УДК 621.039.637

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ УСТАНОВКИ ТСП ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ИГНИТОР

*М.Л. Субботин¹, А.А. Гостев², И.О. Анашкин¹, А.М. Белов¹, И.В. Левин¹, Б.Н. Колбасов¹,
Е.А. Колесникова¹, В.Л. Кравчук¹, С.Г. Мальцев¹, А.В. Николаев¹, Е.А. Филимонова¹*

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

Проект Игнитор является одной из главных тем долгосрочного научного сотрудничества между Российской Федерацией и Италией. В настоящее время ведутся переговоры по разработке технического проекта токамака Игнитор с его размещением на площадке АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (ТРИНИТИ), г. Москва, Троицк. Токamak Игнитор будет существенно отличаться от других проектируемых в настоящее время токамаков. В нём будет сверхсильное магнитное поле (13 Тл), в котором при импульсном разряде (около 10 с) будет протекать ток 11 МА. Омический нагрев — основной механизм зажигания термоядерной реакции. На основании обследования состояния практически всех основных элементов энергетической и инженерной инфраструктуры экспериментально-стендового комплекса «Токamak с сильным полем» (ТСП) ТРИНИТИ, включая стационарные и импульсные системы электроснабжения, вакуумные, криогенные, топливные системы и диагностический комплекс, и анализа технических требований к системам жизнеобеспечения токамака Игнитор были разработаны технические предложения по модернизации этого экспериментально-стендового комплекса для решения задач проекта Игнитор.

Ключевые слова: токамак Игнитор, ТСП ТРИНИТИ, сотрудничество РФ и Италии, модернизация, энергетическая и инженерная инфраструктура.

STATUS AND OBJECTIVES OF FACILITY TSP INFRASTRUCTURE MODERNIZATION FOR THE IGNITOR PROJECT

*M.L. Subbotin¹, A.A. Gostev², I.O. Anashkin¹, A.M. Belov¹, I.V. Levin¹, B.N. Kolbasov¹, E.A. Kolesnikova¹,
V.L. Kravchuk¹, S.G. Maltsev¹, A.V. Nikolaev¹, E.A. Filimonova¹*

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²JSC «SRC RF TRINITI» (State Corporation «Rosatom»), Moscow, Troitsk, Russia

The Ignitor tokamak nuclear fusion research project is one of the most ambitious initiatives undertaken under the long-term scientific cooperation program between the Russian Federation and the Italian Republic. Currently, negotiations are underway to develop the engineering design of the Ignitor tokamak, to be built at the JSC «SRC RF TRINITI» site in Troitsk urban district of Moscow. Ignitor differs essentially from other tokamaks that are under development. It will have a super high magnetic field of 13 T, in which a powerful plasma current (11 MA) will occur at an about 10 s pulse discharge. A fusion reaction will be ignited mainly by ohmic heating. Based on the inspection of practically all the main elements of the energy and supporting infrastructure of the TRINITI High-Field Tokamak (HFT) experimental and test facility, including steady-state and pulsed power supply systems, vacuum, cryogenic, fuel systems and diagnostic equipment, as well as examination of the Ignitor tokamak technical requirements for the tokamak life-support systems, the proposals for modernizing the experimental and test facility of HFT TRINITI for Ignitor project tasks were developed.

Key words: tokamak Ignitor, complex HFT TRINITI, collaboration between RF and Italy, modernization, power and engineering infrastructure.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-31-47

ВВЕДЕНИЕ

Мировые центры термоядерных исследований наряду с научной и технологической поддержкой программы ИТЭР продолжали анализировать и исследовать возможности зажигания реакций термоядерного синтеза в компактных токамаках. Только в сильных магнитных полях можно устойчиво инициировать и поддерживать токи, необходимые для нагрева плазмы до термоядерных температур. С этой целью в США строились и изучались более 30 лет токамаки серии Alcator. В Италии во Фраскати (ENEA) проводились эксперименты на токамаках с сильным полем FT (Frascati Tokamak) и FTU (Frascati Tokamak-Upgraded). В СССР в ТРИНИТИ (г. Троицк) проводились эксперименты на токамаке с сильным полем (ТСП).

Судьба токамака ТСП так же, как и токамака Т-15, сложилась весьма драматично в силу объективных причин, связанных с распадом Советского Союза и, как следствие, отсутствием финансирования на реализацию программы научных исследований. На токамаках Alcator C-Mod и FTU проводились интен-

сивные научные исследования, результаты которых внесли существенный вклад в развитие научных представлений и технических решений, в мировые исследования по управляемому термоядерному синтезу. Эксперименты и теоретический анализ показали перспективность этого подхода к решению проблемы УТС с магнитной термоизоляцией в токамаках, которые в этом случае будут значительно компактнее.

К концу 2016 г. программа исследований на токамаке Alcator C-Mod была завершена и токамак выведен из эксплуатации. Судьба токамака FTU, работающего с 1990 г., также была предрешена. Казалось, что направление исследований на токамаках с сильным полем и высокой плотностью плазмы завершает своё существование. Однако на рубеже 2018—2019 гг. произошли события, кардинальным образом изменившие ситуацию на этом направлении исследований.

В Италии на правительственном уровне было принято решение, поддержанное европейской ассоциацией EUROfusion, о проектировании и сооружении токамака DTT (Divertor Testing Tokamak) с геометрическими размерами, вдвое превышающими параметры токамака FTU: большой радиус $R = 2,10$ м, малый радиус $a = 0,65$ м, максимальный ток разряда $5,5$ МА, тороидальное поле $B_t = 6,0$ Тл (в максимуме $11,8$ Тл), длительность импульса $90,0$ с, суммарная дополнительная мощность, вводимая в плазму, 45 МВт. Утверждено место размещения токамака DTT — Исследовательский центр Фраскати (Рим, Италия). В 2019 г. должен быть объявлен первый тендер на поставку оборудования для токамака DTT. Строительство планируется завершить в 2022—2023 гг., начало экспериментальных исследований в 2025 г. [1, 2].

Примерно в это же время представители Института физики плазмы Чешской академии наук (Прага, Чехия) объявили о начале реализации проекта токамака COMPASS Upgrade, который представляет собой продолжение линии компактных токамаков с сильным полем (токамаки Alcator C-Mod) с параметрами: большой радиус $R = 0,84$ м, малый радиус $a = 0,28$ м, дивертор snow-flake, максимальный ток разряда $2,0$ МА, тороидальное поле $B_t = 5,0$ Тл, длительность импульса $1,0—5,0$ с, суммарная дополнительная мощность, вводимая в плазму, $8—9$ МВт, рабочая плотность плазмы $\sim 10^{20}$ м³. Начало экспериментальных исследований на токамаке COMPASS Upgrade планируется на 2021 г. [3, 4].

В марте 2018 г. Массачусетский технологический институт (MIT) и его дочерняя компания Plasma Science&Fusion Center (PSFC), с одной стороны, и частная компания Commonwealth Fusion Systems (CFS) объявили о начале работ по проекту SPARC — нового поколения экспериментальных термоядерных компактных токамаков для выработки электричества. Это стало возможным благодаря успехам MIT в разработке высокотемпературных сверхпроводников типа YBCO (рабочая температура 90 К). Проект SPARC опирается на результаты исследований на токамаке Alcator C-Mod и результаты проектирования токамака Игнитор и представляет собой компактный токамак с параметрами: большой радиус $R = 1,65$ м, малый радиус $a = 0,50$ м, тороидальное поле $B_t = 12,0$ Тл, длительность импульса $10,0$ с, рабочая плотность плазмы $\sim 10^{21}$ м³, предполагаемая выделяемая термоядерная мощность порядка $50—100$ МВт. В настоящее время итальянской энергетической компанией Eni выделено на исследования в развитие проекта SPARC порядка 50 млн Евро [5, 6].

Всё сказанное означает новый шаг в развитие исследований на компактных токамаках с сильным полем и высокой плотностью.

ТОКАМАК ИГНИТОР

Проект токамака Игнитор. В течение многих лет профессор Бруно Коппи и его сотрудники разрабатывали теорию эксперимента по зажиганию. Основной целью проекта токамака Игнитор является достижение условий воспламенения реакции термоядерного синтеза в плазме только омическим нагревом мощным тороидальным током [7—18].

Проект токамака Игнитор является принципиальным шагом на пути создания компактных токамаков с высоким удельным термоядерным энерговыделением только за счёт омического нагрева плазмы. Преимуществом токамаков такого типа является практически полное отсутствие сложных и дорогих систем дополнительного нагрева плазмы, что существенно снижает стоимость и повышает надёжность реакторов.

Это многообещающий инновационный проект, использующий системы с сильным магнитным полем и мощным током. Теоретически этот проект близок основополагающей идее Тамма—Сахарова о

возможности достижения термоядерной реакции только за счёт сжатия плазмы магнитным полем до достижения необходимой температуры и плотности плазмы.

Принципиальной целью проекта токамака Игнитор является достижение условий зажигания термоядерной реакции в плазме только омическим нагревом с помощью мощного тороидального тока без использования систем дополнительного нагрева. Увеличение магнитных полей позволяет сохранить высокое давление плазмы и соответственно повысить плотность плазмы. Увеличение плотности плазмы на порядок увеличивает относительный выход термоядерных реакций на два порядка, которые, в свою очередь, делают возможным значительное уменьшение геометрических размеров токамака при том же термоядерном энергетическом выходе.

Успех в экспериментах по зажиганию термоядерных реакций омическим нагревом плотной плазмы при использовании сильного магнитного поля и мощного разрядного тока плазмы позволит развивать новое направление токамаков-реакторов, которые по сравнению с «классическими» концепциями токамаков будут:

- более компактными, потому что будут работать с плазмой более высокой плотности;
- существенно менее затратными, потому что не нуждаются в сложных и дорогих системах дополнительного нагрева, таких как мощные инжекторы нейтральных атомов, гиротроны, мощные ВЧ-системы.

Основные положения проекта токамака Игнитор основаны на следующих теоретических и физических предпосылках:

— возбуждение интенсивных термоядерных реакций в равнокомпонентной смеси дейтерия и трития происходит при достижении максимального тока, возбуждаемого центральным соленоидом, при относительно малом β_p ;

— ограниченная ВЧ-мощность, излучаемая несколькими антеннами в токамаке, используется для управления профилями тока и контроля температуры плазмы, а также для облегчения перехода в Н-моду. Основной режим работы токамака — режим Н-моды;

— для большей вертикальной устойчивости используется двухнулевая диверторная конфигурация;

— высокая плотность плазмы позволяет экранировать центральные зоны от поступления тяжёлых примесей, чем обеспечивается требуемая величина $Z_{эф}$. Это связано с тем, что на границе плазменного шнура формируется слой с более высокой плотностью нейтралов и более низкой температурой (продемонстрировано многочисленными экспериментами);

— макроустойчивость плазмы достигается сильными полоидальными магнитными полями (амплитуда до 6,5 Тл). В полоидальной системе будет использоваться ВТСП на основе MgB_2 .

С точки зрения инженерно-физических основ проекта токамака Игнитор следует выделить следующие особенности проекта:

— защита первой стенки выполняется молибденовыми тайлами, которые одновременно служат тороидальным лимитером. Предполагается, что поток на стенки не превышает $1,8 \text{ МВт/м}^2$;

— электромагнитная система токамака изготавливается из чистой меди, охлаждённой до температуры 30 К, которая соответствует оптимальному соотношению электросопротивления и удельной теплоёмкости чистой меди;

— огромные электромагнитные и термомеханические усилия компенсируются самоподдерживающейся конструкцией и выбором соответствующих конструкционных материалов;

— для возбуждения тока используется центральный соленоид с сильным полем (более 14 Тл).

Общий вид токамака Игнитор и поперечное сечение представлены на рис. 1.

Технические параметры токамака Игнитор:

Большой радиус R , м . . .	1,32
Малый радиус a , b , м . . .	0,47, 0,86
Вытянутость k . . .	1,82
Треугольность δ . . .	0,4
Объём плазмы V , м^3 . . .	10
Площадь поверхности плазмы S , м^2 . . .	34

Рис. 1. Схематический разрез токамака Игнитор и основные элементы конструкции

Длительность импульса, с . . .	4 + 4
Ток плазмы I_p , МА . . .	11
Тороидальное поле B_T , Тл . . .	13
Полоидальный ток I_θ , МА . . .	8
Среднее полоидальное поле, Тл . . .	3,5
Периферийный фактор безопасности q_ψ . . .	3,5
Мощность ионно-циклотронного нагрева P_{ICRH} , МВт . . .	18

Российско-итальянское сотрудничество по проекту токамака Игнитор. Активная фаза сотрудничества началась с 3 декабря 2009 г., когда во время шестого раунда российско-итальянских расширенных Межгосударственных консультаций под председательством Президента РФ Д.А. Медведева и Председателя Совета министров Италии С. Берлускони (Рим) было принято решение о создании проекта токамака Игнитор. 26 апреля 2010 г. по поручению Правительства Российской Федерации в Милане был подписан Меморандум о намерениях между Министерством образования и науки Российской Федерации и Министерством образования, университетов и научных исследований Итальянской Республики о сотрудничестве в области создания токамака Игнитор и других инициатив в области ядерной физики.

В мае 2012 г. решением Правительства Российской Федерации ответственными организациями-исполнителями по проекту токамака Игнитор с российской стороны назначены НИЦ «Курчатовский институт» и ГК «Росатом». В ноябре 2012 г. итальянская сторона уведомила об утверждении в качестве организации-исполнителя по проекту токамака Игнитор Национальный институт ядерной физики (INFN).

26 ноября 2013 г. (в Триесте) во время проведения Российско-Итальянского саммита на высшем уровне состоялась встреча министра образования и науки Российской Федерации Д.В. Ливанова и министра образования, университетов и научных исследований Итальянской Республики Марии К. Кароццо, на которой принято решение о дальнейшем продвижении совместного российско-итальянского проекта токамака Игнитор. Результатом принятого решения стало письмо министра образования, университетов и научных исследований Итальянской Республики Марии К. Кароццо (январь 2014 г.) к министру образования и науки Российской Федерации Д.В. Ливанову с предложением о создании совместной Российско-Итальянской рабочей группы по разработке концептуального проекта токамака Игнитор.

В течение 2014 г. такая совместная рабочая группа была сформирована и приступила к разработке концептуального проекта токамака Игнитор. 13—15 мая 2015 г. в Национальном институте ядерной физики состоялось заключительное заседание российско-итальянского Редакционного комитета, на котором был утверждён окончательный текст концептуального проекта токамака Игнитор, который был в последующем одобрен Министерством образования и науки Российской Федерации и Министерством образования, университетов и научных исследований Итальянской Республики.

В 2017—2018 гг. Министерство образования и науки Российской Федерации предоставило АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» субсидию на модернизацию инфраструктуры комплекса ТСП под задачи проекта токамака Игнитор.

На совместной пресс-конференции Президента Российской Федерации В.В. Путина и Премьер-министра Италии Джузеппе Конти по итогам переговоров в Москве 24 октября 2018 г. В.В. Путин заявил: «Курчатовский институт и Национальный совет исследований Италии вместе работают над инновационным проектом в области термоядерного синтеза и созданием в Троицке экспериментального токамака Игнитор».

Итальянская сторона официально уведомила российскую сторону, что ответственной организацией за реализацию проекта Игнитор с итальянской стороны вместо ранее назначенного Национального института ядерных исследований назначен Национальный совет исследований Италии.

Анализ основных технических параметров токамака Игнитор и характеристик поддерживающей энергетической и инженерно-физической инфраструктуры. Подробный анализ технических требований, предъявляемых проектом токамака Игнитор к инфраструктуре площадки размещения, представлен в работе [19] и основан на данных опубликованных работ, содержащих описание технических систем токамака Игнитор [20—27]. Это позволяет сформировать достаточно целостное представление о совокупном количестве необходимых энергетических и инженерно-физических поддерживающих систем, которые должны быть включены в состав обеспечивающей инженерно-физической и энергетической инфраструктуры экспериментально-стендового комплекса площадки размещения токамака Игнитор, а также получить начальные данные о технических параметрах этих систем, которые в данной

работе будут рассматриваться как уже определённые. Это позволяет перейти к анализу текущего состояния инженерно-физической и энергетической инфраструктуры комплекса ТСП АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и сформулировать предложения по его модернизации под задачи проекта токамака Игнитор.

Экспериментально-стендовый комплекс токамака Игнитор. Габаритные размеры комплекса токамака Игнитор, располагаемые внутри экспериментального зала, исходя из анализа опубликованных данных, предположительно имеют следующие приблизительные параметры:

- вакуумная камера по наружному диаметру около 3,5 м;
- наружный диаметр криостата около 8,0 м;
- длина пеллет-инжектора за пределами криостата около 6,0—7,0 м;
- длина робототехнического комплекса для системы удалённого обслуживания на половине длины среднего радиуса вакуумной камеры около 15,0 м (предполагается использование двух диаметрально расположенных робототехнических систем);

- для ввода топлива используется импульсный газонапуск, для управления профилем тока и подпитки топливом — многоимпульсная высокоскоростная (более 4 км/с) пеллет-инжекция, что позволяет пикировать плотность плазмы;

- все компоненты электромагнитной системы токамака помещаются в криостат и охлаждаются газообразным гелием. Подготовка охлаждающего компонента (жидкий гелий) осуществляется на гелиевом заводе, расположенном непосредственно рядом с площадкой размещения токамака Игнитор;

- создание топливной смеси и очистка тритийсодержащих отходов реализуются с помощью тритиевой системы, являющейся элементом экспериментально-стендового комплекса токамака Игнитор так же, как и система удалённого робототехнического обслуживания внутрикамерных элементов.

Экспериментально-стендовый комплекс токамака Игнитор является по своим инженерно-физическим и энергетическим характеристикам одним из самых уникальных инженерно-физических проектов в мире.

Проект токамака с сильным полем (ТСП). В России под руководством академиков Е.П. Велихова и Б.Б. Кадомцева был осуществлён проект под названием «Токамак с сильным полем» (токамак ТСП), в котором использован механизм адиабатического сжатия плазмы, когда под воздействием нарастающего магнитного поля плазма перемещается в специально спрофилированной разрядной камере из области с большим объёмом в область с меньшим объёмом, т.е. объём плазмы уменьшается и соответственно одновременно растут плотность и температура плазмы. Проект токамака ТСП был предназначен для изучения физических процессов в режимах, близких к зажиганию термоядерных реакций, методов дополнительного нагрева плазмы (ионно-циклотронный нагрев, пучки быстрых атомов), разработки технологии работы с тритийсодержащим рабочим газом. Основные проектные физические параметры ТСП представлены в табл. 1 [28].

Т а б л и ц а 1. Проектные физические параметры токамака ТСП

Параметр	Режим работы		
	До сжатия	После сжатия по малому радиусу	После сжатия по большому радиусу
Объём плазмы, м ³	2,14	0,856	0,13
Большой радиус, м	1,06	1,06	0,415
Малый радиус, м	0,32	0,2	0,128
Тороидальное поле на оси плазмы, Тл	2,0	5,0	12,8
Средняя плотность плазмы, м ⁻³	5×10^{19}	$1,3 \times 10^{20}$	8×10^{20}
Время удержания, мс	50	125	10
Ток разряда, МА	0,48	0,48	1,23

Токамак ТСП является первым действующим токамаком с сильным тороидальным полем (13 Тл), предназначенным для достижения условий, когда мощность, выделенная в термоядерной реакции, превышает мощность, затрачиваемую на нагрев плазмы до термоядерных температур. Экспериментально-стендовый комплекс ТСП был создан для обеспечения исследований на токамаке

Рис. 2. Общий вид токамака ТСП

ТСП и включал в себя все необходимые технологические, физические и энергетические системы. Это большая научно-экспериментальная база, обладавшая такими энергетическими и экспериментальными возможностями, которая на тот момент не имела аналогов ни в СССР, ни в мире. В декабре 1987 г. на площадке ТРИНИТИ был осуществлён физический пуск токамака ТСП — экспериментальной установки, предназначенной для достижения зажигания реакции управляемого термоядерного синтеза. Общий вид токамака ТСП показан на рис. 2 [28].

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСА ТСП

Инженерно-энергетический и экспериментально-стендовый комплекс токамака ТСП. Термоядерный комплекс ТСП является крупной научно-исследовательской и экспериментальной базой и предназначен для работы с термоядерными установками предреакторного масштаба и сверхмощными источниками мягкого рентгеновского излучения, а также для испытаний уникальных энергетических и электротехнических систем и аппаратуры, экспериментального моделирования мощных энергосистем. Общая площадь зданий и сооружений экспериментальной базы комплекса составляет 73 480 м². В главном экспериментальном корпусе имеется экспериментальный зал площадью 2000 м² с биологической

Рис. 3. Общая схема комплекса зданий термоядерного комплекса ТСП

защитой, позволяющей работать в условиях мощных ионизирующих излучений с использованием водорода, дейтерия и трития, тритиевой лабораторией для подачи в токамак тритиевого топлива требуемой чистоты, системой утилизации и специальной вентиляции. Общая схема комплекса зданий термоядерного комплекса ТСП представлена на рис. 3 [28, 29, 30].

Энергетическая инфраструктура комплекса ТСП. Энергетическая инфраструктура (энергокомплекс) комплекса ТСП включает четыре электромашинных агрегата кратковременного действия с маховиками (ударные генераторы)

ТКД-200 мощностью 200 МВт, 12 кА, 10 кВ, четыре ТКД-200 40 кА, 500—600 МВт, трансформаторную подстанцию из 16 трансформаторов понижающего типа, блоков тиристорных выпрямителей-преобразователей, высокоёмких индуктивных накопителей до 1000 МДж, ёмкостных накопителей до 10 МДж, силовых шинно-кабельных галерей, систем силовой высоковольтной защиты и др.

Экспериментально-стендовая база комплекса ТСП. Экспериментально-стендовая база комплекса токамака ТСП включает в себя:

- установку Трек, предназначенную для исследования дугового разряда в различных средах, разработки и испытания магнитных накопительных систем и коммутирующей аппаратуры для систем импульсного питания термоядерных установок (1 ГДж, 700 кА);

- установку Инжектор, стенд ЭГИ-1, на которых проводились работы по исследованию проблем ввода топлива в термоядерные установки, а также по исследованию физики метания твёрдых тел с малой массой (топливные таблетки);

- стенд ионно-циклотронного нагрева плазмы токамака;

- стенды нейтронной, оптической, инженерной диагностики и ряда других физических диагностик для тестирования исследования разрабатываемых диагностик для программ по УТС и по проекту ИТЭР;

- тритиевую лабораторию;
- систему форвакуумной откачки;
- систему детритизации отходов;
- систему откачки вакуумной камеры;
- систему обезгаживающего прогрева вакуумной камеры;
- систему чистки вакуумной камеры тлеющим разрядом;
- систему водяного охлаждения;
- систему газонапуска;
- систему спецвентиляции, кондиционирования воздуха и общеобменной вентиляции.

Комплекс физической и технологической диагностик комплекса ТСП. В состав комплекса физической и технологической диагностик токамака ТСП входят:

— электромагнитная диагностика в основной своей части является неотъемлемой частью как электромагнитной системы, так и самой вакуумной камеры токамака. Датчики электромагнитной диагностики используются как в качестве первичных датчиков систем организации и управления формой и положением плазменного шнура, так и для регистрации МГД-активности плазмы токамака. Для задачи организации и управления формой и положением плазменного шнура используются «медленные» датчики (с полосой ~10—100 кГц), для регистрации МГД-активности — «быстрые» (с полосой более 100 кГц);

— на токамаке ТСП были предусмотрены как распределённые, так и локальные магнитные измерения: пояса Роговского (внутри и снаружи вакуумной камеры токамака в нескольких полоидальных сечениях), 3-компонентные локальные магнитные зонды (зонды Мирнова), расположенные вдоль полоидального обхода вакуумной камеры токамака в нескольких полоидальных сечениях камеры токамака и регистрирующие тангенциальный и нормальный компоненты магнитного поля тока плазменного шнура, третий компонент регистрировал изменение тороидального магнитного поля для корректировки on-line-сигналов тангенциального и нормального компонентов магнитного поля тока плазменного шнура на изменение тороидального поля токамака в локальной области размещения 3-компонентного магнитного зонда, седловые катушки, датчики напряжений обхода, датчики вертикального/горизонтального потока магнитного поля, диамагнит, датчик тороидального поля. Наличие перечисленных датчиков является предпочтительным. На современном этапе проведения эксперимента нет необходимости в использовании 3-компонентных локальных магнитных зондов, достаточно только 2-компонентных (тангенциальный и нормальный компонент) магнитных зондов, так как скорость регистрации (частота АЦП) является достаточной, чтобы «удалить» из этих компонентов тороидальный составляющий численными методами при обработке экспериментальных сигналов;

— корпускулярная диагностика (пассивная) на ТСП представлена тремя анализаторами — масс- и энергоспектрометрами для анализа потоков атомов перезарядки водорода, дейтерия, выходящих из плазмы. Принцип работы анализаторов основан на обдирке поступающих в него нейтральных частиц с последующим анализом вторичных ионов в магнитном и электрическом полях. Состав: 10-канальный анализатор «Лакмус» (камера обдирки потока атомов в газе, ВЭУ-6), 88-канальный анализатор «Эльф» (каналовые умножители, микроканальные пластины) и одноканальный анализатор «Аккорд», осуществляющий сканирование («трещётка») по энергии. Регистрация данных возможна как в счётном, так и в токовом режиме. В первом случае использовались счётчики, во втором — АЦП;

— СВЧ-интерферометрия на базе СВЧ-интерферометра ФИРН-М, работающего в диапазоне $\lambda \approx 2$ мм, в качестве генератора использовалась лампа обратной волны ЛОВ-095 (ЛОВ-2П);

— ЭЦИ-диагностика — спектральное разрешение ~3 ГГц, время регистрации одной интерферограммы ~7 мс, спектральный диапазон быстросканирующего фурье-спектрометра (БФС) 30—600 ГГц. Система цифровой регистрации интерферограмм для БФС осуществлялась ИВК-20: максимальное количество выборок четырёх временных точек с программно-регулируемым временным интервалом, минимальный период оцифровки 10 мкс, разрядность АЦП 11 бит;

— СММ-интерферометрия на базе субмиллиметрового HCN-лазера с ВЧ-накачкой, СММ-приёмник на основе n -InSb;

— ИК-интерферометрия. Состав: одночастотные CO₂-лазеры ЛГ-74 и «Каштан-1» мощностью ~3 и ~11 Вт соответственно, в качестве ИК-приёмников могли использоваться соединения КРТ Ge:Au, быст-

родействующий преобразователь «фаза—напряжение» (максимальная частота сигнала $f \approx 800$ кГц, минимальная частота сигнала ≈ 50 кГц, минимальный уровень сигнала 60 мВ, время преобразования $1/f$);

— рентгеновская диагностика включает в себя измерения потоков мягкого рентгеновского излучения (блок детектирования CdTe), измерения потоков жёсткого рентгеновского излучения, измерения энергетических потерь плазмы блоком детектирования с пироматериалом ЦТС-19 (коэффициент преобразования предусилителя 10^7 В/А, полоса пропускания 1 кГц, чувствительность 5 В/Вт);

— флуоресцентная диагностика примесей металлов на базе лазера на красителях с накачкой второй гармоникой лазера на кристалле АИГЖ: Nd^{3+} , мощность излучения на резонансной линии железа ($\lambda = 302$ нм) ~ 15 кВт, длительность импульса 5 нс, спектральная ширина линии генерации $\sim 0,03$ нм, частота импульсов 1 кГц;

— спектроскопия [31]. Измерения проводились с помощью спектрометра высокого разрешения видимого диапазона (производство «Мак-Петерсон» и «Дженерал Атомикс»). Регистрация осуществлялась по восьми пространственным хордам, область спектра $20 \text{ \AA}$ в районе линии СШ $4647 \text{ \AA}$ во втором порядке дифракции. Базовым спектральным прибором является спектрометр-монокроматор Черни—Тернера с фокусным расстоянием 1 м.

Измерение и контроль температуры разрядной камеры и диафрагм токамака ТСП предполагалось осуществлять с помощью термопар и ИК-датчиков.

Установки ТСП и Т-15 создавались в СССР примерно в одно время и имели схожие диагностические комплексы для решения сходных экспериментальных и научно-исследовательских задач. Сравнительный перечень диагностик на токамаках Т-15 и ТСП представлен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Список диагностик на ТСП и Т-15

Диагностика	ТСП	Т-15
Электромагнитная диагностика	+	+
Измерение $Z_{\text{эф}}$	+	+
Болометрическая диагностика на базе пирозлектрических кристаллов	+	+
Болометрическая диагностика на базе кремниевых XUV-фотодиодов		+
Мягкий рентген камеры-обскуры		+
Мягкий рентген спектрометра	+	+
Электронно-циклотронное излучение		+
Диагностика надтеплого рентгеновского излучения		+
Гетеродинный корреляционный рефлектометр		+
Рефлектометр для измерения профиля плотности плазмы со стороны сильного магнитного поля		+
Томсоновское рассеяние	+	+
Монитор жёсткого рентгеновского излучения	+	+
Нейтронная диагностика	+	+
Корпускулярная диагностика на основе многоканальных анализаторов	+	+
СВЧ-интерферометр	+	+
Ленгмюровские зонды	+	+
Тяжелый пучок		+
Литиевый пучок		+
Измерение профиля ионной температуры методом ионной перезарядки на диагностическом нейтральном пучке		+
Измерение профиля ионной температуры методом ионной перезарядки на нагревном нейтральном пучке		+
Дейтериевый пеллет-инжектор		+
Примесный пеллет-инжектор		+
Система индикации замыкания элементов установки	+	+

Комплекс средств передачи и обработки данных установки ТСП. Комплекс создавался на базе информационно-вычислительного комплекса ИВК-20, который состоял из ЭВМ и нескольких крейтов КАМАК, работающих под управлением этой ЭВМ. Управление диагностиками, регистрация экспериментальных данных осуществлялись с помощью модулей КАМАК (АЦП, ЦАП, счётчики, генераторы, таймеры, вх./вых. регистры и др.). Так как скорости преобразования (аналог-код) АЦП были невысоки, зачастую использовались несинхронные системы регистрации (мультиплицированием по каналам), то для обеспечения синхронности сбора данных широко использовались устройства выборки-хранения (УВХ). В качестве ЭВМ использовалась СМ-4 (операционная система реального времени RSX-11, разрядность 16 бит, оперативная память 64 кБ). Практически сразу после физического пуска токамака ТСП ЭВМ СМ-4, которые работали в составе комплекса ИВК-20, заменили на персональные компьютеры

IBM PC-286 (операционная система MS DOS, разрядность 20 бит, оперативная память 1 МБ). Сигналы диагностик транспортировались, в основном, по кабелю РК-50 и в некоторых случаях по витой паре в диагностическую и технологическую пультовые, в которых размещались комплексы ИВК-20 / IBM PC-286, сопряжённые с оборудованием КАМАК (до четырёх крейтов КАМАК на один IBM PC-286).

Комплекс вакуумной откачки экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП. Комплекс включает в себя комплекты форвакуумного и высоковакуумного оборудования, запорную арматуру, диагностические приборы, трубопроводную часть (Ду-250) и пультовую комнату.

Форвакуумная часть комплекса вакуумной откачки экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП. Форвакуумная часть расположена в зале форвакуумных насосов. В зале установлены 11 форвакуумных насосов, конструктивно объединённых в пять форвакуумных групп:

— группа 1 — насос АВЗ-180, который откачивает вакуумную магистраль, расположенную в помещении 167 (экспериментальный зал с биологической защитой);

— группа 2 — три насоса АВЗ-63Д, которые предназначены для работы в составе блоков высоковакуумной откачки типа БВО. Эта группа насосов откачивает три магистрали;

— группа 3 — три насоса АВЗ-63Д, которые предназначены для работы в составе блоков высоковакуумной откачки типа БОД (блок откачки диагностики). Эта группа насосов откачивает три магистрали труб;

— группа 4 — три насоса АВЗ-63Д, которые предназначены для работы в составе блоков высоковакуумной откачки типа БОИ (блок откачки инжектора). Эта группа насосов откачивает три магистрали труб;

— группа 5 — насос АВЗ-63Д, который предназначен для резерва и для работ со вспомогательным оборудованием. Эта группа насосов откачивает одну магистраль.

Высоковакуумная часть комплекса вакуумной откачки экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП. Высоковакуумная часть состоит из трёх групп:

— группа 1 — три блока БВО (два насоса ТМН-1500 и два затвора ЗПТ-250);

— группа 2 — три блока БОД (насос ТИН-450 и затвор ЗПТ-160);

— группа 3 — четыре блока БОИ (насос ТМН-1500 и затвор ЗПТ-250).

Общее управление всем оборудованием осуществляется дистанционно из пультовой. В пультовой расположены стойки управления БВО, БОД, БОИ и зал форвакуумных насосов с приборами контроля вакуума. Высоковакуумная часть (турбомолекулярные насосы, диагностика) и пультовая нуждаются в доработке. Несмотря на устаревшее оборудование, даже в настоящее время на этом оборудовании возможно достичь суммарной скорости откачки до 8000 л/с.

Перечень технологического оборудования высоковакуумной системы откачки экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП:

— высоковакуумный турбомолекулярный насос АТР 900 с воздушным охлаждением в комплекте с контроллером и блоком питания — 6 шт.;

— сверхвысоковакуумный затвор DN200 CF-F — 6 шт.;

— вакуумметр 972B Dual Mag с блоком питания и индикации PDR 900 — 4 шт.;

— квадрупольный масс-спектрометр E-vision2 — 2 шт.;

— вакуумный откачной пост дежурной откачки HiCube 300 Pro — 1 шт.;

— течейскаль гелиевый масс-спектрометрический ТИ1-50 с форвакуумным насосом в комплекте — 1 шт.

Импульсная система газонапуска экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП [29]. Система газонапуска комплекса токамака ТСП обеспечивает регулируемый поток газа в токамак через два противоположных горизонтальных патрубка камеры токамака ТСП. Блок управления имеет пять программируемых ступеней произвольной амплитуды (80—350 В) и длительности (суммарное время всех ступеней 1,2 с):

— параметры потока: 0,4—2,5 Вт ((1—6)10²⁰ м/с) по воздуху (азоту); 1—7 Вт ((2,5—16)10²⁰ м/с) по дейтерию;

— максимальное время импульса 1,2 с;

— относительная погрешность задачи потока ≤20—25%;

— при числе срабатываний до 500 (или при хранении в течение 2—3 мс) величина течи через клапан ≤10⁻⁵ Вт;

— измерение расхода газа производится термоамперметром постоянной температуры с погрешностью ~25%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСПЕКЦИИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТЕНДОВОГО КОМПЛЕКСА ТСП ПОД ПРОЕКТ ИГНИТОР

Система электропитания. Система электропитания комплекса ТСП, включая стационарное питание от сети и импульсное питание от ударных генераторов, индуктивных накопителей и конденсаторных батарей, находится в рабочем состоянии и в целом соответствует требованиям проекта Игнитор, но требуется локальная модернизация в части оборудования.

Система вакуумной откачки. Проведены исследования состояния системы вакуумной откачки комплекса ТСП. Инспекция системы форвакуумной откачки комплекса вакуумной откачки экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП показала, что насосное оборудование есть в наличии, для запуска оборудования в работу необходимо выполнить следующие работы:

- ревизия оборудования форвакуумных насосов и запорной арматуры;
- замена силовых шкафов управления насосами и задвижек с электроприводами;
- замена шкафов дистанционного управления и сигнализации насосами и задвижек с электроприводами.

Современное состояние системы высоковакуумной откачки (турбомолекулярные насосы, диагностика) находится в рабочем состоянии. Несмотря на устаревшее оборудование, на комплексе возможно достичь суммарной скорости откачки до 8000 л/с, указанной в технических требованиях по проекту токамака Игнитор. Однако необходимо иметь в виду, что на этом оборудовании и при существующей конфигурации системы вакуумной откачки решить поставленные задачи по обеспечению комплекса токамака Игнитор нельзя, необходимы глубокая модернизация и структуризация системы вакуумной откачки комплекса под задачи проекта токамака Игнитор.

По своей структуре система высоковакуумной откачки (СВО) должна состоять из системы форвакуумной и высоковакуумной откачки, вакуумманометрической и масс-спектрометрической измерительных систем, системы автоматического и дистанционного управления, систем электро- и водоснабжения. СВО предназначена для решения следующих задач: организация безмасляной откачки разрядной камеры и криостата, откачки больших потоков рабочего газа из разрядной камеры и оптимизации системы предварительной откачки вакуумных объектов.

Система вакуумной откачки комплекса для решения задач проекта токамака Игнитор должна включать:

- системы предварительной откачки;
- системы вакуумно-технологического цикла;
- системы вакуумной откачки, предназначенные для работы с плазменным разрядом при использовании в качестве рабочего газа трития.

Рис. 4. Блок-схема системы вакуумной откачки: I, II, III, IV — четыре одинаковые группы вакуумных насосов; 1 — турбомолекулярный насос; 2 — криосорбционный насос; 3 — геттерный насос; 4 — система предварительной откачки

Блок-схема системы вакуумной откачки представлена на рис. 4.

Система предварительной откачки. Система предназначена для откачки вакуумной камеры с атмосферного давления до давления 10^{-3} — 10^{-4} торр.

Система вакуумно-технологического цикла. Система предназначена для работы с плазменным разрядом на основе водорода и дейтерия и создания в вакуумной камере давления $1 \cdot 10^{-9}$ торр, а также для работы в режиме кондиционирования поверхности камеры в тлеющем разряде активных и инертных газов, в режиме вакуумной тренировки камеры и режиме поиска течей.

В качестве основных насосов системы вакуумно-технологического цикла предполагается использовать турбомолекулярные и криосорбционные насосы.

Система для работы с тритиевым плазменным разрядом. При работе с тритиевым плазменным разрядом предполагается использовать насосы с нераспыляемым геттером, где отработанный газ связывается материалом геттера и может быть извлечён из него только в режимах дегазации.

Откачка разрядной камеры. В настоящее время для решения задач проекта токамака Игнитор рассматриваются два типа высоковакуумной откачки:

— турбомолекулярная откачка с суммарной производительностью ~ 3000 л/с. Форвакуумная откачка каждого ТМН производится со скоростью $75 \text{ м}^3/\text{ч}$ (21 л/с), предельный вакуум $2 \cdot 10^{-3}$ мбар;

— криогенная откачка вакуумного объёма камеры осуществляется двумя крионасосами, скорость откачки по азоту 2400 л/с , по дейтерию 4000 л/с , предельный вакуум 10^{-9} мбар.

Откачка криостата. Турбомолекулярная откачка криостата производится четырьмя безмасляными насосами ТМН суммарной производительностью $\sim 3000 \text{ л/с}$, присоединёнными к криостату в четырёх сечениях с помощью вакуумной арматуры и трубопроводов и удалённых на расстояние не менее 5 м для предотвращения влияния на их работоспособность магнитных полей. Форвакуумная откачка каждого ТМН производится безмасляным форвакуумным насосом производительностью $\sim 20 \text{ л/с}$.

Водяное охлаждение вакуумного оборудования. Охлаждение вакуумного оборудования должно производиться как дистиллированной (5 атм.), так и речной (4 атм.) водой. Соответственно суммарные расходы должны составлять $\sim 5 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\sim 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Энергообеспечение вакуумного комплекса. Энергоснабжение должно обеспечиваться от источника 380 В (3 фазы) мощностью до 500 кВт . Должны быть предусмотрены резервные (противоаварийные) источники электропитания.

Система газонапуска. Результаты инспекции системы газонапуска экспериментально-стендового комплекса ТСП показали, что для реализации проекта токамака Игнитор существующая система газонапуска не соответствует и подлежит полной замене. Необходимо иметь в виду, что в опубликованных работах данные о системе подачи рабочего газа в разрядную камеру токамака Игнитор и его компонентах, также как и о принципе подачи рабочего газа, его параметрах и параметрах системы отсутствуют.

Приведённые далее материалы являются результатом аналитической работы, основаны на опыте проекта модернизации установки токамак Т-15 и требуют дальнейшего тщательного анализа и уточнения совместно с итальянскими специалистами — разработчиками проекта Игнитор.

Система газонапуска (ГНС), являясь составной частью системы вакуумной откачки экспериментально-стендового комплекса ТСП-Игнитор, должна обеспечивать подачу рабочих газов (H_2 , D_2 , T_2 , Ar , He) в вакуумную камеру как в рабочих режимах, так и в технологических.

ГНС обеспечивает:

- очистку рабочих газов;
- контроль чистоты напускаемых газов;
- дозированный импульсный напуск рабочего газа или смеси газов;
- стационарный напуск рабочих газов.

Технические характеристики системы газонапуска экспериментально-стендового комплекса ТСП-Игнитор:

Газ Водород, дейтерий, тритий, гелий, аргон, криптон

Длительность работы:

импульсный напуск, с ≤ 10
 стационарный напуск, ч Десятки часов

Расход газа:

импульсный напуск, л-торр/имп $5\text{—}500$
 стационарный напуск, л-торр/с ≤ 5

Функционально ГНС должна состоять из трёх основных частей:

- системы хранения и подачи газов;
- системы распределения газов по объектам;
- системы управления и регистрации параметров.

Система подачи рабочих газов. Система предназначена для проведения режимов плазменного эксперимента и очистки вакуумной камеры с помощью тлеющего разряда. Рабочие газы подаются в вакуумный объём через пьезоэлектрические клапана и должны точно регулироваться в диапазоне до 4 л-торр/с .

Система подачи газов в режиме тлеющего разряда. Рабочими газами при проведении тлеющего разряда являются водород, дейтерий, аргон или другие инертные газы.

При работе с водородом, аргоном или другими инертными газами рабочий газ подаётся от баллонов высокого давления через пьезоэлектрические клапана в вакуумный объём. Регулированием напряжения на пьезоэлектрических клапанах достигается необходимый для проведения режимов уровень вакуума.

Чистота газа в баллонах должна быть не хуже 99,9999%. Подводящие трубопроводы предварительно должны пройти вакуумирование и дегазацию.

При использовании дейтерия в качестве рабочего газа необходимо применять палладиевые фильтры, в которые газ должен поступать от баллона высокого давления. После фильтра дейтерий поступает в буферный объём, соединённый через пьезоэлектрические клапана с вакуумной камерой. Буферный объём и используемые трубопроводы подлежат предварительному вакуумированию и дегазации.

Система подачи трития в режиме плазменного эксперимента. Основным элементом системы подачи трития является накопительный геттер, в который газ закачивается от постороннего источника. Неконтролируемое случайное высвобождение трития из геттера без проведения специальных режимов практически невозможно. Необходимое для проведения плазменных режимов количество трития выделяется путём контролируемого нагрева геттера и подаётся в вакуумную камеру через специальный клапан.

В связи с тем, что тритий является радиоактивным газом, система подачи трития в вакуумную камеру требует специальной разработки и тестирования.

Система очистки поверхностей вакуумной камеры. Для организации тлеющего разряда в вакуумную камеру необходимо ввести электроды тлеющего разряда. Электроды должны обеспечивать равномерное горение разряда внутри камеры и плотность тока ~ 50 мкА/см² поверхности камеры. Поджиг разряда происходит при подаче на электроды напряжения порядка 5 кВ и вакууме в камере 10^{-2} — 10^{-3} торр. Непосредственно очистка поверхностей происходит при вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ торр и напряжении на электродах тлеющего разряда ~ 400 — 500 В.

Система очистки предназначена для очистки непосредственно внутренней поверхности камеры и всех внутрикамерных элементов от адсорбированных в ней газов (пары воды, кислород, азот и др.), а также для удаления с поверхности углеродных и других плёнок с использованием режима тлеющего разряда.

Результатом работы системы очистки является достижение скорости дегазации с поверхности $\sim 10^{-11}$ — 10^{-12} л·торр/(с·см²).

Система очистки поверхностей камеры состоит из двух подсистем:

- системы прогрева вакуумной камеры;
- система очистки поверхности с помощью тлеющего разряда.

Система прогрева вакуумной камеры. Данная система предназначена для удаления адсорбированных в элементах конструкции вакуумной камеры газов, таких как пары воды, кислород, азот и др. Наиболее интенсивная десорбция происходит при температуре прогрева порядка 250—300 °С. Такая температура может быть достигнута путём пропускания нагретого пара, проходящего в каналах, предусмотренных конструкцией камеры, использования омических нагревателей и другими способами. Следует отметить, что прогреву подлежит не только поверхность самой камеры, но и поверхности вертикальных и горизонтальных патрубков, подводящих вакуумных трубопроводов и др. Элементы вакуумной системы должны сохранять работоспособность при достижении заданных температур.

Рис. 5. Сегмент вакуумной камеры токамака Игнитор с проложенными по поверхности вакуумной камеры каналами охлаждения/нагрева

При проведении прогрева в камере и элементах вакуумной системы могут возникать механические напряжения, связанные с неравномерностью прогрева, что может привести к их частичному разрушению. Необходимо провести расчёты на механическую прочность и определить максимально допустимый градиент температур по конструкциям и возможную скорость прогрева.

Система прогрева вакуумной камеры токамака Игнитор. Согласно опубликованным данным [26, 32] предполагается, что вакуумная камера токамака Игнитор будет прогреваться газообразным гелием (давление газа на входе в канал $P_{in} = 1,88$ кПа, расход по потоку $f = 480$ г/с), нагретым до 200 °С в течение 18 ч, через каналы прямоугольного сечения 4×10 мм, проложенные по поверхности вакуумной камеры токамака Игнитор, как показано на рис. 5.

Система очистки поверхности с помощью тлеющего разряда. Система предназначена для удаления с поверхности углеродных и других загрязнений, возникающих при работе установки. Очистка производится путём организации тлеющего разряда в среде водорода, дейтерия, гелия, аргона или других газов.

Для организации тлеющего разряда в вакуумную камеру необходимо ввести электроды тлеющего разряда. Электроды должны обеспечивать равномерное горение разряда внутри камеры и плотность тока ~ 50 мкА на см^2 поверхности камеры. Поджиг разряда происходит при подаче на электроды напряжения порядка 5 кВ и вакууме в камере 10^{-2} — 10^{-3} торр. Изменение вакуума производится путём подачи необходимого газа от системы технологического газонапуска. Непосредственно очистка поверхностей происходит при вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-4}$ торр и напряжении на электроде тлеющего разряда ~ 400 — 500 В. Система вакуумной откачки должна обеспечивать устойчивую длительную работу при таких вакуумных параметрах.

Криогенный комплекс ТСП. Комплекс ТСП не имеет в своём составе криогенного (гелиевого) комплекса, и поэтому для решения задач проекта токамака Игнитор криогенный комплекс должен быть полностью разработан с «нуля».

Учитывая, что проект криогенной системы охлаждения токамака Игнитор, разработанный корпорацией Линде по заказу итальянских разработчиков проекта Игнитор, российской стороне не доступен, для анализа были разработаны собственные предложения, которые должны быть тщательно и детально обсуждены с итальянской стороной.

Криогенная система охлаждения экспериментально-стендового комплекса ТСП-Игнитор должна состоять из криогенной гелиевой системы и криогенной азотной системы.

Гелиевая система криогенного охлаждения. Криогенная гелиевая система включает гелиевый компрессор мощностью 4700 кВт, блок охлаждения и криостатирования со встроенной системой очистки гелия от газообразных примесей воздуха. Массовый расход компрессора составляет 1940 г/с или $41\,993 \text{ м}^3/\text{ч}$, рабочее давление 18 бар, давление всасывания 2,6 бар, расход охлаждающей воды $400 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рис. 6 представлена схема реализации гелиевой криогенной системы.

Рис. 6. Схема реализации гелиевой криогенной системы

Азотная система криогенного охлаждения экспериментально-стендового комплекса ТСП-Игнитор. Система включает в себя азотный ожижитель с блоком турбодетандеров, компрессор производительностью 1700 г/с ($4781 \text{ м}^3/\text{ч}$), давлением нагнетания 15 бар и давлением всасывания 1,03 бар. Предполагаемая потребляемая мощность компрессора до 700 кВт. Расход охлаждающей воды $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Криогенная азотная система предназначена для экранирования гелиевой криогенной системы.

Схема реализации азотной криогенной системы представлена на рис. 7. Криогенная азотная система включает в себя:

- хранилище для жидкого азота;
- ожижитель паров азота;
- центробежные насосы для обеспечения циркуляции азота через криорезистивные обмотки и экраны;
- турбокомпрессор;
- газгольдер.

Рис. 7. Схема реализации азотной криогенной системы

Комплекс физической и технологической диагностик комплекса ТСП. В настоящее время в связи с почти 20-летним перерывом в работе диагностический комплекс ТСП пришёл в негодность. Для комплекса ТСП под задачи проекта Игнитор необходимо создание нового диагностического комплекса с современным набором необходимых диагностических средств и собственной инфраструктурой обработки и передачи данных.

Задача модернизации диагностического комплекса ТСП связана с научной программой исследований на токамаке Игнитор и поэтому является предметом специального двустороннего российско-итальянского обсуждения.

Комплекс средств передачи и обработки данных установки ТСП. Система управления и представления данных экспериментально-стендовой базы комплекса ТСП, а также комплекс средств передачи и обработки данных ТСП не эксплуатировались и не обслуживались около 20 лет. Эти системы не могут быть использованы в составе модернизированного комплекса ТСП по причине отсутствия элементной базы для их восстановления, а также отсутствия аппаратных и программных интерфейсов для подключения к современной инфраструктуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены текущее состояние комплекса физической и технологической диагностики, средства передачи и обработки данных. Подготовленные технические решения должны быть сформированы под научную программу исследований на токамаке Игнитор, а это является предметом совместного обсуждения российской и итальянской сторон.

Рассмотрено текущее состояние системы энергоснабжения экспериментально-стендового комплекса ТСП-Игнитор, сделан вывод о его частичной пригодности с необходимостью локальной модернизации в части оборудования и полной модернизации системы управления.

Система кондиционирования вакуумной камеры установки ТСП под задачи проекта Игнитор требует согласования предлагаемых технических решений с итальянской стороной.

Система вакуумно-технологического комплекса ТСП может использоваться при работе с плазменным разрядом на основе водорода и дейтерия при реализации проекта токамака Игнитор. Тем не менее требуется частичная модернизация оборудования вакуумного цикла, контрольно-измерительной системы и системы управления и автоматизации.

Импульсная система газонапуска экспериментально-стендового комплекса токамака ТСП требует полной замены оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры и согласования предложенных решений с итальянской стороной.

Подготовлены предложения по модернизации криогенного комплекса под задачи проекта Игнитор. Предложенные технические решения требуют тщательного и детального согласования с итальянской стороной.

Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования УНУ «Комплекс установки ТСП». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI59917X0001).

REFERENCES

1. **DTT**, Divertor Tokamak Test Facility, Interim Design Report, Edited by Aldo Pizzuto, ENEA, Frascati Research Center, 2018, ISBN: 978-88-8286-370-8.
2. **Divertor** Tokamak Test Facility, <https://www.iter.org/sci/tkmkresearch>.
3. **Panek R. et al.** Conceptual design of the COMPASS upgrade tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 123, pp. 11—17.
4. **COMPASS Upgrade**, http://www.ipp.cas.cz/vedeck_a_structura_ufp/tokamak/compass_u/.
5. **Fusion Energy**. Smaller.Smarter.Sooner, <https://www.psfc.mit.edu/>.
6. **Stimul**, Journal about innovations in Russia «Commercial sun», 10.03.2018, <http://www.stimul.online> > innovations > commercial sun (in Russian).
7. **Coppi B. et al.** Physics basis for Ignition experiment. — *Physica Scripta*, 1992, vol. 45, № 2, p. 112.
8. **Coppi B., Detragiache P., Migliuolo S.** — *Fusion Technology*, 1994, vol. 25, p. 353.
9. **Coppi B. et al.** Plasma engineering in the Ignitor experiment. — In: 19th Symposium on Fusion Technology, 1997, vol. 1, p. 813.
10. **Pitcher C.S., Stangeby P.C.** — *Plasma Phys. and Control. Fusion*, 1997, vol. 39, p. 779.
11. **Coppi B. et al.** Critical Physics Issues for Ignition Experiments: Ignitor, M.I.T. (RLE). Report PTP99/06, Cambridge MA (1999) and References Therein.
12. **Labombard B. et al.** — *Nucl. Fusion*, 2000, vol. 40, p. 2041.
13. **Horton W. et al.** — *Nuclear Fusion*, 2002, vol. 42, pp. 169—179; *Plasma Physics Control and Fusion*, 2000, vol. 42, p. 381.
14. **Schultz J.H. et al.** Advanced Magnets and Implications for BPX. BPS Workshop II, G.A. San Diego, 2001.
15. **Baylor L.R., Jernigan T.C. et al.** — *Physics of Plasmas*, 2000, vol. 7, p. 1878.
16. **Coppi B. et al.** Physical regimes accessible to the ignitor experiment and relevant theoretical developments. — In: 19th IAEA Intern. Conf. on Fusion Energy. Paper FT/P2-10, Lion, France, 2002.
17. **Bombarda F., Coppi B. et al.** Ignitor: physics and progress towards Ignition. — *Brazilian J. of Physics*, 2004, vol. 34, № 4B, p. 1786.
18. **Coppi B. et al.** The high density path to fusion. — In: 36 EPS Conf. on Plasma Phys. Sofia, Bulgaria, June 29 — July 03, 2009, vol. 33E, P-4.194.
19. **Subbotin M.L., Gostev A.A., Khripunov V.I.** Some feasibilities of the Ignitor location within the TRINITI site. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2018, vol. 41, issue 3, pp. 80—92 (in Russian).
20. **Coppi B. et al.** Engineering evolution of the Ignitor machine. — *J. of Fusion Engineering and Design*, 2001, vol. 58—59, pp. 5—820.

21. **Coppi B., Faelli G., Zucchetti M.** Analisi tecnica sulla localizzazione di Ignitor a caorso. — In: F. Bombarda, S. Migliori, S. Pierattini. ENEA Technical Report RT/2010/43/ENEA, <http://hdl.handle.net/10840/4329> (2010) (in Italian).
22. **Rizzello C., Tosti S.** Overview of the tritium system of Ignitor. — J. of Fusion Engineering and Design, 2008, vol. 83, pp. 594—600.
23. **Coppi B. et al.** Ignitor remote handling system. — In: 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 30 — November 03, 2006.
24. **Coppi B. et al.** Control optimization for the position and shape of the Ignitor plasma column. — In: 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 30 — November 03, 2006.
25. **Coppi B. et al.** New developments, plasma physics regimes and issues for the Ignitor experiment. — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 104013.
26. **Sassi M., Mantovani S., Coppi B.** Auxiliary heating system for the Ignitor project. — In: Poster Presented at the 55th Meeting of the American Physical Society — Division of Plasma Physics. Denver (CO), 2013, Paper YP8.4.
27. **Goletti A., Allegra G. et al.** The IGNITOR Electrical Pulsed Power Supply System. 1-4244-0150-X/ IEEE, 2006.
28. **Azizov E.A., Chuyanov V.A. et al.** Tokamak with strong magnetic field and adiabatic plasma compression. — In: 12th IAEA Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Nice, France, 12—19 October, 1988, vol. 1, pp. 239—245.
29. **Cherkovets V.** The other European tokamak collaboration. — Nuclear Engineering International, February, 2011, p. 40, <https://www.neimagazine.com/features/featurethe-other-european-tokamak-collaboration>.
30. **Research** of the systems and technical support of the TSP starting complex. Report 10/Research-3044-87 (in Russian).
31. **Azizov E.A., Bruks N.Kh., Buzhinskiy O.I. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1996, vol. 22, № 1, p. 38 (in Russian).
32. **Coppi B. et al.** Near Term perspectives for fusion research and new contributions by the Ignitor program. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, October 11—16, 2010, FIP OV-P2.

AUTHORS

Subbotin M.L. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Subbotin_ML@nrcki.ru

Gostev A.A. JSC «State Research Center of Russian Federation, Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», ul. Pushkovykh 12, 142190 Troitsk, Moscow, Russia; Gostev@triniti.ru

Anashkin I.O. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Belov A.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; abelov@fly.triniti.ru

Levin I.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kolbasov B.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kolbasov_BN@nrcki.ru; b.kolbasov@yandex.ru

Kolesnikova E.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kravchuk V.L. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Maltsev S.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Malzev_SG@nrcki.ru

Nikolaev A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Filimonova E.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
alb@fc.iterru.ru

Received 13 February 2019

Revised 22 March 2019

Accepted 26 March 2019

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 2, pp. 31—47