

УДК 533.59

СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ТОКАМАКА TRT

© 2021 г. Д. А. Карпов^{a, b, *}, А. Г. Иванов^{a, b}, А. И. Лившиц^c, А. Н. Драничников^d

^a Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия

^b Частное учреждение “Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия

^c Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

^d 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 проникаемостью. 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 тритии 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 ва-

куумных 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 He 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 патрубками	$V = 112 \text{ м}^3$
Температура вакуумной камеры в режиме импульса	$T = 30^\circ\text{C}$
Температура обезгаживающего прогрева	$T_0 = 170^\circ\text{C}$
Требуемое остаточное давление	$P = 1 \times 10^{-5} \text{ Па}$
Давление газа в рабочем режиме в области дивертора	2...10 Па
Полный поток частиц (Н) из плазменного шнура	$1.5 \times 10^{22} \text{ част/с}$
Полный поток частиц для молекулярного дейтерия	$7.5 \times 10^{21} (28.3 \text{ м}^3 \text{ Па/с})$
Поток гелия, част/с	$5 \times 10^{20} (1.89 \text{ м}^3 \text{ Па/с})$
Поток гелия в случае гелиевой плазмы, част/с	$1.5 \times 10^{22} (56.6 \text{ м}^3 \text{ Па/с})$
Поток излучающей примеси (N, Ne, Ar), част/с	макс. возможный
Длительность плато тока	до 100 с

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 газовойделения из конструкционных материалов и потоки в рабочем режиме из плазмы разряда. Потоками через течи и неплотности пренебрегается.

Величины удельного газовойделения для используемых в TRT материалов взяты из [3–6]. В общем случае изменение удельного газовойделения q_{tg} представлялось в виде

$$q_{\text{tg}} = q_1 t^{-\alpha}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{с} \cdot \text{м}^2),$$

где q_1 – газовойделение после откачки в течение 1 часа, t – время откачки, час, α – показатель степени.

Поток теплового газовойделения Q_{tg}

$$Q_{\text{tg}} = q_{\text{tg}} F, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}.$$

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

Температура дивертора в рабочем режиме находится в диапазоне от 30 до 1500°C. Температура стенок вакуумной камеры в рабочем режиме поддерживается равной 30°C. Поскольку коэффициент аккомодации газа на стенках близок к единице, температура газа T в рабочем режиме принята равной 30°C.

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 ТРТ

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-

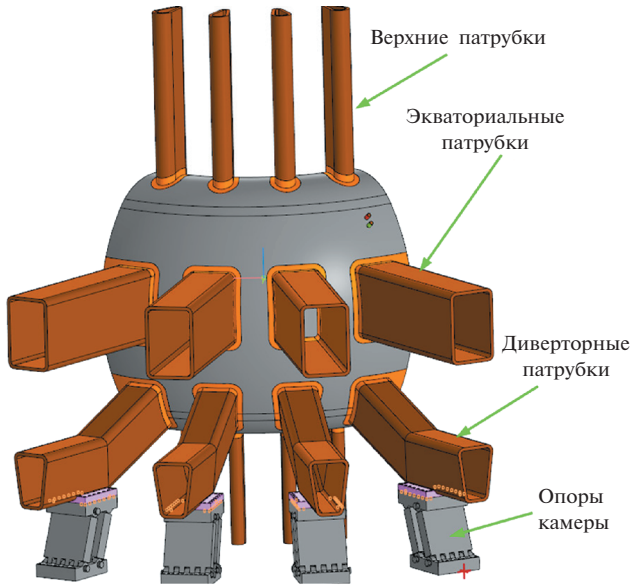


Рис. 1. Компоновка вакуумной камеры ТРТ (1/4 сегмента).

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 откачки.

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 используемого насоса и места его установки. На выходе отводящего патрубка располагается высоковакуумный затвор с проводимостью U_{gate} 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 ТРТ.

Для выбора вакуумных насосов, обеспечивающих требуемое давление на всех режимах работы ТРТ, 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 проводить в молекулярном режиме. При известной проводимости трубопровода эффективная быстрота откачки S_{eff} определяется через основное уравнение вакуумной техники

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_n U}{S_n + U},$$

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

Таблица 1. Поток тепловой десорбции в различных режимах работы ТРТ

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

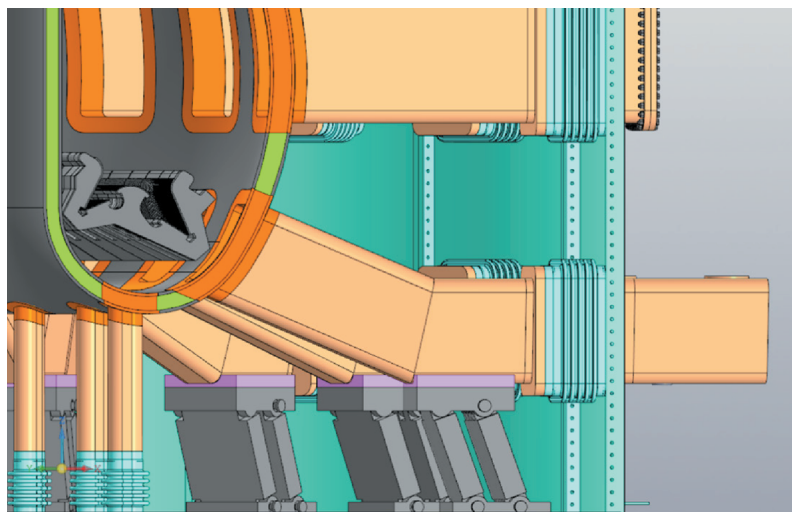


Рис. 2. Расположение дивертора в вакуумной камере и диверторного патрубка для вакуумной откачки (при выходе патрубка из криостата предусмотрена сильфонная развязка).

4. СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ TRT 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 TRT 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

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 M. Этот насос спроектирован для работы с большими потоками легких газов с высокой степенью сжатия по водороду и номинальной скоростью откачки по водороду $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$. В варианте установки насосов на выходе диверторных патрубков (в непосредственной близости от криостата) откачку требуемых газовых потоков и поддержание рабочего давления в области дивертора 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 $17.2 \text{ м}^3/\text{с}$ на высоком вакууме и от 1.94 до $9.69 \text{ м}^3/\text{с}$ при работе с плазменным шнуром. После 100 ч (4.2 сут) прогрева насосы обеспечивают предельное давление в вакуумной камере 3.73×10^{-6} Па. Максимально возможный поток излучающей примеси (азот) оценен равным $Q_{N_2} = 3.75 \times 10^{21}$ част/с ($1/4 Q_D$) или $14.2 \text{ м}^3/\text{Па}/\text{с}$

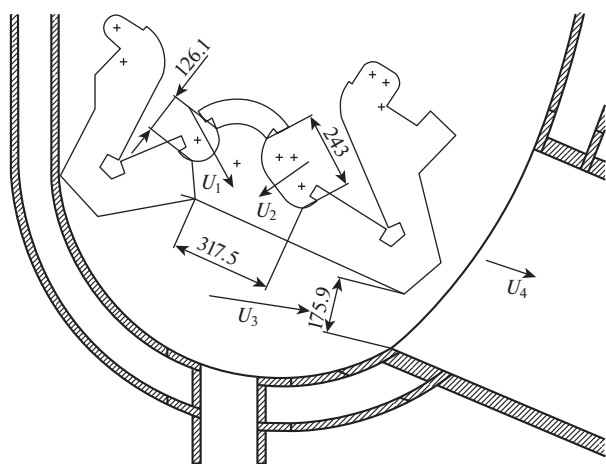


Рис. 3. Схема расчета проводимости каналов откачки.

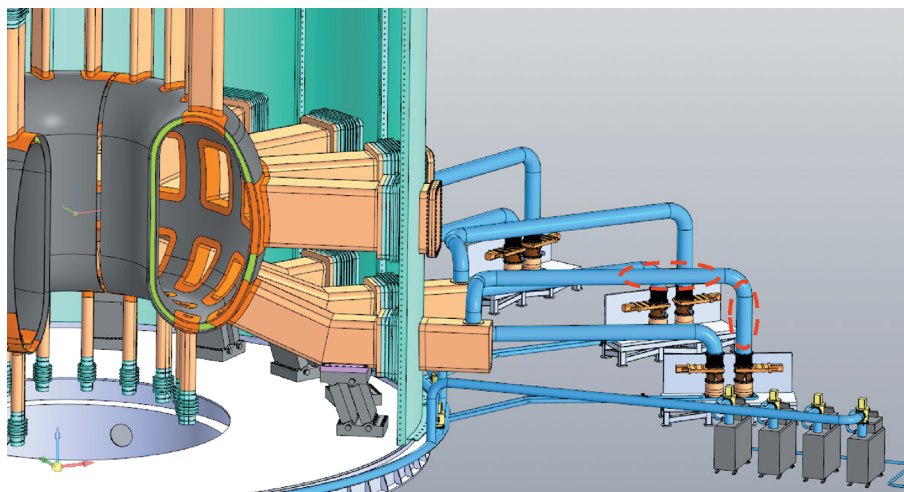


Рис. 4. Компонировка СВО ТРТ на основе 32 ТМН (красным пунктиром выделены возможные места расположения СПМ).

при давлении в диверторе ~ 8 Па. Откачку требующегося потока гелия 1.5×10^{22} част/с ($56.6 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$) 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 ТРТ 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 $2.58\text{--}12.9 \text{ м}^3/\text{с}$ на высоком вакууме и $1.97\text{--}9.84 \text{ м}^3/\text{с}$ 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^{-6} Па. Максимально возможный поток излучающей примеси (азот) оценен в этом случае равным $Q_{N_2} = 5.2 \times 10^{21}$ част/с ($0.35 Q_D$) или $19.8 \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ при давлении в диверторе ~ 7.6 Па. При работе с чисто гелиевой плазмой максимальный поток гелия оценен

равным 1.1×10^{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^2 поверхности криопанелей с наклеенным углем, охлаждающиеся потоком сверхкритического гелия до температуры 4.5 К [7]. Криопанели окружены тепловым экраном темпе-

Таблица 2. Основные требования к системам вакуумной откачки

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

ратурой 80 К, охлаждающимся потоком газобезразного 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 м² и температуре 4.5 К необходимо шесть крионасосов (четыре работающих и два на регенерации). При работе с дейтериевой плазмой и макси-

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 м³/с. При высоковакуумной откачке с прогревом в течение 100 ч и последующего охлаждения до комнатной температуры обеспечивается предельное давление 4.0×10^{-6} Па. Криопанели с приклеенным активированным (кокосовым) углем должны охлаждаться потоком сверхкритического гелия при температуре 4.5 К. Расчетная требуемая холодопроизводительность: 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 м³Па/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^{22} 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.

Таблица 3. Удельные скорости откачки криопанелей ИТЭР [9]

s_{0H_2} , м ³ /(с · м ²)	6.92	s_{0H_2O} , м ³ /(с · м ²)*	2.89
s_{0He} , м ³ /(с · м ²)	4.61	s_{0N_2} , м ³ /(с · м ²)	1.88
s_{0D_2} , м ³ /(с · м ²)	4.91	s_{0Ne} , м ³ /(с · м ²)	1.95
s_{0T_2} , м ³ /(с · м ²)	4.04	s_{0Ar} , м ³ /(с · м ²)	2.21

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

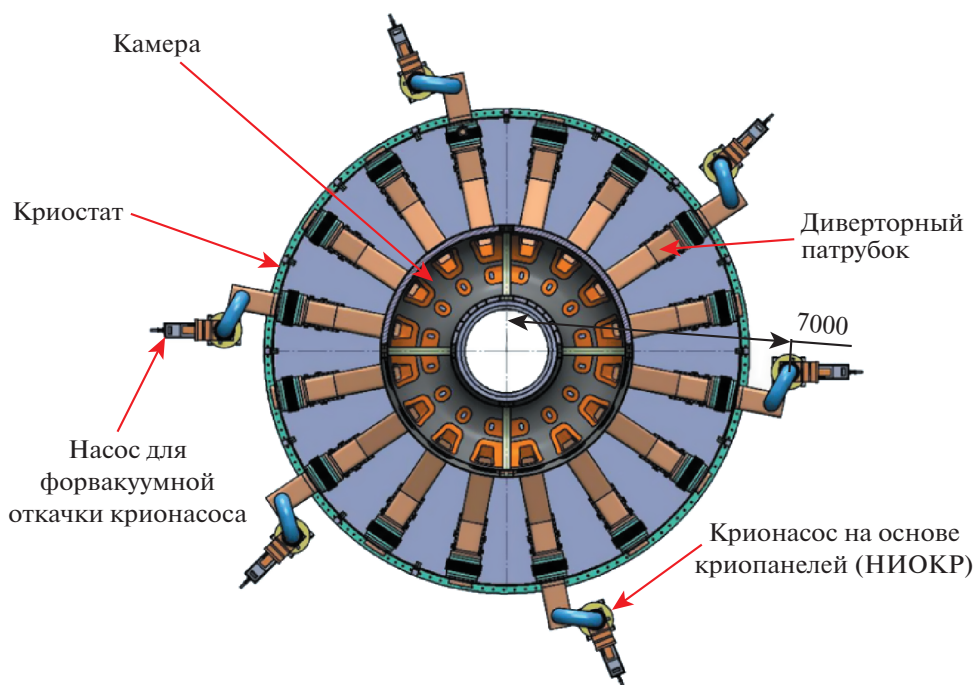


Рис. 5. Компоновка СВЧ ТРТ на основе шести крионасосов.

Компоновка СВЧ 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 $\sim 1.33 \times 10^{-2}$ Па. В заливных насосах рабочая температура конденсирующей поверхности поддерживается на уровне от 4.2 до 2.5 К, и при площади криопанелей ~ 8 м² достигается скорость откачки $\sim 0.62 \times 10^3$ м³/с. Для откачки максимальных газовых потоков в ТРТ крионасосы, работающие по циклу Гиффорда–Макмагона, обладают недостаточной холодопроизводительностью 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 м². Существенно снизить площадь поверхности криопанелей возможно при уменьшении их температуры до ~ 2.5 К. В условиях ТРТ для

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

6. СЕЛЕКТИВНАЯ ОТКАЧКА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ТРТ 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 $\sim 20\%$ [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_2 , D_2 , T_2).

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 He 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 He 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 надтеплого водорода, обеспечивающего работу СПМ и предполагается установка второй, более удаленной СПМ, обеспеченной собственным генератором надтеплого водорода [18, 19]. Таким генератором может служить, например, горячая металлическая поверхность (“атомизатор”), на которой происходит диссоциация молекул D_2 и T_2 на атомы [14, 17,

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 He (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_2 , проходящегося на один из 32 откачных патрубков ($2.4 \times 10^{20} D_2/c$), взять СПМ-насос с мембранной площадью $\sim 3 m^2$, сопряженной с атомизатором площадью $\sim 0.6 m^2$, то оценка масштаба величины скорости откачки D_2 дает несколько десятков m^3/c . Такой СПМ-насос позволит откачать, компримировать и отправить обратно в рабочую плазму порядка 90% потока D_2 , 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, потребуются 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 He 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 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 СВО камеры TRT на основе ТМН Pfeiffer ATP 2300 М с номинальной быстротой откачки по водороду равной $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (по дейтерию и гелию $2.05 \text{ м}^3/\text{с}$). Данные ТМН спроектированы для откачки больших потоков легких газов (максимальный поток по водороду и гелию более

$5.07 \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$) 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_3 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_1 и U_2 (площадями поперечного сечения 49.3 см^2 и 109.2 см^2), 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_3 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_{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

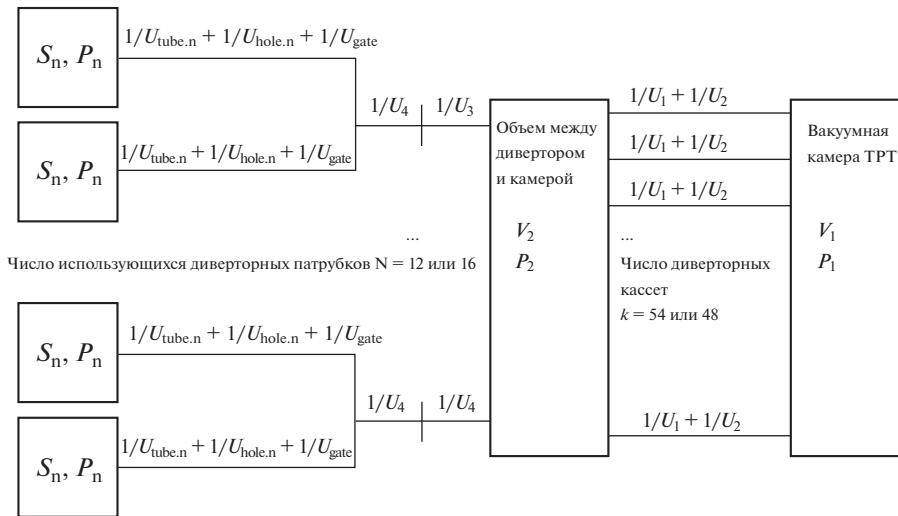


Рис. 6. Схема газового тракта СВО при установке двух ТМН на каждом из N диверторных патрубках.

дивертора против 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]

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

где A – площадь отверстия, см²; A_0 – площадь сосуда, из которого истекает газ, см²; T – температура газа, К; M – молярная масса газа, а. е. м. В случае если $A_0 \gg A$ проводимость отверстия рассчитывают по формуле

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

Проводимость коротких трубопроводов рассчитывалась из уравнения

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

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

$$U_{tube} = 19.4 \frac{\sqrt{T/M}}{\int_0^l B/A^2 dl}, \text{ л/с,}$$

где B – периметр поперечного сечения, см; A – площадь поперечного сечения трубопровода, см².

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

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

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

Для определения необходимого количества насосов для откачки камеры ТРТ 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

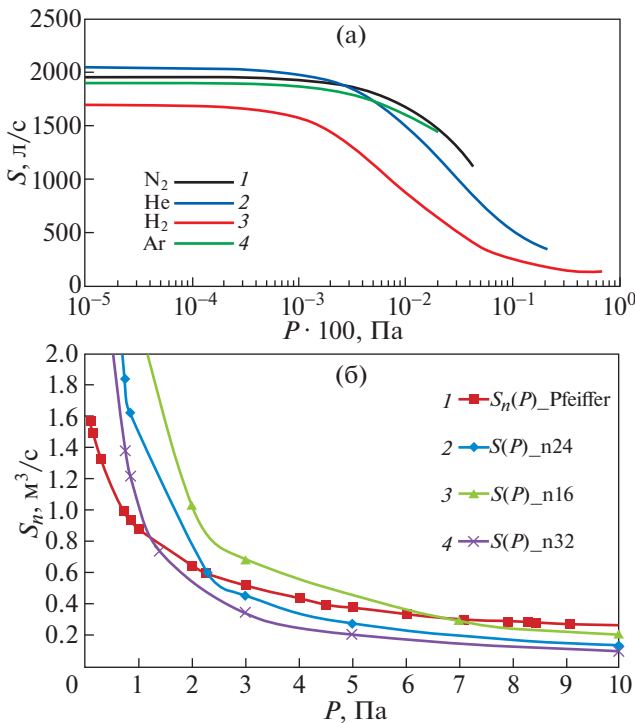


Рис. 7. Зависимость номинальной скорости откачки выбранного ТМН от давления (а); положение рабочей точки в зависимости от числа ТМН (б): $S_n(P)$ _Pfeiffer – зависимость номинальной скорости откачки ТМН от давления в области рабочих давлений; $S(P)$ _n24 – газовая нагрузка $1.38 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$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

номинальной скорости откачки по различным газам от давления в насосе. На рис. 7б 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_2 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, состоящей 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 $U_{tube,n}$. При известном количестве насосов n 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 $1.42 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$) проводимости для различных газов изменятся в соответствии с изменениями в множителе $(T/M)^{0.5}$. Давление в камере TRT при 100-часовом высоковакуумном прогреве 24 ТМН составит 8.37×10^{-5} Па.

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

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 $Q_{N_2} = 3.75 \times 10^{21}$ част/с ($1/4 Q_D$) или $14.2 \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$ давление в диверторе составит 7.9 Па, что достаточно близко к максимальному допустимому дав-

Таблица 4. Характеристики СВО с классическим дивертором $T = 303$ К

T	К	303			
M	а.е.м.	2	4	18	28
U_{12}	$\text{м}^3/\text{с}$	123.5	87.3	41.17	33.01
			4		
U_{23}	$\text{м}^3/\text{с}$	1.63	1.16	0.54	0.44
Режим 3 – Откачка на предельное давление					
n	шт.	24			
S_n	$\text{м}^3/\text{с}$	1.7	2.05	1.95	1.95
$S_{\text{eff},1}$	$\text{м}^3/\text{с}$	0.72	0.61	0.34	0.28
$S_{\text{eff},1.\text{sum}}$	$\text{м}^3/\text{с}$	17.21	14.7	8.19	6.80
			5		
Q_{ult}	$\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$	4.88×10^{-5}	–	7.29×10^{-6}	–
Ku	–	0.42	0.30	0.17	0.15
$P_{\text{ult},i}$	Па	2.83×10^{-6}	0.0	8.90×10^{-7}	0.0
P_{ult}	Па	3.73×10^{-6}			

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

U_{23} – проводимость газового тракта, соединяющего объемы V_2 и V_3 между дивертором и одним вакуумным насосом, $\text{м}^3/\text{с}$.

$S_{\text{eff},1}$, $S_{\text{eff},1.\text{sum}}$ – эффективная скорость откачки камеры ТРТ одним насосом и всеми насосами, соответственно, $\text{м}^3/\text{с}$.

Q_{ult} – поток теплового газовыделения при выходе на предельное давление, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

$Ku = S_{\text{eff},1}/S_n$ – коэффициент использования насоса.

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

$P_{\text{ult}} = \sum P_{\text{ult},i}$ – суммарное предельное остаточное давление (после прогрева и остывания камеры до 303 К), 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^{22} 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 3.7×10^{-6} Па.

Блоки питания насосов Pfeiffer ATP 2300 М имеют частотный регулятор для регулировки быстроты действия в довольно широком диапазо-

не. Это, в сочетании с регулировкой потоков топливного цикла (инжекция пеллет, система газонапуска, инжектора нейтрального пучка) позволяет 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 амплитуда 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 $U_{\text{tube},n}$ 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 5.2×10^{-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

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

		H ₂	D ₂ , He	N ₂			H ₂	D ₂ , He	N ₂
<i>M</i>	а.е.м.	2	4	28	<i>M</i>	а.е.м.	2	4	28
<i>Q_i</i>	м ³ · Па/с	0	30.2	2.83	<i>Q_i</i>	м ³ · Па/с	0	30.2	14.2
<i>S_n</i>	м ³ /с	0.599	0.722	0.687	<i>S_n</i>	м ³ /с	0.370	0.446	0.424
<i>S_{eff.1.sum}</i>	м ³ /с	9.69	9.50	5.37	<i>S_{eff.1.sum}</i>	м ³ /с	6.84	7.10	4.47
<i>S_{eff.2.sum}</i>	м ³ /с	10.52	10.66	6.41	<i>S_{eff.2.sum}</i>	м ³ /с	7.24	7.72	5.17
<i>P_{1,i}</i>	Па	0	3.18	0.528	<i>P_{1,i}</i>	Па		4.23	3.67
<i>P_{2,i}</i>	Па	0	2.83	0.442	<i>P_{2,i}</i>	Па		3.88	3.07
<i>P_{n,i}</i>	Па	0	1.74	0.172	<i>P_{n,i}</i>	Па		3.50	2.42
<i>P₁</i>	Па	3.71			<i>P₁</i>	Па	7.90		
<i>P₂</i>	Па	3.27			<i>P₂</i>	Па	6.95		
<i>P_n</i>	Па	1.92			<i>P_n</i>	Па	5.92		

Q_i – поток i -го газа в рабочем режиме, м³ · Па/с.

$S_{eff.1.sum}$ – эффективная скорость откачки камеры ТРТ всеми насосами, м³/с.

$S_{eff.2.sum}$ – эффективная скорость откачки пространства под дивертором всеми насосами, м³/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.

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 5.2×10^{21} част/с или 19.8 м³ Па/с, что составляет 0.35 от потока частиц рабочей смеси из плазмы.

В случае гелиевой плазмы при потоке гелия 1.125×10^{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 ТРТ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РАСЧЕТ СВО НА ОСНОВЕ КРИОНАСОСОВ

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

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 ТРТ в области 4 Па. Их эффективная скорость откачки должна составить не менее 7.1 м³/с по дейтерию и 10.6 м³/с по гелию. То есть каждый насос должен обеспечить эффективную скорость откачки не менее 1.77 м³/с по дейтерию и 2.66 м³/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 используемых 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 6. Распределение магнитного поля, $Z = -2$ м

R→, м	15	16	17	18	19	20
время $t = 30$ с (начало плато)						
B , мТл	7.61	6.14	5.02	4.17	3.50	2.96
B _r , мТл	4.05	3.09	2.40	1.90	1.52	1.23
B _z , мТл	6.44	5.30	4.41	3.71	3.15	2.70

Таблица 7. Характеристики СВО без магнитной экранировки 32 ТМН при $T = 303$ К

T	К	303			
M	а.е.м.	2	4	18	28
U_{12}	м ³ /с	123.5	87.34	41.17	33.01
$U_{tube.n}$	м ³ /с	0.70	0.50	0.23	0.19
U_{23}	м ³ /с	0.610	0.43	0.20	0.16
Режим 3. Откачка на предельное давление					
n	шт.	32			
S_n	м ³ /с	1.7	2.05	1.95	1.95
$S_{eff.1}$	м ³ /с	0.40	0.32	0.16	0.13
$S_{eff.1.sum}$	м ³ /с	12.9	10.10	5.16	4.21
Q_{ult}	м ³ · Па/с	4.88×10^{-5}	—	7.29×10^{-6}	—
Ku	—	0,24	0.15	0.08	0.07
$P_{ult.i}$	Па	3.79×10^{-6}	0.0	1.41×10^{-6}	0.0
P_{ult}	Па	5.20×10^{-6}			

U_{12} — проводимость газового тракта, соединяющего объем V_1 на входе в дивертор и объем V_2 под дивертором, м³/с.

U_{23} — проводимость газового тракта, соединяющего объемы V_2 и V_3 между дивертором и одним вакуумным насосом, м³/с.

$S_{eff.1}$, $S_{eff.1.sum}$ — эффективная скорость откачки камеры ТРТ одним насосом и всеми насосами, соответственно, м³/с.

Q_{ult} — поток теплового газовыделения при выходе на предельное давление, м³ · Па/с.

$Ku = S_{eff.1}/S_n$ — коэффициент использования насоса.

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

$P_{ult} = \sum P_{ult.i}$ — 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 на-

сосы непосредственно на торцах диверторных патрубков (как в ИТЭР) было бы предпочтительнее, но в TRT такая установка не рекомендуется 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 $U_{tube.n} = 11.1$ м³/с. Также малую проводимость в случае использования четырех диверторных портов для откачки камеры TRT имеет участок газового тракта между объемом под дивертором V_2 и входом в диверторный патрубок с $U_3 = 14.05$ м³/с по дейтерию при 303 К. Это обусловлено небольшим минимальным зазором между внешней опорой дивертора 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 м² (при температуре 4.5 К).

Расчетная эффективная скорость откачки по противу составляет 14.02 м³/с, по дейтерию 9.92 м³/с. При высоковакуумной откачке с прогревом в течение 100 часов достигается давление 1.0×10^{-4} Па. Выход на предельное давление 4.0×10^{-6} Па осуществляется после охлаждения камеры до 303 К.

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

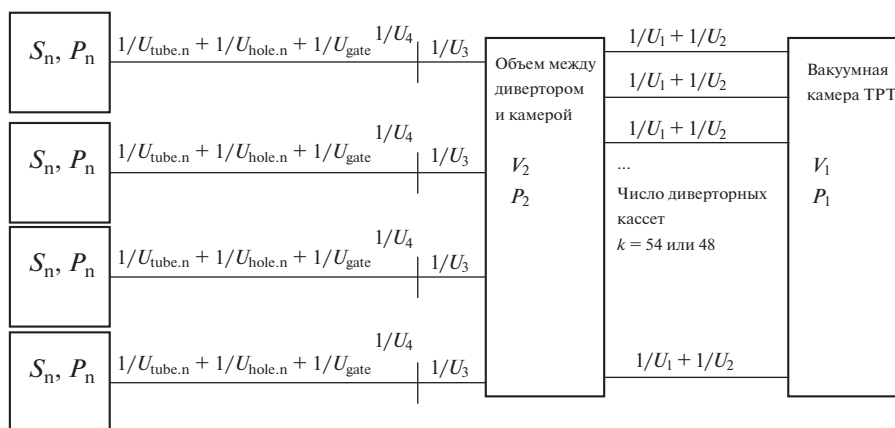
**Рис. 8.** Схема газового тракта СВО на основе шести крионасосов.

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

T	К	303			T	К	303		
		H_2	D_2, He	$N_2 (100\%)$			H_2	D_2, He	$N_2 (100\%)$
M	а.е.м.	2	4	28	M	а.е.м.	2	4	28
n	шт.	32			n	шт.	32		
Q_i	$м^3 \cdot Па/с$		30.2	2.83	Q_i	$м^3 \cdot Па/с$	—	30.2	19.8
S_n	$м^3/с$	0.74	0.89	0.85	S_n	$м^3/с$	0.60	0.73	0.69
$S_{eff.1.sum}$	$м^3/с$	9.84	8.41	3.87	$S_{eff.1.sum}$	$м^3/с$	9.00	7.89	3.75
$S_{eff.2.sum}$	$м^3/с$	10.69	9.31	4.38	$S_{eff.2.sum}$	$м^3/с$	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		

Q_i – поток i -го газа в рабочем режиме, $м^3 \cdot Па/с$.

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

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

$P_{1.i}, P_{2.i}, P_{n.i}$ – 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 $14.2 м^3 Па/с$ при давлении в диверторе 6.8 Па.

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

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 ТИТАН обрабатывались кандидатные материалы в качестве сорбента криопанелей ИТЭР [25]. Удельная емкость по гелию криопанелей составила $3200 м^3 \cdot Па/м^2$, удельная емкость по водороду – $23400 м^3 \cdot Па/м^2$. С учетом этих данных, емкость одного крионасоса ТРТ по гелию составит $6400 м^3 \cdot Па$, емкость одного насоса по водороду – $46800 м^3 \cdot Па$. Четыре крионасоса будут иметь емкость по гелию $25600 м^3 \cdot Па$, по

противу – $187200 м^3 \cdot Па$. Эксперименты на установке ТИТАН проводились при откачке потока $0.625 м^3 \cdot Па/с$, состоящего из: 0.113% Ar, 0.112% CO_2 , 0.225% CO, 0.194% N_2 , 0.236% O_2 , 1.44% CH_4 , 5.02% He, остальное H_2 (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 $28.3 м^3 \cdot Па/с$. В случае гелиевой плазмы максимальный поток гелия $42.5 м^3 \cdot Па/с$. 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

Таблица 9. Характеристики откачки с дейтериевой рабочей смесью

M	а.е.м.	2	4 (D ₂)	4 (He)	28
U_{12}	м ³ /с	123.52	87.34	87.34	33.01
U_{23}	м ³ /с	4.91	3.47	3.47	1.31
s	м ³ /(с · м ²)	6.92	4.91	4.61	1.88
Q_i	м ³ · Па/с	0	28.3	1.89	2.83
S_n	м ³ /с	13.58	9.65	9.05	3.69
$S_{eff.1}$	м ³ /с	3.51	2.48	2.44	0.94
$S_{eff.1.sum}$	м ³ /с	14.02	9.92	9.76	3.76
$S_{eff.2.sum}$	м ³ /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			

U_{12} — проводимость газового тракта, соединяющего объем V_1 на входе в дивертор и объем V_2 под дивертором, м³/с.

U_{23} — проводимость газового тракта, соединяющего объемы V_2 и V_3 между дивертором и одним вакуумным насосом, м³/с.

s — удельная скорость откачки криопанелей, м³ · Па/с.

Q_i — поток i -го газа в рабочем режиме, м³ · Па/с.

$S_{eff.1}$, $S_{eff.1.sum}$ — эффективная скорость откачки камеры ТРТ одним насосом и всеми насосами, соответственно, м³/с.

$S_{eff.2.sum}$ — эффективная скорость откачки пространства под дивертором всеми насосами, м³/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 К, затем криопанель до 4.5 К).

2. Работа (4.5 К, 80 К) — 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 СВО 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-

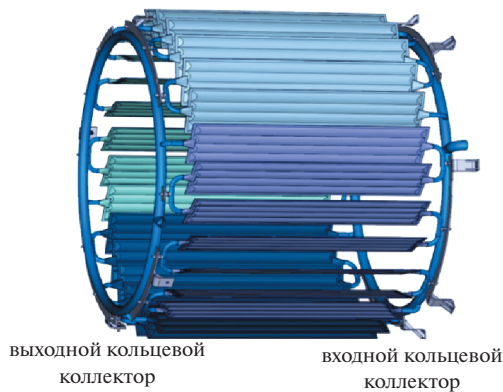


Рис. 9. Гидроформованные криопанели насоса ИТЭР [7] (28 панелей $1 \times 0.2 \text{ м}^2$, уголь с двух сторон).

шемся газе и установившемся давлении в крионасосе. С целью сократить время регенерации, захлаживание можно начинать при достижении давления в крионасосе 10 Па. Примем длительность открытия/закрытия клапана крионасоса $10 \times 2 = 20 \text{ с}$, 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 захлаживание останется $1200 - 20 - 150 - 150 = 880 \text{ с}$.

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 захлаживания 440 с (половину времени откачки и захлаживания). При массе криопанели 40 кг и удельной теплоемкости стали $C_{316L} = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ энергия, которую необходимо отвести от криопанели, составит $G = 1.91 \text{ МДж}$. Массовый расход гелия для съема такой энергии при среднем перегреве гелия $dT_{\text{He}} = 50 \text{ К}$, $C_{\text{He}} = 5200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{С})$ составит: $m_{\text{He}} = G/(C_{\text{He}}dT_{\text{He}})/t = 16.7 \text{ г/с}$. На захлаживание 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 $Q_{4.5_4} = 581 \text{ Вт}$, $Q_{80_4} = 13.0 \text{ кВт}$. При этом основная доля приходится на тепло от теплоотдачи через

газ от экрана к криопанели. В ИТЭР на шесть крионасосов расчетно приходится $Q_{\text{ITER}4.5_6} = 880 \text{ Вт}$; $Q_{\text{ITER}80_6} = 30.2 \text{ кВт}$ [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.
5. *Chiggiato P.* Materials and Properties IV Outgassing. CERN Accelerator School (CAS) on Vacuum for Particle Accelerators, 2017.
6. *Пупко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А.* Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979.
7. *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.
9. *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>
10. *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/UFN.2018.02.038305>
11. *Livshits A.I.* // Vacuum. 1979. V. 29. P. 103. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(79\)80450-9](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.
13. *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](https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90329-L)
14. *Musyaev R.K., Lebedev B.S., Grishchkin 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>
15. *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](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(99)00243-3)

16. *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](https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)00432-3)
17. *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.*
18. *Livshits A.I., Yuchimchuk A.A.* // *Proc. 11th Int. Conf. on Tritium Science and Technology, Charleston, USA, 2016.*
19. *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>
20. *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](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)80221-8)
21. *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>
22. *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>
23. *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.*
25. *Perinic D., Haas H., Mack A.* // *Fusion Eng. Des.* 1991. V. 18. P. 79.
[https://doi.org/10.1016/0920-3796\(91\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0920-3796(91)90111-3)
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>