается температура <180°С. Для предотвращения повреждения медных трубок при возможном осаждении лития на их поверхность предполагается нанесение тонкого защитного покрытия из материала, совместимого с литием при указанном уровне температур.

Кондиционирование поверхности таких ВЭ возможно путем периодического нанесения тонкого слоя лития. Нанесение лития может осуществляться как с помощью испарителей с принудительным нагревом, так и эмиттеров лития, вводимых в краевую плазму токамака. Использование кондиционирования литием приводит к снижению потока примесей, поступающих в плазму, и существенно улучшает параметры плазменного разряда.

### 5.2. Испаритель лития

По своей сути испаритель представляет собой конструкцию, во внутреннем объеме которой содержится небольшое количество лития, достаточное для работы устройства в течение кампании токамака ТРТ. Конструкция должна быть снабжена электрическим нагревателем и термопарой для контроля потока испаренного лития. Кроме того, испаритель снабжается манипулятором для ввода в камеру и позиционирования, а также устройством, направляющим поток пара. С помощью такого испарителя в промежутках между разрядами можно будет проводить процесс нанесения литиевого слоя на заранее выбранную часть поверхности первой стенки. Для обеспечения равномерности нанесения литиевого покрытия по всему обходу камеры необходимо наличие нескольких таких устройств. Подобные конструкции были успешно использованы для литизации внутренней поверхности камеры стелларатора ТЈ-IІ и дивертора токамака NSTX [3].

### 5.3. Эмиттер лития

Эмиттер лития в виде неохлаждаемого лимитера, вводимого в краевую плазму, может обеспечить необходимый поток лития за счет распыления и испарения с поверхности, нагреваемой потоком плазмы. Интенсивность ввода лития регулируется за счет изменения глубины введения лимитера (расстояния до последней замкнутой магнитной поверхности) с помощью манипулятора. Такой подход позволил практически исключить поступление тяжелых примесей в плазменный шнур. Прототип такого устройства был создан (рис. 10) и успешно применялся в токамаках T-11M, T-10, FTU и стеллараторе TJ-II [35]. Поверхность лимитера покрывается капиллярно-пористой структурой (КПС), пропитанной литием. Это обеспечивает возможность стабилизации жидкого лития при воздействии электромагнитных сил и исключает его разбрызгивание. Кроме того, КПС позволяет создать устройство с различной формой и ориентацией в пространстве. Подача лития в эмиттер может осуществляться как из встроенной емкости, так и с наружи камеры без нарушения вакуума.

#### 5.4. Старт-лимитер

Использование специального старт-лимитера позволит защитить элементы первой стенки от воздействия тепловых потоков уровня 5 MBт/м<sup>2</sup> на начальной стадии формирования плазменного разряда. Такие лимитеры устанавливаются в верхней и нижней области первой стенки. Конструкция такого лимитера должна включать как систему охлаждения, способную поддерживать температуру литиевой поверхности на уровне не



Рис. 10. Прототип эмиттера лития для испытаний на токамаке Т-11М.

выше 500-600°С для ограничения потока атомов лития в плазму, так и систему подпитки литием.

Прототипом такого лимитера может служить разрабатываемый для токамака Т-15МД стационарный литиевый лимитер [21] на основе КПС, в котором воплотились основные идеи концепции ВЭ для стационарного токамака-реактора (рис. 11).

Лимитер снабжен системой перемещения относительно плазмы токамака и предназначен для стационарной работы при тепловой нагрузке 10 MBt/м<sup>2</sup>. Такой лимитер может работать в тандеме с аналогичным лимитером, действуя поочередно как эмиттер или коллектор лития, обеспечивая тем самым замкнутый контур циркуляции атомов лития в камере токамака, что предотвращает накопление лития на стенках токамака в процессе длительной эксплуатации. В качестве теплоносителя системы теплоотвода используется газо-водяной спрей. Лимитер снабжается литием (для заполнения лимитера и обеспечения очистки поверхности) с помощью электромагнитного насоса из внешней системы.

Реализация рассматриваемой концепции ВЭ была апробирована на серии моделей стационарно работающих ВЭ с ЖМ для токамаков T-11M, FTU, KTM [35–39]. Созданные модели имеют возможность обеспечивать работу ВЭ в температурном диапазоне 200—550°C при стационарном тепловом потоке до 10  $MBT/m^2$ .

Для обоснования планируемого проекта жидкометаллического дивертора токамака КОМ-ПАСС-АПГРЕЙД была проведена серия экспериментов с диверторными мишенями на основе КПС с Li и сплавом LiSn [40, 41]. Оценка допустимой мошности дивертора на основе КПС с жидкими металлами и поведения жидких металлов в условиях дивертора была впервые выполнена в условиях токамака КОМПАСС (Н-режим с ЭЛМами). Специальные модули дивертора (25 × × 45 мм) на основе молибденовой КПС с радиусом поры 75 мкм и заполненные литием и сплавом Li-Sn (73% Sn), были установлены в открытый дивертор токамака КОМПАСС на внутреннем пересечении с сепаратриссой. Вид такого модуля и его расположение в диверторе представлены на рис. 12 и 13 соответственно. Никаких повреждений КПС и нарушения тепловоспринимающей способности не наблюдалось для обоих вариантов модулей при установившемся нормальном тепловом потоке на поверхность до 12 МВт/м<sup>2</sup> и локальной пиковой энергетической нагрузке порядка 15 кДж/м<sup>2</sup>. Эжекция капель жидкого металла с поверхности КПС не наблюдалась.



**Рис. 11.** Схема жидкометаллического литиевого лимитера токамака Т-15МД: внутрикамерный элемент (а); внешняя система подачи лития и система охлаждения (б). На рисунке цифрами обозначены: *1* – подача газа/воды во внутрикамерный элемент; *2* – форсунка; *3* – КПС; *4* – поток лития; *5* – подача лития во внутрикамерный элемент; *6*, *7* – отвод хладагента из внутрикамерного элемента; *8* – отвод лития из внутрикамерного элемента; *9* – подача газа в магистральный трубопровод; *10* – подача воды в магистральный трубопровод; *11* – электромагнитный насос; *12* – емкость с литием.



Рис. 12. Конструкция модуля дивертора на основе КПС.

Только при увеличении теплового потока до 16–18 МВт/м<sup>2</sup> наблюдалось осушение и плавление поверхностного слоя КПС литиевого модуля, что связывалось с потерей теплового и гидравлического контакта поверхностного слоя с основой вследствие его теплового расширения. Этот эффект является частной особенностью структуры использованной КПС, а не принципиальным недостатком. На дальнейшей работоспособности модуля возникший дефект не сказался. Температура поверхности литиевого модуля достигала 450°С. Воздействие ELM приводило к повышению его температуры на 40–45°С. Наблюдалось свечение нейтрального лития в области диаметром 60 мм вокруг модуля. При этом эффект экранирования поверхности модуля облаком пара лития был очень слабым. Оцененная доля переизлучаемого теплового потока не превышала 0.1– 0.2 MBт/м<sup>2</sup>, что очевидно связано с низким давлением пара при наблюдаемой температуре. Распространение однократно (зеленый) и двукратно



**Рис. 13.** Расположение модуля дивертора в токамаке КОМПАСС (полоидальное сечение плазменного шнура токамака), стрелкой указано расположение модуля дивертора.

(синий) ионизированного лития в камере токамака представлено на рис. 14.

При тепловом потоке до 12  $MBt/M^2$  поступления примеси олова в разряд не наблюдалось. Температура поверхности модуля достигала 950°С. Анализ двух наборов по 14 образцов, установленных по обходу камеры токамака, показывает, что существенное количество лития обнаружено в окрестности модуля в пределах ±40 см. Таким образом, показано, что только литий поступает в разряд из сплава Li–Sn. Как и в предыдущем случае, экранировка паром лития не имела заметного вклада из-за относительно низкого давления пара лития при наблюдаемой температуре. Введение обоих типов модулей в плазму токамака не повлекло за собой никаких изменений в поведение плазменного разряда.

В работе [42] в качестве альтернативного решения проблемы стойкости элементов дивертора при тепловых потоках до 20 МВт/м<sup>2</sup> рассматривается концепция жидкометаллического дивертора стационарного токамака EU-DEMO на основе КПС с жидким оловом. Предложены конструктивные решения на основе опыта использования жидкометаллических лимитеров токамака FTU конструкции, ранее разработанной в AO "Красная Звезда".

Используемые подходы могут быть реализованы для создания приемных элементов первой стенки и дивертора токамака TRT.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что концепция, включающая стабилизацию поверхности жидкого металла с помощью КПС, имеет существенные преимущества и должна быть положена в основу базовой концепции литиевой первой стенки ТРТ. Практический опыт создания и испытаний ВЭ с ЖМ позволяет решить ряд критических вопросов при разработке соответствующей конструкции ВЭ, отвечающей требованиям к длительной эксплуатации в условиях токамака-реактора. КПС с литием обеспечивает защиту и обновление поверхности ВЭ в условиях штатного разряда, при срывах и различного рода неустойчивостях.

Элементы первой стенки, испытывающие воздействие тепловых потоков до 1 МВт/м<sup>2</sup>, могут, быть созданы на основе конструкции ИТЭР-подобных элементов с водяным охлаждением. Причем их модификация должна обеспечить совместимость основных конструкционных материалов с напыленным литием. Кондиционирование первой стенки путем напыления лития с целью улучшения параметров плазменного разряда может быть осуществлено с помощью испарителей или/и эмиттеров.



Рис. 14. Наблюдение поведения лития в разряде: во время ELM (а); между ELM (б).

Защита первой стенки на начальной стадии инициирования разряда и на стадии его гашения может осуществляться с помощью охлаждаемых защитных лимитеров. Конструкция таких лимитеров должна строиться на основе использования литиевой КПС, систем охлаждения, подпитки и вывода лития из камеры для обеспечения стационарного режима работы. При соответствующем выборе конструкционных материалов, системы охлаждения и теплоносителя возможно обеспечить стационарный режим работы при тепловых потоках 10 МВт/м<sup>2</sup> и более. На основе такого подхода могут быть созданы и приемные элементы дивертора.

Работа была выполнена при финансовой поддержке госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Federici G., Biel W., Gilbert M.R., Kemp R., Taylor N., Wenninger R. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 092002. https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/9/092002
- Stork D., Agostini P., Boutard J.-L., Buckthorpe D., Diegele E., Dudarev S., English C., Federici G., Gilbert M.R., Gonzalez S., Ibarra A., Linsmeier C., Puma A.L., Marbach G., Morris P.F., Packer L.W., Raj B., Rieth M., Tran M.Q., Ward D.J., Zinkle S.J. // J. Nuclear Materials. 2014. V. 455. P. 277. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.06.014
- Nygren R.E., Tabarés F.L. // Nuclear Materials and Energy. 2016. V. 9. P. 6. https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.08.008
- Tabares F., Oyarzabal E., Castro De A. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 016029. https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016029
- Jaworski M.A., Brooks A., Kaita R., Menard J., Ono M., Tresemer K., Lopes-Cardozo N., Rindt P. // Fusion Engineering Design. 2016. V. 112. P. 93.
- Mirnov S.V., Azizov E.A., Alekseyev A., Lazarev V.B., Khayrutdinov R.R., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Vershkov V.V. // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. P. 073044. https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/7/073044
- Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A. // Plasma Devices Oper. 2009. V. 17. P. 42.
- Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B. // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 1156. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.017
- 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., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В. // Физика плазмы (данный выпуск).
- Yang J.C., Qi T.Y., Liu B.Q., Ni M.J. // Proc. of 5<sup>th</sup> Internat. Symp. Liquid Metals Application for Fusion, 2017, Moscow.
- 11. *Hu J.* // Proc. of 5<sup>th</sup> Internat. Symp. Liquid Metals Application for Fusion, 2017, Moscow.

- 12. Hu J.S., Zuo G., Ren J., Qingxi Y., Chen Z., Xu H., Zakharov L.E., Maingi R., Gentile C., Meng X.C., Sun Z., Xu W., Chen Y., Fan D., Yan N.O., Duan Y., Yang Z.D., Zhao H., Song Y.T., Zhang Y.D., Wan B.N., Li J.G. // Nuclear Fusion. 2016. V. 56. P. 046011. https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/4/046011
- 13. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. // J. Advanced Materials. 1995. V. 2. P. 650.
- 14. Жарков М.Ю., Вертков А.В., Люблинский И.Е., Вершков В.А., Грашин С.А., Ноткин Г.Е. // Материалы XXIV конференции "Взаимодействие плазмы с поверхностью". Москва, 4–5 января 2021 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 67.
- Lyublinski I.E., Vertkov A.V. // Fusion Engineering Design. 2010. V. 85. P. 924. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.036
- Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Petrova N.P., Sotnikov S.M., Chernobai A.P., Khripunov B.I., Prokhorov D.Yu., Korzhavin V.M. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2002. V. 44. P. 955.
- Golubchikov L.G., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Pistunovich V.I., Potapov I.N., Chumanov A.N. // J. Nucl. Mater. 1996. V. 233–237. P. 667.
- 18. Golston R. // Physica Scripta. 2016. V. T167. P. 014017.
- Morgan T. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2018. V. 60. P. 014025. https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa86cd
- Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T., Dzhurik A.S. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 123015. https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/12/123015
- Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Berlov A.V., Mirnov S.V., Komov A.T., Varava A.N., Zakharenkov A.V., Mazzitelli G., Iafrati M. // Proc. of 27<sup>th</sup> IAEA FEC, 2018. Ahmedabad, India. P. 209.
- 22. Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Vertkov A.V. // Plasma Devices Oper. 2009. V. 17. P. 265.
- Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Semenov V.V., Azizov E.A., Lazarev V.B., Mirnov S.V. // Fusion Engineering Design. 2014. V. 89. P. 996. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.073
- Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Sevryukov O.N., Dzhumaev P.S., Shumskiy V.A., Ivannikov A.A. // J. of Physics Conference Series 748 (1): 012014, 2016.
- 25. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Semenov V.V. // Physics of Atomic Nuclei. 2016. V. 79. P. 1163.
- Morgan T., Vertkov A.V., Bystrov K., Lyublinski I.E., Genuit J.W., Mazzitelli G. // Nuclear Materials Energy. 2017. V. 12(C). https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.017
- 27. Sharafat S., Ghoniem N. // APEX Study, UCLA-UC-MEP-00-31 Report, 2000.
- Anderl R.A., Jenson D.D., Kessinger G.F. // J. Nuclear Materials. 2002. V. 307. P. 739. https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)00975-3
- 29. Люблинский И.Е., Вертков А.В., Евтихин В.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 13.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

- Wenninger R.P., Bernert M., Eich T., Fable E., Federici G., Kallenbach A., Loarte A., Lowry C., McDonald D., Neu R., Putterich T., Schneider P., Sieglin B., Strohmayer G., Reimold F., Wischmeier M. // Nuclear Fusion. 2014. V. 54. P. 114003. https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/11/114003
- Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Mirnov S.V., Vershkov V.V., Mazzitelli G., Iafrati M., Tabares F., Tazhibayeva I. // Proc. of 5th International Symposium on Liquid Metals Application for Fusion. 2017. Moscow. Doi: 30791/1028-978X-2018-10-15-24.
- 32. *Rindt P., Korving S., Morgan T., Cardozo N.L.* // Nuclear Fusion, 2021 (in Press).
- Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Mazzitelli G., Apicella M.L., Iafrati M. // Fusion Engineering Design. 2017. V. 117. P. 130. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.041
- 34. Вертков А.В., Комов А.Т., Люблинский И.Е., Мирнов С.В., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Фрик П.Г. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. С. 57. https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-41-1-57-64
- Вертков А.В., Люблинский И.Е., Жарков М.Ю. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 572. https://doi.org/10.1134/S0367292118070077
- Mazzitelli G., Apicella M.L., Apruzzese G.M., Crescenzi F., Iannone F., Maddaluno G., Pericoli-Ridolfini V., Roccella S., Reale M., Viola B., Vertkov A.V., Lyublinski I.E. // J. Nuclear Mater. 2015. V. 463. P. 1152. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.050
- 37. Iafratti M., Apicella M.L., Boncagni L., Lyublinski I.E., Mazzitelli G., Vertkov A.V. // Fusion Engineering De-

sign. 2017. V. 117. P. 157.

https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.005

 Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Semenov V.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Tazhibayeva I.L., Shapovalov G.V., Kulsartov T.V., D'yachenko A.V., Mazzitelli G., Agostini P. // Fusion Engineering Design. 2013. V. 88. P. 1862. https://doi.org/10.1016/j.fusangdes.2013.05.103

https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.103

- Tazhibayeva I., Shapovalov G., Kulsartov T., Ponkratov Y., Lyublinski I., Vertkov A., Mazzitelli G., Azizov E. and Mirnov S. // Proc. of 25<sup>th</sup> IAEA FEC, 2014, St. Petersburg, Russian Ferderation, CN-221, MPT/P8-13. P. 651.
- Dejarnac R., Horacek J., Hron M., Jerab M., Adamek J., Atikukke S., Barton P., Cavalier J., Cecrdle J., Dimitrova M., Gauthier E., Iafrati M., Imrisek M., Marín-Roldán A., Mazzitelli G., Naydenkova D.I., Prishvitcyn A., Tomes M., Tskhakaya D., Oost G.V., Varju J., Veis P., Vertkov A.V., Vondracek P., Weinzettl V. // Nuclear Materials and Energy. 2020. V. 25. P. 100801. https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100801
- Horacek J., Dejarnac R., Cecrdle J., Tskhakaya D., Vertkov A.V., Cavalier J., Vondracek P., Jerab M., Barton P., Oost G.V., Hron M., Weinzettl V., Sestak D., Lukes S., Adamek J., Prishvitcyn A., Iafratti M., Gasparyan Y., Vasina Y., Naydenkova D.I., Seidl J., Gauthier E., Mazzitelli G., Komm M., Gerardin J., Varju J., Tomes M., Entler S., Hromadka J., Panek R. // Nuclear Materials and Energy. 2020. V. 25. P. 100860. https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100860
- 42. Roccella S., Dose G., de Luca R., Iafrati M., Mancini A. // J. Fusion Energy. 2020. V. 39. P. 462. https://doi.org/10.1007/s10894-020-00263-4

УДК 533.9

# КРИОСТАТ И ВАКУУМНАЯ КАМЕРА ТЯТ

© 2021 г. Д. А. Антропов<sup>а, b</sup>, А. В. Бондарь<sup>а, b</sup>, И. В. Кедров<sup>а, b</sup>, Е. Г. Кузьмин<sup>а, b, \*</sup>, Т. А. Марченко<sup>а, b</sup>

<sup>а</sup> Научно -исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> 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<sup>-4</sup> Па. Вакуумная камера представляет собой цельносварную 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 камера 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 системы 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. Компоновка оборудования токамака ТRT 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 допускаемых температур и напряжений;

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

### 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. Компоновка 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-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

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



Рис. 2. Основные части криостата.



Рис. 3. Общий вид интефейса 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 м<sup>3</sup>. В криостате может быть обеспечен вакуум  $1 \times 10^{-4}$  Па.

### 3. ВАКУУМНАЯ КАМЕРА

В состав вакуумной камеры входят: корпус камеры, патрубки, опоры для крепления внутрикамерных 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°С 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  $5 \times 10^{17}$  н/с реакции D-D ядерный нагрев обмотки ОТП находится в допустимых пределах (1 мВт/см<sup>3</sup>). 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]

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021



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



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

T 7 1	T		U
	ехнические	характеристики	вакуумной камеры
таолица т.	I CAITIN TOORNO	Aupukiepherman	buryyminon Rumepbi

Параметры	Величина
Основные размеры корпуса камеры	
— высота, м	3.85
— наружный диаметр, м	6.64
— внутренний диаметр, м	2.56
– толщина оболочек, мм	25
<ul> <li>толщина ребер, связывающих оболочки, мм</li> </ul>	25
Количество секторов камеры для сборки на монтажной площадке, шт.	4
Площадь внутренней поверхности корпуса камеры, м <sup>2</sup>	120
Объем камеры, м <sup>3</sup>	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	$30 \pm 0$
Рабочее давление воды, МПа	$1.0 \pm 0.3$
Температура прогрева (после разгерметизации), °С	$170 \pm 10$
Давление воды в режиме прогрева, не более, МПа	$1.0 \pm 0.3$
Предельное фоновое давление, Па	$3 \times 10^{-6}$

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 <sup>10</sup>B<sup>4</sup>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, бридерных 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., Кащук Ю.А., Родионов Р.Н. // Физика плазмы. В печати.
- 3. *Villari R., Angelone M., Caiffi 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.

УДК 533.59

# СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТОКАМАКА ТЯТ

© 2021 г. Д. А. Карпов<sup>а, b, \*</sup>, А. Г. Иванов<sup>а, b</sup>, А. И. Лившиц<sup>с</sup>, А. Н. Драничников<sup>d</sup>

<sup>а</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия <sup>b</sup> Частное учреждение "Проектный иентр ИТЭР", Москва, Россия

<sup>с</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

<sup>d</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*\*e-mail: karpov@niiefa.spb.su* Поступила в редакцию 02.07.2021 г.

После доработки 30.07.2021 г. Принята к публикации 30.07.2021 г.

Представлены расчеты и разработка системы вакуумной откачки термоядерной установки TRT на основе серийно выпускаемых промышленностью турбомолекулярных насосов и на основе крионасосов, аналогичных крионасосам ИТЭР. Обсуждаются преимущества и проблемные моменты, связанные с использованием турбомолекулярных и крионасосов, предложены варианты конструктивных решений. Рассмотрена возможность разработки и испытаний в TRT системы селективного выделения изотопов водорода с помощью сверхпроницаемых мембран.

*Ключевые слова:* токамак с реакторными технологиями, система вакуумной откачки, турбомолекулярный насос, крионасос

DOI: 10.31857/S0367292121120027

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В новой концепции ядерной энергетической системы РФ предлагается организация ее таким образом, чтобы производством электроэнергии полностью занимались реакторы деления, а проблемы наработки нового топлива из сырьевых изотопов решались в бланкете термоядерного реактора [1]. Для решения термоядерной части этой проблемы предназначена разработка и создание токамака с реакторными технологиями (TRT). Система вакуумной откачки и поддержания рабочего давления (СВО), являясь критически важной и одной из наиболее дорогостоящих систем любой термоядерной установки, должна обеспечить получение и поддержание необходимых вакуумных параметров на всех режимах ее эксплуатации.

Основной проблемой для вакуумной откачки и поддержания рабочего давления в термоядерном реакторе является наличие трития: радиоактивного, химически активного и дорогого изотопа водорода с высокой проницаемостью. Недопустима утечка трития через вакуумные насосы в атмосферу. После выведения не вступившего в реакцию синтеза трития из реактора он должен выделяться из газовой смеси и снова вводиться в реактор, обеспечивая рециркуляцию топливной смеси [2]. Органические уплотнения, обеспечи-

вающие герметичность вакуумной системы и средств откачки, крайне нежелательны, так как при взаимодействии с тритием быстро теряют свои функциональные характеристики. На сегодняшний день нет промышленно выпускаемых вакуумных насосов для обеспечения откачки трития. Для каждой термоядерной установки, предназначенной для работы с тритием, проблема его вакуумной откачки и рециклинга решается индивидуально на основе различных специально разрабатываемых откачных средств (крионасосы, геттерные насосы, ртутные насосы и др.), что требует серьезных усилий, много времени и достаточно затратно. Токамак TRT предназначен для отработки физических принципов новой концепции (источник нейтронов для производства топлива для атомных реакторов), на котором предполагается последовательное двухэтапное проведение исследовательских работ: 1) отработка и оптимизация электрофизических режимов установки на протии и дейтерии (без трития), 2) отработка физических принципов с тритием в рабочей газовой смеси. В связи с этим представляется целесообразным рассмотрение двух вариантов системы вакуумной откачки и поддержания рабочего давления TRT: на основе стандартных промышленно выпускаемых вакуумных насосов (для работы без трития на первом этапе) и на основе нестандартных специально разрабатываемых вакуумных насосов (для работы с тритием на втором этапе). Такой подход позволяет сэкономить время и средства на этапе отработки и оптимизации электрофизических режимов TRT.

Данная работа посвящена разработке вакуумной системы TRT. Рассмотрены два варианта ее исполнения: с использованием стандартных промышленно выпускаемых вакуумных насосов (турбомолекулярных насосов) и нестандартных вакуумных насосов (крионасосов), специально разрабатываемых для откачки больших газовых потоков термоядерных установок. Анализируются преимущества и недостатки каждого из этих подходов. При проведении разработки учтен мировой опыт и отработанные технологии создания вакуумных систем крупных термоядерных установок (в первую очередь ИТЭР).

Рассчитаны максимально возможные потоки вводимой излучающей примеси (N, Ne, Ar) для защиты от срывов плазмы и максимальные потоки Не для возможности работы с гелиевой плазмой.

Рассмотрена возможность разработки и испытаний в TRT системы селективного выделения изотопов водорода с помощью сверхпроницаемых мембран. Применение этого метода может позволить отделить от примесей и вернуть в рабочую плазму ~90% не вступившей в реакцию топливной смеси.

### 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРТ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ И ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ

Были взяты следующие основные параметры:

Объем вакуумной камеры с	$V = 112 \text{ m}^3$
патруоками	
Температура вакуумной	$T = 30^{\circ}\mathrm{C}$
камеры в режиме импульса	
Температура	$T_0 = 170^{\circ} \text{C}$
обезгаживающего прогрева	
Требуемое остаточное	$P = 1 \times 10^{-5}  \Pi a$
давление	
Давление газа в рабочем	210 Па
режиме в области дивертора	
Полный поток частиц (Н)	1.5 × 10 <sup>22</sup> част/с
из плазменного шнура	
Полный поток частиц для	$7.5 \times 10^{21} (28.3 \text{ m}^3 \Pi a/c)$
молекулярного дейтерия	
Поток гелия, част/с	$5 \times 10^{20} (1.89 \text{ м}^3 \Pi a/c)$
Поток гелия в случае	$1.5 \times 10^{22} (56.6 \text{ m}^3 \Pi a/c)$
гелиевой плазмы, част/с	· · · ·
Поток излучающей примеси	макс. возможный
(N, Ne, Ar), част/с	
Длительность плато тока	до 100 с

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

Можно выделить четыре основных режима работы системы вакуумной откачки.

1. Форвакуумная откачка (камеры и криостата).

2. Высоковакуумная откачка с прогревом.

3. Высоковакуумная откачка до предельного давления.

4. Рабочий режим.

В расчетах учтены газовые потоки теплового газовыделения из конструкционных материалов и потоки в рабочем режиме из плазмы разряда. Потоками через течи и неплотности пренебрегается.

Величины удельного газовыделения для использующихся в TRT материалов взяты из [3-6]. В общем случае изменение удельного газовыделения  $q_{tg}$  представлялось в виде

$$q_{\rm tg} = q_{\rm l} t^{-a}, \, \mathrm{M}^3 \cdot \mathrm{\Pi a}/(\mathrm{c} \cdot \mathrm{M}^2),$$

где  $q_1$  — газовыделение после откачки в течение 1 часа, t — время откачки, час,  $\alpha$  — показатель степени.

Поток теплового газовыделения  $Q_{tg}$ 

$$Q_{\rm tg} = q_{\rm tg} F$$
,  $M^3 \cdot \Pi a/c$ .

В случае отсутствия данных по удельному газовыделению материалов при заданной температуре, величины удельного газовыделения линейно интерполировались. Так как установки подобного масштаба откачиваются с прогревом в течение нескольких (многих) рабочих смен, поток газовыделения из материалов определяется, в основном, десорбцией водорода.

Температура дивертора в рабочем режиме находится в диапазоне от 30 до  $1500^{\circ}$ С. Температура стенок вакуумной камеры в рабочем режиме поддерживается равной  $30^{\circ}$ С. Поскольку коэффициент аккомодации газа на стенках близок к единице, температура газа *T* в рабочем режиме принята равной  $30^{\circ}$ С.

Рассчитанные потоки тепловой десорбции в различных режимах откачки представлены в табл. 1.

В рабочем режиме поток тепловой десорбции много меньше потока частиц из плазмы.

### 3. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА СВО TRT

Вакуумная камера установки TRT комплектуется 16 диверторными патрубками для загрузки и обслуживания диверторов (рис. 1). Эти патрубки имеют трапецеидальное сечение с размерами меньшего и большего оснований 310/520 мм и высотой 750 мм. Их предполагается использовать для вакуумной откачки. При этом каждая из ди-



**Рис. 1.** Компоновка вакуумной камеры ТРТ (1/4 сегмента).

верторных кассет снабжена отверстиями для откачки газа из вакуумной камеры установки.

На рис. 2 показано расположение дивертора в вакуумной камере и диверторный патрубок, на рис. 3 – схема расчета проводимости каналов от-качки.

Нейтральный газ, попадая в отверстия с проводимостью  $U_1$  и  $U_2$ , проходит через них и попадает в полость между дивертором и вакуумной камерой. Далее газ меняет направление движения на радиальное и проходит канал сложной формы с проводимостью  $U_3$  до радиуса (2515 мм), на котором начинается входное отверстие в диверторный патрубок (рис. 3). Попадая в диверторный патрубок протяженностью 2600 мм с проводимостью  $U_4$ , газ проходит по нему до торцевой крышки в область стыковки патрубка с криостатом (на рис. 2 в этом месте изображен сильфон). Из-за необходимости обслуживания дивертора расположить насосы на торцевой крышке невозможно. необходим дополнительный отводящий патрубок. На выходе из диверторного патрубка газ поворачивает, попадая в отводящий патрубок с проводимостью  $U_{\text{tube.n}}$ , размеры которого зависят от использующегося насоса и места его установки. На выходе отводящего патрубка располагается высоковакуумный затвор с проводимостью Ugate соответствующего сечения, к которому присоединяется высоковакуумный насос. После выхода из высоковакуумного насоса газ попадает в форвакуумную кольцевую магистраль, смонтированную вокруг криостата, проходит через насосы форвакуумной откачки и направляется в систему фильтрации топливного цикла установки TRT.

Для выбора вакуумных насосов, обеспечивающих требуемое давление на всех режимах работы TRT, требуется определить проводимость газового тракта. В зависимости от концентрации газа и характерных размеров трубопровода газ может течь в вязкостном, переходном и молекулярном режимах. Так как в молекулярном режиме проводимость трубопровода меньше, чем в вязкостном, для оценки сверху вакуумные расчеты проводились в молекулярном режиме. При известной проводимости трубопровода эффективная быстрота откачки  $S_{\rm eff}$  определяется через основное уравнение вакуумной техники

$$S_{\rm eff} = \frac{S_{\rm n}U}{S_{\rm n}+U},$$

где  $S_n$  — номинальная быстрота действия насоса (насосов), U — проводимость трубопровода.

Рабочий режим			Режим высоковакуумной откачки при выходе на предельное давление			Режим высоковакуумной откачки при прогреве		
материал	площадь, м <sup>2</sup>	темпе- ратура, °С	материал	площадь, м <sup>2</sup>	темпе- ратура, °С	материал	площадь, м <sup>2</sup>	темпе- ратура, °С
Вольфрам	3.1	1500	Вольфрам	31	30	Вольфрам	31	170
Вольфрам	27.9	300						
316(LN)	60	300	Сталь	1060	30	Сталь	1060	170
316(LN)	999.9	50	(316(LN))			(316(LN))		
Бериллий	10.7	380	Бериллий	107	30	Бериллий	107	170
Бериллий	96.3	200	(TGP-			(TGP-		
			56FW)			56FW)		
Суммарный поток газовыделения по режимам								
$Q_{ m tg.work}$	м <sup>3</sup> · Па/с	$1.41 \times 10^{-4}$	$Q_{ m ult}$	м <sup>3</sup> · Па/с	$5.61 \times 10^{-5}$	$Q_{ m tg}$	м <sup>3</sup> · Па/с	$1.42 \times 10^{-3}$

Таблица 1. Потоки тепловой десорбции в различных режимах работы ТРТ



**Рис. 2.** Расположение дивертора в вакуумной камере и диверторного патрубка для вакуумной откачки (при выходе патрубка из криостата предусмотрена сильфонная развязка).

### 4. СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТРТ НА ОСНОВЕ ТМН

Достоинствами ТМН являются простота, надежность, отсутствие необходимости сервисного обслуживания. Современные ТМН могут быть расположены в произвольной ориентации и иметь широкий диапазон рабочих давлений с максимумом вплоть до 50 Па. Однако эти насосы могут эксплуатироваться в магнитных полях с индукцией не более 3–7 мТл. То есть для работы в ТRT в случае установки их на выходе диверторных патрубков требуется надежная экранировка, защищающая насосы от магнитных полей рассеяния, а также от магнитных полей, создаваемых при срывах плазмы. В Приложении 1 приведены вакуумные расчеты проводимостей газового тракта, эффективной быстроты откачки для поддержания



Рис. 3. Схема расчета проводимости каналов откачки.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

рабочего давления в диверторе и количество необходимых насосов для варианта откачки стандартными промышленно выпускаемыми турбомолекулярными насосами (ТМН) при их надежной экранировке от магнитного поля. Также рассчитано время откачки до предельного остаточного давления с требуемым прогревом.

Возможен также вариант удаленного от TRT размещения турбомолекулярных насосов с приемлемой для их эксплуатации величиной магнитных полей рассеяния. Вакуумные расчеты этого варианта исполнения СВО приведены в Приложении 1.

### Результаты расчетов

Для СВО на основе ТМН наиболее эффективен насос Pfeiffer ATP 2300 М. Этот насос спроектирован для работы с большими потоками легких газов с высокой степенью сжатия по водороду и номинальной скоростью откачки по водороду 1.7 м<sup>3</sup>/с. В варианте установки насосов на выходе диверторных патрубков (в непосредственной близости от криостата) откачку требуемых газовых потоков и поддержание рабочего давления в области ливертора в диапазоне 2-10 Па обеспечат 24 ТМН, установленных попарно на 12 патрубках. Эффективная скорость откачки на входе в дивертор варьируется контроллерами блоков питания ТМН от 3.4 до 17.2  ${\rm m}^3/{\rm c}$  на высоком вакууме и от 1.94 до 9.69 м<sup>3</sup>/с при работе с плазменным шнуром. После 100 ч (4.2 сут) прогрева насосы обеспечивают предельное давление в вакуумной камере 3.73 × 10<sup>-6</sup> Па. Максимально возможный поток излучающей примеси (азот) оценен равным  $Q_{\rm N_2} = 3.75 \times 10^{21}$  част/с (1/4 $Q_{\rm D}$ ) или 14.2 м<sup>3</sup>Па/с



**Рис. 4.** Компоновка СВО ТРТ на основе 32 ТМН (красным пунктиром выделены возможные места расположения СПМ).

при давлении в диверторе ~8 Па. Откачку требующегося потока гелия  $1.5 \times 10^{22}$  част/с (56.6 м<sup>3</sup> Па/с) при работе с чисто гелиевой рабочей смесью эти насосы обеспечивают при давлении в диверторе ~9.8 Па. Это значение давления близко к пороговому рабочему давлению, поэтому работа с таким потоком гелия не может быть рекомендована. Оптимальной представляется работа с гелием при поддержании давления в диверторе TRT не более 7 Па. Это давление обеспечивается 24 ТМН (при давлении в насосах 4.2 Па) при потоке гелия 1.1 × ×  $10^{22}$  част/с (3/4 от максимального потока изотопов водорода из плазмы), которое и следует принять максимально возможным при работе с гелиевой плазмой.

Возможен вариант использования ТМН без магнитных экранов. В этом случае они должны быть удалены от оси установки на ~16 м с помощью дополнительных патрубков. При использовании дополнительных патрубков длиной ~10 м и диаметром ~250 мм необходимое число насосов для обеспечения вакуумных параметров увеличивается до 32 (по два на каждом из 16 патрубков) за счет уменьшения проводимости откачных каналов. Эффективная скорость откачки на входе в дивертор в этом случае 2.58-12.9 м<sup>3</sup>/с на высоком вакууме и 1.97-9.84 м<sup>3</sup>/с при работе с плазменным шнуром. После 100 ч откачки с прогревом и последующего охлаждения до комнатной температуры насосы обеспечивают предельное давление в вакуумной камере ТРТ 5.2 × 10<sup>-6</sup> Па. Максимально возможный поток излучающей примеси (азот) оценен в этом случае равным  $Q_{\rm N_2} = 5.2 \times 10^{21}$  част/с (0.35 $Q_{\rm D}$ ) или 19.8 м<sup>3</sup> Па/с при давлении в диверторе ~7.6 Па. При работе с чисто гелиевой плазмой максимальный поток гелия оценен

равным  $1.1 \times 10^{22}$  част/с (3/4 от максимального потока изотопов водорода из плазмы) при давлении на входе в дивертор 6.1 Па.

Компоновка СВО на основе 32 ТМН представлена на рис. 4.

### 5. СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТРТ НА ОСНОВЕ КРИОНАСОСОВ

В качестве альтернативы турбомолекулярным рассмотрим систему вакуумной откачки на основе криооткачки. Крионасосы, работающие по циклу Гиффорда-Макмагона, которые широко выпускаются промышленностью, невозможно использовать из-за слишком низкой хладопроизводительности, а также слишком высокой минимальной температуры криопанелей таких машин 10-15 К, чего не хватает для уверенной откачки гелия. Коэффициент прилипания гелия к активированному углю на криопанелях зависит от их температуры и при снижении ее с 12 до 5 К меняется на порядок от 0.03 до 0.35. С этой точки зрения логичнее рассматривать систему с криопанелями, охлаждаемыми потоком жидкого или газообразного (при температуре ~5 К) гелия, как это сделано в крионасосах вакуумной откачки ИТЭР, где криосорбция газов на поверхности криопанелей с приклеенным к ним сорбентом из кокосового угля осуществляется при температуре 4.5 К. В ИТЭР предполагается работа шести крионасосов, попеременно работающих/регенерирующихся так, что в рабочем режиме четыре насоса всегда откачивают камеру. В каждом насосе находится 11.2 м<sup>2</sup> поверхности криопанелей с наклеенным углем, охлаждающиеся потоком сверхкритического гелия до температуры 4.5 К [7]. Криопанели окружены тепловым экраном темпе-

	-	<b>`</b>	~					
Таолина 2.	(	сновные т	гребования	к	системам	Bakv	<b>МИНОИ</b>	откачки
	~	•	peccondition.			Deerly	,	0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

		TPT $D_2$ (He)		
	ИТЭР	дейтериевая	гелиевая	
		плазма	плазма	
Длительность плато тока, с	3000	100		
Пауза, с	1000	—		
Максимальный поток частиц (молекул и атомов одноатомных газов)	153	33.02 (50)	45.3	
в СВО, м <sup>3</sup> · Па/с				
Максимальный поток гелия, м <sup>3</sup> · Па/с	60	1.89	42.5	
Поток (максимальный поток) излучающей примеси, м <sup>3</sup> · Па/с	10	2.83 (19.8)	2.83	
Максимальный поток примесей, м <sup>3</sup> · Па/с	13	_		
Рабочее давление, Па	1-10	2-10	0	
Предельное давление по изотопам водорода, Па	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10$	-5	
Предельное давление между импульсами, Па	$5 \times 10^{-4}$	_		

ратурой 80 К, охлаждающимся потоком газообразного гелия. Основные требования к системам вакуумной откачки камер ИТЭР и ТРТ приведены в табл. 2 [8]. Очевидным различием является значительно меньшая длительность плато тока, в три раза меньший максимальный поток частиц из плазмы в дивертор, а также работа ИТЭР со значительными потоками трития. Удельные скорости откачки  $s_{0i}$  криопанелей ИТЭР [9] по основным откачиваемым газам представлены в табл. 3.

Следует также отметить, что разработка крионасоса — отдельная достаточно сложная задача, которая при выборе системы вакуумной откачки на основе криопанелей потребует проведения соответствующего НИОКР. Оценочные расчеты такой системы с использованием удельных характеристик вакуумной системы ИТЭР приведены в Приложении 2.

### Результаты расчетов

При диаметре условного прохода крионасосов 400 мм, площади криопанелей в каждом насосе 2 м<sup>2</sup> и температуре 4.5 К необходимо шесть крионасосов (четыре работающих и два на регенерации). При работе с дейтериевой плазмой и макси-

Таблица 3. Удельные скорости откачки криопанелей ИТЭР [9]

$s_{0H_2}, M^3/(c \cdot M^2)$	6.92	$s_{0H_{2}O}, M^{3}/(c \cdot M^{2})^{*}$	2.89
$s_{0\rm He},  {\rm m}^3/({\rm c} \cdot {\rm m}^2)$	4.61	$s_{0N_2}, m^3/(c \cdot m^2)$	1.88
$s_{0D_2}, M^3/(c \cdot M^2)$	4.91	$s_{0Ne}, M^3/(c \cdot M^2)$	1.95
$s_{0T_2},  \mathrm{M}^3/(\mathrm{c} \cdot \mathrm{M}^2)$	4.04	$s_{0Ar},  M^3/(c \cdot M^2)$	2.21

\*С учетом того, что пары воды откачиваются экраном 80 К.

мальным потоком излучающей примеси четыре насоса способны поддерживать откачку и обеспечение рабочих вакуумных параметров в течение всего импульса 100 с. При частичной регенерации в паузах между импульсами длительностью ~1200 с возможна одновременная работа всех шести крионасосов. Полная регенерация насосов может производиться в более продолжительных (>20 мин) перерывах между импульсами. Система обеспечивает эффективную скорость откачки по дейтерию на входе в дивертор 9.9 м<sup>3</sup>/с. При высоковакуумной откачке с прогревом в течение 100 ч и последующего охлаждения до комнатной температуры обеспечивается предельное давление 4.0 × 10<sup>-6</sup> Па. Криопанели с приклеенным активированным (кокосовым) углем должны охлаждаться потоком сверхкритического гелия при температуре 4.5 К. Расчетная требуемая хладопроизводительность: на температурном уровне 4.5 К-581 Вт, на температурном уровне 80 К-13.0 кВт. За время откачки в течение рабочего импульса (100 с) максимальных потоков рабочей смеси масса сорбированного четырьмя крионасосами дейтерия составит ~5 г.

Максимальный поток излучающей примеси (азот) составляет  $Q_{N_2} = 3.75 \times 10^{21}$  част/с (1/4 $Q_D$ ) или 14.2 м<sup>3</sup>Па/с при давлении в диверторе 6.8 Па. В случае работы с чисто гелиевой плазмой с потоком равным 3/4 от максимального потока дейтерия из плазмы (1.1 × 10<sup>22</sup> част/с) четыре крионасоса обеспечивают на входе в дивертор давление 5.1 Па.

Емкость крионасоса по дейтерию ограничена только требованиями безопасности [8, 9], технически она не ограничена, так как откачка дейтерия происходит за счет десублимации.



Рис. 5. Компоновка СВО ТРТ на основе шести крионасосов.

Компоновка СВО на основе шести крионасосов представлена на рис. 5.

Другая возможность состоит в использовании криогенных насосов, разрабатываемых в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) для инжекторов нейтральных пучков водорода и дейтерия [10]. В разработанных вакуумных системах инжекторов используются заливные крионасосы, либо крионасосы, работающие по циклу Гиффорда-Макмагона, снабженные криоголовками фирмы Sumitomo, обладающих в обоих случаях низкой величиной рабочего давления ~1.33 × 10<sup>-2</sup> Па. В заливных насосах рабочая температура конденсирующей поверхности поддерживается на уровне от 4.2 до 2.5 К, и при площади криопанелей ~8 м<sup>2</sup> достигается скорость откачки ~ $0.62 \times 10^3$  м<sup>3</sup>/с. Для откачки максимальных газовых потоков в TRT крионасосы, работающие по циклу Гиффорда-Макмагона, обладают недостаточной хладопроизводительностью и высокой температурой конденсирующей поверхности ~10 К для уверенной откачки гелия, требующей также использования криопанелей с наклеенным углем. Для заливных насосов откачка указанных в табл. 2 потоков гелия с учетом его коэффициента прилипания при температуре поверхности 4.5 К (0.35) возможна при увеличении площади криопанелей примерно до 30 м<sup>2</sup>. Существенно снизить площадь поверхности криопанелей возможно при уменьшении их температуры до ~2.5 К. В условиях TRT для

обеспечения бесперебойной работы при максимальных газовых нагрузках потребуется модернизация заливных крионасосов в прокачные и обеспечение более высокой величины их рабочего давления.

### 6. СЕЛЕКТИВНАЯ ОТКАЧКА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ТRT С ПОМОЩЬЮ СВЕРХПРОНИЦАЕМЫХ МЕМБРАН (СПМ)

Металлические мембраны макроскопической толщины могут быть сверхпроницаемыми для водородных частиц, если их энергия (кинетическая, химическая или внутренняя) превышает ~1 эВ [11]. Это означает, что практически вся та часть падающего потока надтепловых водородных частиц, которая не отражается от поверхности, проходит сквозь мембрану независимо от ее толщины и температуры. В случае атомов водорода с тепловыми скоростями (они по сравнению с молекулами имеют избыточную химическую энергию 2.25 эВ) эта часть составляет ~20% [12, 13], а в случае более энергетичных водородных частиц (например, ускоренных ионов) эта доля близка к единице, и, таким образом, проницаемость металлической мембраны приближается к мыслимому пределу – проницаемости отверстия в тонкой стенке той же площади.

СПМ практически непроницаемы для любых других газов, включая He, а также для обычных тепловых молекул водорода (H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>).

СПМ способны автоматически сжимать проникающий водород на порядки величины.

Важным преимуществом СПМ является ее полная совместимость с тритием (отсутствие движущихся частей, требующих смазки, отсутствие органических жидкостей и т.п.). Работа СПМ с тритием проверялась экспериментально специально для демонстрации возможности применения таких мембранных технологий в ТЯР [14].

Откачка энергетичных водородных частиц (нейтралов) с помощью СПМ непосредственно в области рабочей и диверторной плазмы может быть применена для управления потоками частиц (particle control) и, соответственно, режимами работы термоядерной установки [15, 16]. Другое направление применений СПМ – откачка, компрессия и отделение D/T-смеси от Не в топливном цикле ТЯР. Здесь СПМ открывают возможность короткоциклового (т. е. непосредственно за дивертором) отделения D/T-смеси от He и ее автоматического возвращения обратно в рабочую плазму, минуя тритиевый завод [17–19]. Такая схема, известная также как "прямой внутренний рециклинг" (direct internal recycling) [19], предлагалась для ИТЭРа [17, 18] в качестве альтернативы варианту рециклинга D/T с помощью криогенной откачки, который был предпочтен и осуществляется в настоящее время. Однако для пост ИТЭРовских ТЯР, в которых планируемый расход трития существенно выше (например, в ДЕМО – на порядок), чисто криогенное решение невозможно из-за неприемлемого накопления трития. Соответственно, предлагается большую часть D/T-смеси (например, 80% в ДЕМО [19]) отделять от Не и рециркулировать с помощью СПМ, расположенной непосредственно за дивертором [18, 19].

В идеальном случае СПМ, расположенная в непосредственной близости от дивертора, могла бы откачивать надтепловые водородные частицы (энергетические нейтралы), поступающие прямо из дивертора [15, 16]. В этом случае рециклинг D/T с помощью СПМ не требует каких-либо существенных дополнительных устройств и затрат энергии. Однако ближайшее поколение ТЯР (включая TRT) будет еще представлено экспериментальными установками, и режимы работы дивертора в них будут варьироваться. Соответственно, дивертор не может служить пока единственным источником надтеплового водорода, обеспечивающего работу СПМ и предполагается установка второй, более удаленной СПМ, обеспеченной собственным генератором надтеплового водорода [18, 19]. Таким генератором может служить, например, горячая металлическая поверхность ("атомизатор"), на которой происходит диссоциация молекул D<sub>2</sub> и T<sub>2</sub> на атомы [14, 17,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

20, 21] либо холодная водородная плазма [18, 22, 23].

Проект TRT, одной из основных целей которого является испытание инновационных технических решений [24], представляется особенно удобным для апробации новых технологий в топливном цикле, поскольку переход к полномасштабной работе с тритием планируется в несколько этапов: сначала – только  $D_2$ , затем –  $D_2$  + 1%  $T_2$  и лишь на третьем этапе 50%  $D_2$  + 50%  $T_2$ . Соответственно, предоставляется возможность испытания и поэтапного развития технологии СПМ в условиях термоядерной установки при отсутствии неоправданных рисков.

В качестве первого этапа этой работы рассматривается вариант установки СПМ-насоса в откачной тракт одного из 32 удаленных ТМН (на рис. 4 показано возможное место расположения СПМ-насоса). СПМ-насос будет в этом случае удалять водород из газового потока, проходящего в ТМН, который будет откачивать остатки водорода и все примеси, включая Не (предполагается, что присутствие СПМ-насоса не приведет к заметному снижению проводимости откачного тракта между ТМН и дивертором (рис. 4)).

Если для откачки планируемого в TRT потока D<sub>2</sub>, приходящегося на один из 32 откачных патрубков ( $2.4 \times 10^{20} \text{ D}_2/\text{c}$ ), взять СПМ-насос с мембраной площадью ~3 м<sup>2</sup>, сопряженной с атомизатором площадью ~0.6 м<sup>2</sup>, то оценка масштаба величины скорости откачки D2 дает несколько десятков м<sup>3</sup>/с. Такой СПМ-насос позволит откачать, компримировать и отправить обратно в рабочую плазму порядка 90% потока D<sub>2</sub>, продемонстрировав таким образом прямой внутренний рециклинг. Приведенная оценка сделана в предположении кнудсеновского режима течения и отсутствия перепада давления внутри СПМ-насоса. Для более точного расчета, возможно, потребуется учет вязкостного и переходного режимов течения газовой смеси, а также роли газовой проводимости в конкретной геометрии СПМ-насоса.

Отметим также, что в процессе этих исследований может быть рассмотрен вариант и более глубокого извлечения изотопов водорода из выхлопной смеси с целью более радикального снижения водородной (тритиевой) нагрузки на ТМН (или любой другой насос, предназначенный для откачки Не и других примесей, например, упомянутый выше криогенный или ртутный [19] насосы).

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система вакуумной откачки и поддержания рабочего давления термоядерной установки TRT. Рассмотрены и рассчитаны два

варианта исполнения системы вакуумной откачки: с использованием стандартных промышленно выпускаемых турбомолекулярных насосов и нестандартных крионасосов, подлежащих последующей разработке и изготовлению (аналогичных крионасосам ИТЭР).

Система вакуумной откачки на базе промышленных турбомолекулярных насосов привлекательна тем, что не требует затрат на НИОКР. Все вакуумное оборудование в этом варианте исполнения является промышленно выпускаемым и доступным, что приводит к существенному снижению затрат как средств, так и времени. На этапе отработки и оптимизации электрофизических режимов установки на протии и дейтерии этот вариант представляется оптимальным.

В случае откачки на основе крионасосов вакуумная система состоит из шести крионасосов с  $2 \text{ м}^2$  криопанелей в каждом. При работе с дейтериевой плазмой и максимальным потоком излучающей примеси четыре насоса способны откачивать камеру весь импульс и выходить на частичную регенерацию после импульса в 100 с, в этом случае возможна одновременная работа во время импульса и всех шести крионасосов. Полная регенерация насосов производится в более продолжительных (>20 мин) перерывах между импульсами работы плазмы TRT.

В пользу системы вакуумной откачки на основе крионасосов говорит то, что в случае использования низкотемпературных сверхпроводящих катушек полоидального и тороидального магнитных полей, TRT будет снабжен криокомплексом, и добавочная хладопроизводительность для системы вакуумной откачки не потребует неоправданных капитальных затрат.

Рассмотрена возможность разработки и испытаний в TRT системы селективного выделения изотопов водорода с помощью сверхпроницаемых мембран. Положительный результат таких испытаний в TRT даст возможность осуществить в термоядерных устройствах прямой внутренний рециклинг рабочей топливной смеси, позволяющий существенно снизить накопление трития и уменьшить тритиевую нагрузку на все системы топливного цикла, включая вакуумные насосы.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ TRT НА ОСНОВЕ ТМН

Рассмотрим CBO камеры TRT на основе TMH Pfeiffer ATP 2300 M с номинальной быстротой откачки по водороду равной 1.7 м<sup>3</sup>/с (по дейтерию и гелию 2.05 м<sup>3</sup>/с). Данные TMH спроектированы для откачки больших потоков легких газов (максимальный поток по водороду и гелию более 5.07 м<sup>3</sup> Па/с) и могут быть произвольно ориентированы.

Для расчета вакуумной откачки необходимо определить сопротивление потоку газа, оказываемое трубопроводом, соединяющим насос с откачиваемым объемом. Схематично газовый тракт можно представить как три объема: объем насоса *V*<sub>3</sub> с номинальной скоростью откачки на входном сечении  $S_n$  с давлением  $P_n$ ; объем между дивертором и вакуумной камерой  $V_2$  с давлением  $P_2$ ; объем вакуумной камеры токамака на входе в дивертор  $V_1$  с давлением газа  $P_1$ . Данные объемы соединены трубопроводами с определенными проводимостями (рис. 6). Нейтральный газ из объема  $V_1$ , попадая в отверстия дивертора (в рассматриваемом случае дивертор состоит из 54 кассет) с проводимостью U<sub>1</sub> и U<sub>2</sub> (площадями поперечного сечения 49.3 см<sup>2</sup> и 109.2 см<sup>2</sup>), проходит через них и попадает в полость  $V_2$  между дивертором и вакуумной камерой. Далее газ меняет направление движения на радиальное и проходит канал сложной формы проводимостью U<sub>3</sub> до радиуса (2515 мм), на котором начинается входное отверстие в диверторный патрубок. Попадая в диверторный патрубок протяженностью 2600 мм с проводимостью  $U_4$ , газ проходит по нему до торцевой крышки в область стыковки патрубка с криостатом. Диверторный патрубок имеет трапецеидальное сечение с размерами меньшего и большего оснований 310/520 мм и высотой 750 мм. Из-за необходимости обслуживания дивертора расположить насосы на торцевой крышке невозможно, необходим дополнительный отводящий патрубок. На выходе из диверторного патрубка газ поворачивает, попадая в отводящий патрубок проводимостью  $U_{\text{tube.n}}$ , проводимость которого при выбранном проходном диаметре насоса зависит от места его установки. Из-за меньшей площади сечения отводящего патрубка требуется учесть проводимость отверстия  $U_{\text{hole.n}}$ . На выходе отводящего патрубка располагается высоковакуумный затвор проводимостью  $U_{\text{gate}}$  за которым находится насос. После выхода из высоковакуумного насоса газ попадает в форвакуумную кольцевую магистраль, смонтированную вокруг криостата, проходит через насосы форвакуумной откачки и направляется в систему фильтрации топливного цикла установки TRT.

Трубопроводы откачки газа установки TRT имеют различные характерные размеры, и при откачке газов могут возникать локальные изменения режимов откачки. При работе установки на обезгаживающем прогреве и достижении предельного вакуума реализуется молекулярный режим течения газа (при критерии Кнудсена Kn > 10). В рабочем режиме реализуется вязкостный и переходный режимы течения газа. В отверстиях



Рис. 6. Схема газового тракта СВО при установке двух ТМН на каждом из *N* диверторных патрубках.

дивертора протий при температуре 303 К течет в вязкостном режиме при давлении 1.5 Па и выше. Для характерных размеров диверторного патрубка вязкостный режим реализуется уже при 0.5 Па. Однако в связи с тем, что в молекулярном режиме проводимость трубопровода меньше, чем в вязкостном, для оценки давления сверху расчет рабочего режима выполнен в молекулярном режиме.

При расчете проводимостей трубопроводов использовался метод сосредоточенных параметров. Общее сопротивление  $W_{tot}$  трубопровода, соединяющего насос с вакуумной камерой [2, 6]

$$W_{tot} = \frac{1}{U_{tot}} = \sum \frac{1}{U_{tube}} + \sum \frac{1}{U_{hole}},$$

где  $U_{tube}$  — проводимость трубопровода;  $U_{hole}$  — проводимость входного отверстия трубопровода.

В случае сложного трубопровода необходимо учитывать  $1/U_{hole} = W_{hole}$  во всех сечениях, где имеет место сужение потока. В общем случае проводимость отверстия [6]

$$U_{hole} = \frac{3.64A (T/M)^{0.5}}{1 - A/A_0}, \, \pi/c.$$

где A — площадь отверстия, см<sup>2</sup>;  $A_0$  — площадь сосуда, из которого истекает газ, см<sup>2</sup>; T — температура газа, К; M — молярная масса газа, а. е. м. В случае если  $A_0 \ge A$  проводимость отверстия рассчитывают по формуле

$$U_{hole} = 3.64 A \left(\frac{T}{M}\right)^{0.5}, \, \pi/c.$$

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

Проводимость коротких трубопроводов рассчитывалась из уравнения

$$U_{tube} = 3.64 A \left(\frac{T}{M}\right)^{0.5} K \left(\frac{l}{d}\right), \ \pi/c,$$

где K — коэффициент Клаузинга, зависящий от отношения длины трубопровода l к его диаметру d.

Проводимость трубопроводов сложного сечения рассчитывалась по формуле Кнудсена для трубопроводов переменного сечения

$$U_{tube} = 19.4 \frac{\sqrt{T/M}}{\int_{0}^{l} B/A^{2} dl}, \ \pi/c$$

где B – периметр поперечного сечения, см; A – площадь поперечного сечения трубопровода, см<sup>2</sup>.

В простейшем случае при известной проводимости трубопровода суммарная эффективная быстрота откачки  $S_{eff.i.sum}$  определяется через основное уравнение вакуумной техники

$$S_{eff.i.sum} = \frac{S_n U}{S_n + U} n_s$$

где  $S_n$  — номинальная быстрота действия насоса (насосов); U — проводимость трубопровода; n — количество насосов.

Для определения необходимого количества насосов для откачки камеры TRT требуется определить положение рабочей точки насоса в рабочем режиме в зависимости от газовой нагрузки, приходящейся на один насос. При этом, чем меньше газовая нагрузка и, соответственно давление в объеме насоса, тем больше номинальная скорость откачки насоса и коэффициент его использования. На рис. 7а показана зависимость



**Рис.** 7. Зависимость номинальной скорости откачки выбранного ТМН от давления (а); положение рабочей точки в зависимости от числа ТМН (б):  $S_n(P)$ \_Pfeiffer – зависимость номинальной скорости откачки ТМН от давления в области рабочих давлений;  $S(P)_n24$  – газовая нагрузка 1.38 м<sup>3</sup> · Па/с при 24 ТМН;  $S(P)_n16$  – газовая нагрузка 2.07 м<sup>3</sup> · Па/с при 16 ТМН;  $S(P)_n32$  – газовая нагрузка 1.03 м<sup>3</sup> · Па/с при 32 ТМН.

номинальной скорости откачки по различным газам от давления в насосе. На рис. 76 показано положение рабочей точки ТМН (на месте пересечения характеристики насоса и газовой нагрузки) в зависимости от газовой нагрузки (протий), приходящейся на один насос для СВО с разным их количеством.

Система из 16 ТМН работает при давлении в насосах 7 Па, что близко к максимальному допустимому давлению в диверторе. Давление в насосах для систем на основе 32 и 24 ТМН равно 1.4 Па и 2.3 Па соответственно. При не слишком большой разнице в давлении 24 ТМН можно разместить на 12 диверторных патрубках по два насоса на каждом. При этом свободными останутся четыре не задействованных под откачку диверторных патрубка. Проводимость диверторного патрубка от пространства V<sub>2</sub> под дивертором до отводящего патрубка насоса настолько велика, что размещение вместо одного двух насосов на одном диверторном патрубке не уменьшает значительно их коэффициент использования. Рассмотрим более подробно систему из 24 насосов,

расположенных по два на 12 диверторных патрубках. Она обеспечивает давление в насосах при максимальном газовом потоке дейтерия на уровне 2.3 Па, при потоке примесей равном 1/20 от потока дейтерия из плазмы.

### Расчет СВО на основе 24 экранированных от магнитного поля ТМН

Оценим предельное остаточное давление после прогрева СВО, состояшей из 24 ТМН. Для этого требуется определить все сопротивления трубопроводов согласно схеме (рис. 6). При условии экранировки минимальная эффективная длина отводящего патрубка с учетом поворота потока и конструктивных ограничений составит 2600 мм при его диаметре 250 мм. При выбранных диаметре и длине отводящего трубопровода определится его проводимость U<sub>tube.n</sub>. При известном количестве насосов *п* и использующихся под откачку диверторных патрубков (N = 12 шт.) можно рассчитать проводимость газового тракта  $U_{23}$ , соединяющего объемы  $V_2$  и  $V_3$  между дивертором и вакуумными насосами. Проводимость газового тракта, соединяющего объем  $V_1$  на входе в дивертор, и объем  $V_2$  под дивертором определяется конструкцией кассет дивертора и их количеством (54 шт.). Характеристики СВО на основе 24 ТМН, расположенных на 12 диверторных патрубках при высоковакуумной откачке при выходе на предельное давление представлены в табл. 4.

При высоковакуумном прогреве (и повышенном потоке теплового газовыделения 1.42 ×  $\times 10^{-3}$  м<sup>3</sup> Па/с) проводимости для различных газов изменятся в соответствии с изменениями в множителе (T/M)<sup>0.5</sup>. Давление в камере TRT при 100-часовом высоковакуумном прогреве 24 TMH составит 8.37 × 10<sup>-5</sup> Па.

Несмотря на опасения, проводимости отверстий дивертора (49.3 см<sup>2</sup> и 109.2 см<sup>2</sup>) и зазора между нижней частью дивертора и вакуумной камерой (170 мм) достаточны для вакуумной откачки TRT. Основное сопротивление молекулярному потоку оказывает отводящий патрубок соответствующего TMH диаметра ( $U_{tube.n} = 2.49 \text{ м}^3/\text{с}$  по протию при 303 K).

Расчетные параметры откачки для случая, когда рабочая смесь полностью состоит из дейтерия, приведены в табл. 5. В этой таблице справа приведены значения для случая при максимальном потоке излучающей примеси, а слева при потоке  $1/20 Q_{D2}$  изначально заданном техническим заданием.

При потоке излучающей примеси равном  $Q_{\rm N_2} = 3.75 \times 10^{21}$  част/с (1/4  $Q_{\rm D}$ ) или 14.2 м<sup>3</sup> Па/с давление в диверторе составит 7.9 Па, что достаточно близко к максимальному допустимому дав-

**Таблица 4.** Характеристики CBO с классическим дивертором T = 303 K

Т	K	303						
М	а.е.м.	2	4	18	28			
$U_{12}$	м <sup>3</sup> /с	123.5	87.3	41.17	33.01			
			4					
$U_{23}$	м <sup>3</sup> /с	1.63	1.16	0.54	0.44			
Режим 3 – Откачка на предельное давление								
n	шт.	24						
$S_n$	м <sup>3</sup> /с	1.7	2.05	1.95	1.95			
$S_{e\!f\!f\!.1}$	м <sup>3</sup> /с	0.72	0.61	0.34	0.28			
S <sub>eff.1.sum</sub>	м <sup>3</sup> /с	17.21	14.7	8.19	6.80			
			5					
$Q_{ult}$	${\rm M}^3 \cdot \Pi a/c$	$4.88 \times 10^{-5}$	—	$7.29 \times 10^{-6}$	—			
Ku	—	0.42	0.30	0.17	0.15			
P <sub>ult.i</sub>	Па	$2.83 \times 10^{-6}$	0.0	$8.90 \times 10^{-7}$	0.0			
P <sub>ult</sub>	Па	$3.73 \times 10^{-6}$						

 $U_{12}$  – проводимость газового тракта, соединяющего объем  $V_1$  на входе в дивертор и объем  $V_2$  под дивертором, м<sup>3</sup>/с.

 $U_{23}$  – проводимость газового тракта, соединяющего объемы  $V_2$  и  $V_3$  между дивертором и одним вакуумным насосом, м<sup>3</sup>/с.  $S_{eff.1.sum}$  – эффективная скорость откачки камеры ТРТ одним насосом и всеми насосами, соответственно, м<sup>3</sup>/с.  $Q_{ult}$  – поток теплового газовыделения при выходе на пре-

дельное давление, м<sup>3</sup> · Па/с.  $Ku = S_{eff.1}/S_n$  – коэффициент использования насоса.

 $P_{ult,i} = Q_{tg,i} / S_{eff.1}$  – предельное парциальное остаточное давление по *i*-му газу, Па.

 $P_{ult} = \Sigma P_{ult.i}$  — суммарное предельное остаточное давление (после прогрева и остывания камеры до 303 K), Па.

лению 10 Па. Определим данный поток как максимальный поток излучающей примеси для СВО на основе 24 ТМН. В случае чисто гелиевой плазмы при откачке соответствующего исходным требованиям потока гелия давление в камере TRT будет равно 9.8 Па при давлении в объеме ТМН 8.3 Па. Это значение давления близко к пороговому рабочему давлению в TRT. Оптимальной представляется работа с гелием при поддержании давления в камере TRT не более 7-8 Па. Это давление обеспечивается 24 ТМН (при давлении в насосах 4.2 Па) при потоке гелия 1.125 × 10<sup>22</sup> част/с (3/4 от максимального потока изотопов водорода из плазмы). Конфигурация СВО на основе 24 ТМН удовлетворяет требованиям к системе вакуумной откачки и поддержания рабочего давления TRT. Через 100 ч прогрева насосы могут обеспечить предельное давление в камере TRT, равное  $3.7 \times 10^{-6}$  Па.

Блоки питания насосов Pfeiffer ATP 2300 М имеют частотный регулятор для регулировки быстроты действия в довольно широком диапазоне. Это, в сочетании с регулировкой потоков топливного цикла (инжекция пеллет, система газонапуска, инжектора нейтрального пучка) позволит поддерживать необходимое давление в камере ТРТ.

### Расчет СВО на основе 32 ТМН без магнитной экранировки

Возможно использование ТМН без магнитных экранов. Однако в этом случае они должны устанавливаться на удаленном расстоянии, в месте, где амплитуда магнитного поля (особенно та его часть, которая направлена параллельно вращающемуся ротору ТМН) меньше 7 мТл. Данная область находится на радиусе от оси установки 16 м. Положение установки ТМН по вертикали относительно плоскости симметрии вакуумной камеры составляет – 2 м. Карта магнитного поля в момент времени выхода тока на плато (30 с) представлена в табл. 6. В этот момент амплитуда магнитного поля максимальна в выбранных областях. При срыве тока плазмы вверх амплитула несколько больше. Но этим можно пренебречь, поскольку срыв происходит достаточно быстро и ротор ТМН не успеет значительно разогреться вихревыми токами.

В месте стыковки диверторного патрубка с криостатом со стороны атмосферы монтируется переходный фланец для установки дополнительного трубопровода. Во фланец с боковой и верхней стенки врезаны трубы диаметром 250 мм, которые являются продолжением основного трубопровода. Эти трубы ведутся до затворов ТМН. Соответственно и проводимость такой системы уменьшится за счет трубопровода  $U_{tube.n}$  с эффективной длиной 10 м (табл. 7).

Из-за уменьшения эффективной скорости откачки требуется увеличить количество ТМН до 32 штук, расположенных по два на каждом из 16 диверторном патрубке.

После 100 ч откачки с прогревом и последующим охлаждением до комнатной температуры насосы обеспечивают предельное давление в вакуумной камере ТРТ  $5.2 \times 10^{-6}$  Па. Из приведенных сопротивлений трубопроводов очевидно, что трубопроводом с самым высоким сопротивлением является отводящий трубопровод диаметром 250 мм от диверторного патрубка до места установки ТМН. В ходе последующей реализации проекта TRT рекомендуется рассмотреть увеличение диаметра отводящего трубопровода, например, до 400 мм, что увеличит его проводимость в четыре раза.

Расчетные параметры откачки для рабочего режима с рабочей смесью, полностью состоящей из дейтерия, приведены в табл. 8. Слева в таблице приведены значения при потоке излучающей

### КАРПОВ и др.

·	*	,		1 1/1					
		H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> , He	$N_2$			H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> , He	$N_2$
М	а.е.м.	2	4	28	М	а.е.м.	2	4	28
$Q_i$	м <sup>3</sup> · Па/с	0	30.2	2.83	$Q_i$	м <sup>3</sup> · Па/с	0	30.2	14.2
S <sub>n</sub>	м <sup>3</sup> /с	0.599	0.722	0.687	Sn	м <sup>3</sup> /с	0.370	0.446	0.424
$S_{eff.1.sum}$	м <sup>3</sup> /с	9.69	9.50	5.37	$S_{\rm eff.1.sum}$	м <sup>3</sup> /с	6.84	7.10	4.47
$S_{eff.2.sum}$	м <sup>3</sup> /с	10.52	10.66	6.41	$S_{\rm eff.2.sum}$	м <sup>3</sup> /с	7.24	7.72	5.17
$P_{1.i}$	Па	0	3.18	0.528	$P_{1.i}$	Па		4.23	3.67
$P_{2.i}$	Па	0	2.83	0.442	$P_{2.i}$	Па		3.88	3.07
$P_{n.i}$	Па	0	1.74	0.172	P <sub>n.i</sub>	Па		3.50	2.42
$P_1$	Па	3.71			$P_1$	Па	7.90		
$P_2$	Па	3.27			$P_2$	Па	6.95		
$P_n$	Па	1.92			P <sub>n</sub>	Па	5.92		

Таблица 5. Рабочий режим, классический дивертор, рабочая смесь – дейтерий

 $Q_i$  – поток *i*-го газа в рабочем режиме, м<sup>3</sup> · Па/с.

 $S_{eff.1.sum}$  – эффективная скорость откачки камеры ТРТ всеми насосами, м<sup>3</sup>/с.

 $S_{eff,2,sum}$  – эффективная скорость откачки пространства под дивертором всеми насосами, м<sup>3</sup>/с.

 $P_{1,i}^{r}, P_{2,i}, P_{n,i}$  – парциальное давление *i*-го газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па  $P_1, P_2, P_n$  – давление газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па.

примеси равном 1/20 от потока частиц рабочей смеси из плазмы. Справа в таблице приведены значения для случая максимального потока излучающей примеси, оцененного равным в этом случае  $5.2 \times 10^{21}$  част/с или 19.8 м<sup>3</sup> Па/с, что составляет 0.35 от потока частиц рабочей смеси из плазмы.

В случае гелиевой плазмы при потоке гелия  $1.125 \times 10^{22}$  част/с (3/4 от максимального потока изотопов водорода из плазмы) 32 ТМН обеспечат давление на входе в дивертор равным 6.1 Па.

Таким образом, конфигурация СВО на основе 32 ТМН, вынесенных в зону возможной работы, без магнитной экранировки удовлетворяет требованиям к системе вакуумной откачки и поддержания рабочего давления TRT.

# *ПРИЛОЖЕНИЕ 2* РАСЧЕТ СВО НА ОСНОВЕ КРИОНАСОСОВ

По аналогии с ИТЭР рассмотрим систему из шести крионасосов, четыре из которых в рабочем

**Таблица 6.** Распределение магнитного поля, Z = -2 м

	· ·				,			
R→, м	15	16	17	18	19	20		
время <i>t</i> = 30 с (начало плато)								
<b>B</b>  , м <b>Т</b> л	7.61	6.14	5.02	4.17	3.50	2.96		
Br, мТл	4.05	3.09	2.40	1.90	1.52	1.23		
Bz, мTл	6.44	5.30	4.41	3.71	3.15	2.70		

режиме откачки (при максимальной газовой нагрузке) работают, а два находятся на регенерации. Каждый насос смонтирован на отдельном диверторном патрубке. Полная регенерация и по необходимости активация поверхностей криопанелей насосов производится между импульсами. Четыре откачивающих крионасоса должны обеспечить давление в камере TRT в области 4 Па. Их эффективная скорость откачки должна составить не менее 7.1 м<sup>3</sup>/с по дейтерию и 10.6 м<sup>3</sup>/с по гелию. То есть каждый насос должен обеспечить эффективную скорость откачки не менее 1.77 м<sup>3</sup>/с по дейтерию и 2.66 м<sup>3</sup>/с по гелию. Для расчета необходимой для этого площади криопанели в насосе требуется определить сопротивление потоку газа. оказываемое трубопроводом, соединяющим насос с откачиваемым объемом. Схематично газовый тракт изображен на рис. 8. Газовый тракт подобен тракту СВО на основе ТМН за исключением количества насосов, их расположения и количества использующихся диверторных патрубков. Расчет проводимостей газового тракта выполнен методом сосредоточенных параметров аналогично расчетам Приложения 1.

Выберем диаметр проходного сечения крионасоса  $D_y = 400$  мм и найдем проводимость от камеры до одного крионасоса, используя проводимости из предыдущих расчетов (Приложение 1) с последними тремя слагаемыми  $U_{gate}$ ,  $U_{tube.n}$ ,  $U_{hole.n}$ , рассчитанными по выбранному диаметру проходного отверстия насоса. Отводящий патрубок диаметром 400 мм для отвода крионасоса в сторо-
Таблица 7. Характеристики СВО без магнитной экранировки 32 ТMH при T = 303 К

Т	K	303				
М	а.е.м.	2	4	18	28	
$U_{12}$	м <sup>3</sup> /с	123.5	87.34	41.17	33.01	
U <sub>tube.n</sub>	м <sup>3</sup> /с	0.70	0.50	0.23	0.19	
$U_{23}$	м <sup>3</sup> /с	0.610	0.43	0.20	0.16	

Режим 3. Откачка на предельное давление

n	ШТ.	32			
$S_n$	м <sup>3</sup> /с	1.7	2.05	1.95	1.95
$S_{eff.1}$	м <sup>3</sup> /с	0.40	0.32	0.16	0.13
$S_{eff.1.sum}$	м <sup>3</sup> /с	12.9	10.10	5.16	4.21
$Q_{ult}$	м <sup>3</sup> ·	$4.88 \times 10^{-5}$	_	$7.29 \times 10^{-6}$	—
	Па/с				
Ku	_	0,24	0.15	0.08	0.07
$P_{ult.i}$	Па	$3.79 \times 10^{-6}$	0.0	$1.41 \times 10^{-6}$	0.0
$P_{ult}$	Па	$5.20 \times 10^{-6}$			

 $U_{12}$  – проводимость газового тракта, соединяющего объем  $V_1$ на входе в дивертор и объем  $V_2$  под дивертором,  $M^3/c$ .

U<sub>23</sub> – проводимость газового тракта, соединяющего объемы  $V_2$  и  $V_3$  между дивертором и одним вакуумным насосом, м<sup>3</sup>/с.  $S_{eff.1, S_{eff.1.sum}}$  – эффективная скорость откачки камеры TPT одним насосом и всеми насосами, соответственно, м<sup>3</sup>/с. Qult - поток теплового газовыделения при выходе на предельное давление, м<sup>3</sup> · Па/с.  $Ku = S_{eff;1}/S_n - \kappa$ оэффициент использования насоса.  $P_{ult,i} = Q_{tg,i}/S_{eff;1} -$  предельное парциальное остаточное дав-

ление по *i*-му газу, Па.

 $P_{ult} = \Sigma P_{ult.i}$  – суммарное предельное остаточное давление (после прогрева и остывания камеры до 303 К), Па.

ну от проходного сечения диверторного патрубка имеет в этом случае эффективную длину (с учетом поворота потока) 2060 мм. Устанавливать насосы непосредственно на торцах диверторных патрубков (как в ИТЭР) было бы предпочтительнее, но в TRT такая установка не рекоменлуется из-за необходимости обслуживания через эти патрубки диверторных кассет, которые по расчетам будут испытывать большие чем в ИТЭР тепловые нагрузки. Как следствие, "бутылочным горлышком" газового тракта является отводящий трубопровод с проводимостью  $U_{tube.n} = 11.1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Также малую проводимость в случае использования четырех диверторных портов для откачки камеры TRT имеет участок газового тракта между объемом под дивертором V<sub>2</sub> и входом в диверторный патрубок с  $U_3 = 14.05 \text{ м}^3/\text{с}$  по дейтерию при 303 К. Это обусловлено небольшим минимальным зазором межлу внешней опорой ливертора и вакуумной камерой (170 мм).

Характеристики вакуумной откачки в рабочем режиме для дейтериевой и гелиевой рабочей смеси представлены в табл. 9. Расчет проведен в молекулярном режиме течения газа, поэтому проводимость трубопроводов несколько занижена. При диаметре условного прохода крионасосов 400 мм, расчетная площадь криопанелей в каждом насосе составляет 2 м<sup>2</sup> (при температуре 4.5 K).

Расчетная эффективная скорость откачки по протию составляет 14.02 м<sup>3</sup>/с, по дейтерию 9.92 м<sup>3</sup>/с. При высоковакуумной откачке с прогревом в течение 100 часов достигается давление  $1.0 \times 10^{-4}$  Па. Выход на предельное давление  $4.0 \times$  $\times 10^{-6}$  Па осуществляется после охлажления камеры до 303 К.

В случае гелиевой плазмы с потоком равным 3/4 от максимального потока изотопов водорода из плазмы или 1.125 × 10<sup>22</sup> част/с четыре крионасоса обеспечат давление на входе в дивертор 5.1 Па. Максимальный поток излучающей при-



Рис. 8. Схема газового тракта СВО на основе шести крионасосов.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ 2021 том 47 № 12

## КАРПОВ и др.

Т	K	303		Т	K	303			
		H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> , He	N <sub>2</sub> (100%)			H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> , He	N <sub>2</sub> (100%)
М	а.е.м.	2	4	28	М	а.е.м.	2	4	28
п	шт.	32			п	шт.	32		
$Q_{\mathrm{i}}$	м <sup>3</sup> · Па/с		30.2	2.83	$Q_{ m i}$	м <sup>3</sup> · Па/с	—	30.2	19.8
Sn	м <sup>3</sup> /с	0.74	0.89	0.85	$S_{\rm n}$	м <sup>3</sup> /с	0.60	0.73	0.69
$S_{eff.1.sum}$	м <sup>3</sup> /с	9.84	8.41	3.87	$S_{eff.1.sum}$	м <sup>3</sup> /с	9.00	7.89	3.75
$S_{eff.2.sum}$	м <sup>3</sup> /с	10.69	9.31	4.38	$S_{eff.2.sum}$	м <sup>3</sup> /с	9.71	8.67	4.23
$P_{1.i}$	Па	0.00	3.59	0.732	$P_{1.i}$	Па	0.00	3.83	3.78
$P_{2.i}$	Па	0.00	3.25	0.647	$P_{2.i}$	Па	0.00	3.48	3.35
$P_{n.i}$	Па	0.00	1.06	0.11	$P_{n.i}$	Па	0.00	1.30	0.64
$P_1$	Па	4.32			$P_1$	Па	7.61		
$P_2$	Па	3.89			$P_2$	Па	6.83		
$P_n$	Па	1.17			$P_n$	Па	1.94		
			1					1	

Таблица 8. Рабочий режим, рабочая смесь – дейтерий, СВО без экранировки ТМН

 $Q_i$  – поток *i*-го газа в рабочем режиме, м<sup>3</sup> · Па/с.

 $S_{eff,1,sum}$  – эффективная скорость откачки камеры ТРТ всеми насосами, м<sup>3</sup>/с

 $S_{eff,2,sum}$  — эффективная скорость откачки пространства под дивертором всеми насосами, м<sup>3</sup>/с.

 $P_{1,i}^{-}, P_{2,i}, P_{n,i}$  – парциальное давление *i*-го газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па.  $P_1, P_2, P_n$  – давление газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па.

меси составит  $Q_{N_2} = 3.75 \times 10^{21}$  част/с (1/4  $Q_D$ ) или 14.2 м<sup>3</sup>Па/с при давлении в диверторе 6.8 Па.

Таким образом, конфигурация CBO на основе 6 крионасосов (четыре работающих и два на регенерации) удовлетворяет требованиям к системе вакуумной откачки и поддержания рабочего давления TPT.

#### Оценка емкостной способности крионасосов

Режимы работы крионасосов СВО ТРТ на основе криопанелей будут идентичны режимам работы крионасосов ИТЭР с другими временами в циклах работы/регенерации. На данном этапе разработки крионасоса в качестве адсорбента предлагается использовать активированный уголь. приклеенный на панели из нержавеющей стали специальным клеем (как это сделано в ИТЭР). В этом случае при той же температуре криопанелей их удельная емкость по газам будет такая же, как в ИТЭР. На установке ТІТАМ отрабатывались канлилатные материалы в качестве сорбента криопанелей ИТЭР [25]. Удельная емкость по гелию криопанелей составила 3200 м<sup>3</sup> · Па/м<sup>2</sup>, удельная емкость по водороду – 23400 м<sup>3</sup> · Па/м<sup>2</sup>. С учетом этих данных, емкость одного крионасоса ТРТ по гелию составит 6400 м<sup>3</sup> · Па, емкость одного насоса по протию – 46800 м<sup>3</sup> · Па. Четыре крионасоса будут иметь емкость по гелию  $25\,600 \text{ м}^3 \cdot \Pi a$ , по

протию — 187200 м<sup>3</sup> · Па. Эксперименты на установке ТІТАN проводились при откачке потока 0.625 м<sup>3</sup> · Па/с, состоящего из: 0.113% Ar, 0.112% CO<sub>2</sub>, 0.225% CO, 0.194% N<sub>2</sub>, 0.236% O<sub>2</sub>, 1.44% CH<sub>4</sub>, 5.02% He, остальное H<sub>2</sub> (по объему). На этом основании можно утверждать об отсутствии эффекта "отравления" угля примесями тяжелых газов. То есть присутствие этих примесей не уменьшает емкость и удельную скорость откачки криопанели по водороду или гелию.

Емкость крионасоса по дейтерию практически не ограничена, так как его откачка происходит за счет десублимации. Однако емкость по изотопам водорода ограничена с точки зрения безопасности [8, 9]. Максимальный поток ТРТ по молекулярному дейтерию 28.3 м<sup>3</sup> · Па/с. В случае гелиевой плазмы максимальный поток гелия 42.5 м<sup>3</sup> · Па/с. Таким образом, четыре крионасоса до насыщения по гелию могут работать ~600 с, с запасом обеспечивая откачку максимальных потоков рабочей смеси в течение импульса длительностью 100 с. Масса десублимированного дейтерия в конце рабочего режима в четырех крионасосах составит ~5 г.

Криогенные насосы чувствительны к давлению газа в них. При относительно высоких давлениях (более 0.05–0.1 Па) становятся существенными тепловые потоки на криопанели за счет теплопроводности газа. Для обеспечения более

М	а.е.м.	2	4 (D <sub>2</sub> )	4 (He)	28
$U_{12}$	м <sup>3</sup> /с	123.52	87.34	87.34	33.01
$U_{23}$	м <sup>3</sup> /с	4.91	3.47	3.47	1.31
S	$M^{3}/(c \cdot M^{2})$	6.92	4.91	4.61	1.88
$Q_i$	м <sup>3</sup> · Па/с	0	28.3	1.89	2.83
$S_n$	м <sup>3</sup> /с	13.58	9.65	9.05	3.69
$S_{eff.1}$	м <sup>3</sup> /с	3.51	2.48	2.44	0.94
S <sub>eff.1.sum</sub>	м <sup>3</sup> /с	14.02	9.92	9.76	3.76
$S_{eff.2.sum}$	м <sup>3</sup> /с	14.43	10.22	10.04	3.87
$P_{1.i}$	Па	0.00	2.85	0.19	0.75
$P_1$	Па	3.80			
$P_{2.i}$	Па	0.00	2.77	0.19	0.73
$P_2$	Па	3.69			
$P_{n.i}$	Па	0.00	0.73	0.05	0.19
$P_n$	Па	0.98			

Таблица 9. Характеристики откачки с дейтериевой рабочей смесью

 $U_{12}$  – проводимость газового тракта, соединяющего объем  $V_1$  на входе в дивертор и объем  $V_2$  под дивертором, м<sup>3</sup>/с.

 $U_{23}$  – проводимость газового тракта, соединяющего объемы  $V_2$  и  $V_3$  между дивертором и одним вакуумным насосом, м<sup>3</sup>/с. *s* – удельная скорость откачки криопанелей, м<sup>3</sup> · Па/с.

 $Q_i$  – поток *i*-го газа в рабочем режиме, м<sup>3</sup> · Па/с.

 $S_{eff:1}$ ,  $S_{eff:1.sum}$  – эффективная скорость откачки камеры ТРТ одним насосом и всеми насосами, соответственно, м<sup>3</sup>/с.  $S_{eff:2.sum}$  – эффективная скорость откачки пространства под дивертором всеми насосами, м<sup>3</sup>/с.

 $P_{1,i}, P_{2,i}, P_{n,i}$  – парциальное давление *i*-го газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па.

 $P_1, P_2, P_n -$  давление газа на входе в дивертор, в пространстве под дивертором, в насосе соответственно, Па.

низких рабочих давлений или большей продолжительности откачки рабочих потоков газа возможен режим работы СВО при одновременной работе шести крионасосов при их частичной регенерации между импульсами. В этом случае становится критичным время, необходимое на частичную регенерацию.

#### Режим работы крионасосов ИТЭР

Рассмотрим более подробно режимы работы крионасосов ИТЭР (которые из-за длительного плато 3000 с вынуждены регенерировать во время импульса) и предполагаемые режимы работы крионасосов TRT по аналогии с режимами работы крионасосов ИТЭР.

Режимы работы.

1. Захолаживание (сначала экран и криопанель от 300 до 80 K, затем криопанель до 4.5 K).

2. Работа (4.5 K, 80 K) – при различных составах рабочей смеси.

3. Частичная регенерация (нагрев криопанелей от 4.5 К до 100 К).

4. Полная регенерация (криопанель и экран до 400 К) — между циклами, между рабочими сменами.

5. Режим течеискания — криопанели работают при температуре 40 К, не адсорбируя гелий. Экран находится при температуре 80 К.

Частичная регенерация состоит из четырех этапов: вытеснение холодного гелия (recovery phase) длится 150 с, нагрев и откачка длится 300 с, захолаживание длится 70 с [26]. Выбор в ИТЭР мощных форвакуумных насосов для откачки крионасосов камеры ИТЭР определен именно обеспечением требуемого времени откачки до давления порядка 10 Па в режиме частичной регенерации для начала захолаживания криопанелей.

Полная регенерация не создаст проблем в TRT, так как времени для этого будет достаточно (с точки зрения хладопроизводительности и производительности форвакуумной откачки). Проблемным режимом в TRT является рабочий режим и частичная регенерация, так как при максимальном потоке газа требуется обеспечить достаточную емкость по изотопам водорода и гелию, а также обеспечить достаточное время для регенерации между импульсами. При этом с целью обеспечения безопасности не следует превышать максимально допустимую концентрацию водорода в замкнутых объемах.

При длительности рабочих импульсов 100 с и предполагаемой длительности паузы между импульсами 1200 с время частичной регенерации шести крионасосов CBO TRT при их одновременной работе в течение рабочего импульса должно быть меньше 1200 с.

Частичная регенерация крионасосов TRT будет состоять из четырех этапов.

1. Продувка криопанелей и гелиевых магистралей газообразным гелием для слива сверхкритического гелия на рециркуляцию.

2. Нагрев криопанелей до температуры 90– 100 К потоком газообразного гелия. При этом температура тепловых экранов остается равной 80 К и за счет повышения давления экраны подвергаются большим теплопритокам за счет теплопроводности газа (до 19 кВт на насос в ИТЭР).

3. Откачка объема крионасоса до давления 10 Па.

4. Захолаживание криопанелей потоком сверхкритического гелия.

Этапы регенерации п. 2 и 3 могут отчасти идти одновременно. Однако для оценки длительности этапов частичной регенерации примем, что откачка начинается при полностью десорбировав-



**Рис. 9.** Гидроформованные криопанели насоса ИТЭР [7] (28 панелей  $1 \times 0.2 \text{ м}^2$ , уголь с двух сторон).

шемся газе и установившемся давлении в крионасосе. С целью сократить время регенерации, захолаживание можно начинать при достижении давления в крионасосе 10 Па. Примем длительность открытия/закрытия клапана крионасоса  $10 \times 2 = 20$  с, длительность рециркуляции гелия 150 с (как в ИТЭР), длительность отогрева криопанелей и десорбции газа 150 с. Примем, что через 150 с отогрева давление установилось на максимальном уровне, весь газ сублимировал/испарился. Тогда, предполагая, что за 150 с отогрева весь газ сублимировался (испарился) и максимальное давление установилось, на откачку и захолаживание останется 1200 - 20 - 150 == 880 с.

В ИТЭР масса криопанелей (нержавеющая сталь) одного крионасоса составляет 240 кг (рис. 9). В крионасосах TRT масса криопанелей будет предположительно в шесть раз меньше, т.е. около 40 кг. Примем за время захолаживания 440 с (половину времени откачки и захолаживания). При массе криопанели 40 кг и удельной теплоемкости стали  $C_{316L} = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$  энергия, которую необходимо отвести от криопанели, составит G = 1.91 МДж. Массовый расход гелия для съема такой энергии при среднем перегреве гелия  $dT_{\rm He} = 50 \text{ K}, C_{\rm He} = 5200 \text{ Дж/(кг \cdot C)}$  составит:  $m_{\rm He} =$  $= G/(C_{\rm He} dT_{\rm He})/t = 16.7$  г/с. На захолаживание шести крионасосов потребуется расход 100 г/с гелия в течение 440 с. На форвакуумную откачку газов остается 440 с, что вполне приемлемо и определяется выбором форвакуумного насоса и трубопровода. Оценочный расчет тепловых нагрузок криопанелей дает следующие результаты: на четыре откачивающих насоса при двух насосах на частичной регенерации (повышенная нагрузка на экран и криопанель при 80-100 К за счет теплопроводности газа) тепловые потоки будут равны  $Q_{4.5}$  4 = 581 Вт,  $Q_{80}$  4 = 13.0 кВт. При этом основная доля приходится на тепло от теплоотдачи через

газ от экрана к криопанели. В ИТЭР на шесть крионасосов расчетно приходится  $Q_{\text{ITER4.5_6}} = 880 \text{ BT}$ ;  $Q_{\text{ITER80_6}} = 30.2 \text{ кBT}$  [26]. Также следует учесть, что тепловая нагрузка от потока нейтронов, а также от вихревых токов, возбуждаемых в элементах конструкции крионасосов не учтена, как в данном оценочном расчете, так и в [8] для ИТЭР.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Велихов Е.П., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. С. 5.
- 2. *Ананьев С.С., Спицын А.В., Кутеев Б.В.* // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. С. 11.
- 3. *Розанов Л.Н.* Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
- 4. *Worth L.* ITER vacuum handbook. Vacuum group CEP, 2009.
- Chiggiato P. Materials and Properties IV Outgassing. CERN Accelerator School (CAS) on Vacuum for Particle Accelerators, 2017.
- 6. *Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А.* Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979.
- Dremel M., Pearce R., Strobel H., Hauer V., Day C., Wikus P., Papastergiou S. // Fusion Eng. Design. 2013. V. 88. P. 760. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.02.026
- 8. *Hauer V., Day Chr., Dremel M., Haas H., Jensen H.* Report for TASK of the EFDA Technology Programme. Forschungszentrum Karlsruhe. Institut für Technische Physik, 2006.
- Pearce R.J., Antipenkov A., Boussier B., Bryan S., Dremel M., Levesy B., Mayaux Chr., Wykes M. // Fusion Eng. Design. 2013. V. 88. P. 809. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.01.050
- Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Дейчули П.П., Емелев И.С., Иванов А.А., Колмогоров В.В., Константинов С.Г., Краснов А.А., Попов С.С., Санин А.Л., Сорокин А.В., Ступишин Н.В., Шиховцев И.В., Колмогоров А.В., Атлуханов М.Г., Абдрашитов Г.Ф., Драничников А.Н., Капитонов В.А., Кондаков А.А. // УФН. 2018. Т. 188. С. 595. https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038305
- 11. Livshits A.I. // Vacuum. 1979. V. 29. P. 103. https://doi.org/10.1016/S0042-207X(79)80450-9
- 12. Livshits A.I., Metter I.M., Samartsev A.A. // Sov. Phys. Tech. Phys. 1976. V. 21. P. 848.
- Livshits A.I., Notkin M.E., Samartsev A.A. // J. Nucl. Mater. 1990. V. 170. P. 74. https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90329-L
- Musyaev R.K., Lebedev B.S., Grishechkin S.K., Yukhimchuk A.A., Busnyuk A.A., Notkin M.E., Samartsev A.A., Livshits A.I. // Fusion Sci. Technol. 2005. V. 48. P. 35. https://doi.org/10.13182/FST05-A874
- Nakamura Y., Sengoku S., Nakahara Y., Suzuki N., Suzuki H., Ohyabu N., Busnyuk A., Notkin M.E., Livshits A.I. // J. Nucl. Mater. 2000. V. 278. P. 312. https://doi.org/10.1016/S0022-3115(99)00243-3

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

- Ohyabu N., Komori A., Akaishi K., Inoue N., Kubota Y., Livshits A.I., Noda N., Sagara A., Suzuki H., Watanabe T., Motojima O., Fujiwara M., Iiyoshi A. // J. Nucl. Mater. 1995. V. 220–222. P. 298. https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)00432-3
- Livshits A.I., Samartsev A.A., Busnyuk A.O., Notkin M.E., Alimov V.N., Yuchimchuk A.A., Musyaev R.K., Hatano Y., Matsuyama M. // Proc. 8th Int. Conf. on Tritium Science and Technology, Rochester, USA, 2007.
- Livshits A.I., Yuchimchuk A.A. // Proc. 11th Int. Conf. on Tritium Science and Technology, Charleston, USA, 2016.
- Day Chr., Butler B., Giegerich T., Lang P.T., Lawless R., Meszaros B. // Fusion Eng. Design. 2016. V. 109–111. Part A. P. 299. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.008
- Livshits A.I., Ohyabu N., Notkin M.E., Alimov V., Suzuki H., Samartsev A., Solovyev M., Grigoriadi I., Glebovski A., Busnyuk A., Doroshin A., Kamatsu K. // J. Nucl. Mater. 1997. V. 241–243. P. 1203. https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)80221-8
- Livshits A. I., El Balghity F., Bacal M. // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. V. 3. P. 465. https://doi.org/10.1088/0963-0252/3/4/003

- Livshits A.I., Sube F., Solovyev M.N., Notkin M.E., Bacal M. // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. P. 2558. https://doi.org/10.1063/1.368418
- Hanke S., Day C., Giegerich T., Igitkhanov J., Kathage Y., Luo X., Varoutis S., Vazquez Cortes A., Härtl T., Busniuk A., Livshits A., Merli S., Schulz A., Walker M., Baumgärtner K., Hofmann J. // Fusion Eng. Design. 2020. V. 161. P. 111890. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111890
- 24. 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., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы, настоящий выпуск.
- Perinic D., Haas H., Mack A. // Fusion Eng. Des. 1991.
   V. 18. P. 79. https://doi.org/10.1016/0920-3796(91)90111-3
- 26. 26. Giors S., Boussier B., Dremel M., Kosek J., Veleiro Blanco A.M. // Fusion Eng. Des. 2017. V. 124. P. 850. doi: fusengdes.2017.03.051. https://doi.org/10.1016/j

———— ТОКАМАКИ ——

УДК 533.9

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

© 2021 г. Д. В. Портнов<sup>а, \*</sup>, Ю. Г. Высоких<sup>а</sup>, Ю. А. Кащук<sup>а</sup>, Р. Н. Родионов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии "Росатом", "Проектный центр ИТЭР", Москва, Россия \*e-mail: d.portnov@iterrf.ru Поступила в редакцию 31.03.2021 г. После доработки 15.06.2021 г. Принята к публикации 06.07.2021 г.

Представлены результаты расчетов энерговыделения, создаваемого ионизирующим излучением в вакуумной камере и магнитных катушках токамака с реакторными технологиями. Выполнено сравнение результатов для DD- и DT-плазмы. На основании расчетов, авторы делают вывод, что для DD-плазмы уровень энерговыделения находится в допустимых пределах – менее 1 мВт/см<sup>3</sup> и предлагаемый дизайн вакуумной камеры удовлетворителен с точки зрения радиационной защиты. Для DT-плазмы – вопрос о дополнительных мерах защиты или ограничении времени разряда остается дискуссионным. На основании рассчитанных пространственных и энергетических распределений поля нейтронов, авторы приходят к выводу, что наибольший эффект для усиления зашиты может дать увеличение толщины защитного слоя воды. Для снижения тепловой нагрузки на катушку тороидального поля при работе с DT-плазмой до уровня, допускающего длительный разряд, необходимо не менее, чем вдвое увеличить толщину слоя воды в вакуумной камере, как минимум, во внутреннем сегменте вблизи экваториальной плоскости. В статье сделаны оценки источников энерговыделения в тороидальных катушках, а также нескольких вариантов защиты. В частности, обосновывается утверждение, что использование бора, обогащенного изотопом <sup>10</sup>В, практически не отражается на энерговыделении. Подтверждена возможность работы с DD-плазмой и определены проблемы радиационной защиты в случае с DT-плазмой.

*Ключевые слова*: токамак с реакторными технологиями, TRT, анализ транспорта нейтронов и гамма излучения, ядерно-радиационное энерговыделение, нейтронная защита **DOI:** 10.31857/S0367292121110238

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных особенностей проекта "Токамак с реакторными технологиями"<sup>1</sup> [1] – это применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в электромагнитной системе (ЭМС). ВТСП дают возможность создать сильное тороидальное магнитное поле (до 8 Т), что, в свою очередь, позволит достичь термоядерных параметров плазмы на компактной установке. На этой установке будет возможно отработать ключевые термоядерные технологии, включая новые конфигурации дивертора, литиевую стенку, различные методы дополнительного нагрева и поддерквазистационарного тока. жания Установка должна также обеспечить режим работы с кратковременным, масштаба 10 секунд, горением с применением трития. В этом режиме выход термоядерной энергии превзойдет вклад в нагрев плазмы от внешних источников (Q > 1). Иными словами, нагрев альфа-частицами станет доминирующим.

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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Для однозначной идентификации проекта, в том числе и в международных коммуникациях, было принято решение использовать английскую аббревиатуру TRT, которая и будет использована далее по тексту.



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

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

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

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

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

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

## 2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА

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

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

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

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



Рис. 2. Размеры и материалы вакуумной камеры.

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

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

# DD-плазма

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

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



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

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

# DT-плазма

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

На КТП возлействует гамма-излучение. локальное – от фотонов, рожденных в самой КТП, и снаружи – со стороны ВК. Чтобы выделить вклад в энерговыделение в КТП локально рожденных фотонов, был выполнен отдельный расчет, где учитывались только те гамма-кванты, которые появились в материалах самой КТП. Это дало снижение максимального энерговыделения с 38 до 26 мВт/см<sup>3</sup> (≈30%). Причем максимальное снижение наблюдается вблизи поверхности КТП, обращенной к ВК. Однако среднее значение удельного энерговыделения по всему объему КТП снизилось только на 12%. Исходя из этого мы делаем вывод, что основной вклад в нагрев дает гамма-излучение, рожденное в самой КТП. Внешние фотоны дают сопоставимый, но все же намного меньший вклад и только на поверхности, обрашенной к ВК.

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

Вновь обращаясь к рис. 4 (справа вверху), видим, что в случае DT-плазмы заданный слой воды ослабляет энерговыделение только в 3 раза, вместо 5, как было в случае DD-плазмы. Объясняется это тем, что сечение упругого взаимодействия нейтрона с протоном [9] на энергии 14 МэВ относительно мало – 0.68 барн. Для таких нейтронов толщины слоя воды в 14 см недостаточно. Это общая проблема для компактных токамаков. В работе [10], например, для такой толщины предлагается применить ZrH<sub>2</sub>, который по расчетам [10] на порядок лучше обеспечивает ослабление теп-



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

ловыделения. Этот подход требует дополнительного анализа для условий TRT.

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



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

продвижением в глубь ВК и КТП, эта доля уменьшается.

## 4. АНАЛИЗ

Были выполнены расчеты для вариантов использования в воде и слоях защиты ВК бора с естественным изотопным составом и с обогащением изотопом <sup>10</sup>В 95%. Результаты для DT-плазмы приведены в табл. 1. С естественным бором нагрев выше, но несущественно — разница не более 8%.

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

Таблица 1. Сравнение энерговыделения в проводниках КТП с обогащенным и естественным бором, мВт/см<sup>3</sup>

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

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

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

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

Работа с большими объемами воды требует решения сложных организационных и технических



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

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

# 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

**Таблица 2.** Среднее по объему энерговыделение в  $KT\Pi$ ,  $MBT/cM^3$ 

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

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 47 № 12 2021

скольку именно ВК служит основной радиационной защитой в ТРТ.

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

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

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

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

son N.M., Leal L., Lestone J.P., Little R.C., McCutchan E.A., MacFarlane R.E., MacInnes M., Mattoon C.M., McKnight R.D., Mughabghab S.F., Nobre G.P.A., Palmiotti G., Palumbo A., Pigni M.T., Pronyaev V.G., Sayer R.O., Sonzogni A.A., Summers N.C., Talou P., Thompson I.J., Trkov A., Vogt R.L., van der Marck S.C., Wallner A., White M.C., Wiarda D., Young P.G. // Nuclear Data Sheets. 112 (12), 2887– 2996. 2011.// https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002

- Hartwig Z.S., Haakonsen C.B., Mumgaard R.T., Bromberg L. // Fusion Engineering and Design. 87 (3): 201–214. 2012.
- 11. Fischer U., Bachmann C., Palermo I., Pereslavtsev P., Villari R. Neutronics requirements for a DEMO fusion power plant. Fusion Engineering and Design. 98–99 : 2134–2137. 2015.

- Villari R., Angelone M., Caiffi B., Colangeli A., Crisanti F., Flammini D., Fonnesu N., Luis R., Mariano G., Marocco D., Moro F., Polli G.M., Sandri S. // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 155. P. 111551.
- Creely A.J., Greenwald M.J., Ballinger S.B., Brunner D., Canik J., Doody J., Fülöp T., Garnier D.T., Granetz R., Gray T.K., Holland C., Howard N.T., Hughes J.W., Irby J.H., Izzo V.A., Kramer G.J., Kuang A.Q., LaBombard B., Lin Y., Lipschultz B., Logan N.C., Lore J.D., Marmar E.S., Montes K., Mumgaard R.T., Paz-Soldan C., Rea C., Reinke M.L., Rodriguez-Fernandez P., Särkimäki K., Sciortino F., Scott S.D., Snicker A., Snyder P.B., Sorbom B.N., Sweeney R., Tinguely R.A., Tolman E.A., Umansky M., Vallhagen O., Varje J., Whyte D.G., Wright J.C., Wukitch S.J., Zhu J., Team the S. // Journal of Plasma Phys. 2020. V. 86. № 5. P.