

УДК 621.039.623

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ УСТАНОВКА ТОКАМАК Т-15МД

П.П. Хвостенко¹, И.О. Анашкин¹, Э.Н. Бондарчук², Н.В. Инютин³, В.А. Крылов¹,
И.В. Левин¹, А.Б. Минеев², М.М. Соколов¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

³ООО «НПО ГКМП», Брянск, Россия

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 гг. и на перспективу до 2020 г.» сооружается токамак Т-15МД с одновременной модернизацией технологических систем. Магнитная система токамака Т-15МД должна обеспечить получение и удержание горячей плазмы в диверторной конфигурации. Параметры плазмы следующие: большой радиус 1,48 м, малый радиус 0,67 м, вытянутость 1,7—1,9 и треугольность 0,3—0,4, ток плазмы 2 МА, тороидальное магнитное поле на оси плазмы 2 Тл. Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока ($P_{\text{доп}} = 15—20$ МВт), которая позволит достижение высокой температуры ($T_i \sim T_e \sim 5—9$ кэВ) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20}$ м⁻³) в разряде с длительностью импульса до 30 с. Магнитная система включает тороидальную обмотку и полоидальную магнитную систему. Полоидальная магнитная система может создавать однонулевую или двухнулевую диверторную магнитную конфигурацию. Система питания обеспечивает необходимые сценарии токов в обмотках магнитной системы. Предварительная контрольная сборка магнитной системы Т-15МД вместе с вакуумной камерой завершена на заводе компании ООО «НПО ГКМП» в Брянске. Все элементы магнитной системы и вакуумная камера направляются в НИЦ «Курчатовский институт» в Москву на место монтажа токамака Т-15МД. Реконструкция технологических систем будет завершена в 2019 г. Физический пуск Т-15МД намечен на декабрь 2020 г.

Ключевые слова: токамак, плазма, диверторная конфигурация, магнитная система, тороидальная обмотка, обмотки управления, вакуумная камера, вакуумный насос, подстанция, система водяного охлаждения, диагностика.

EXPERIMENTAL THERMONUCLEAR INSTALLATION TOKAMAK T-15MD

P.P. Khvostenko¹, I.O. Anashkin¹, E.N. Bondarchuk², N.V. Injutin³, V.A. Krylov¹,
I.V. Levin¹, A.B. Mineev², M.M. Sokolov¹

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²JSC «NIEFA», Saint Petersburg, Russia

³NPO GKMP Ltd, Bryansk, Russia

At present the T-15MD tokamak is being built and its supporting technological systems are being modernized in the NRC «Kurchatov Institute» in the frames of federal target-oriented program «New-generation nuclear power technologies in 2010—2015 and to the prospect until 2020». The T-15MD magnet system is to ensure that a hot plasma is produced and confined in the divertor configuration. The T-15MD plasma will have a major radius $R_0 = 1.48$ m, a minor radius $a = 0.67$ m, an elongation $k_{95} = 1.7—1.9$, a triangularity $\delta_{95} = 0.3—0.4$, a plasma current $I_p = 2$ MA, and a toroidal magnetic field at plasma axis $B_{T0} = 2$ T. The tokamak will be equipped with an auxiliary plasma heating and current drive system ($P_{\text{aux}} = 15—20$ MW), which will enable high plasma temperature ($T_i \sim T_e$ of 5—9 keV) and a plasma density $n_e \approx 10^{20}$ m⁻³ during an up to 30 s-pulse duration. The magnet system includes a toroidal winding and a poloidal magnet system. The poloidal magnet system may generate a one- and a two-null divertor magnetic configuration. The power supply system provides necessary current scenarios in the magnet system windings. The T-15MD magnet together with the vacuum vessel was pre-assembled at the NPO GKMP Ltd plant in Bryansk. All elements of the magnet system and the vacuum vessel are delivered to the NRC «Kurchatov Institute» in Moscow, where the tokamak assembly will take place. The technological systems are to be reconstructed by year-end 2019. The T-15MD physical start-up is scheduled for December 2020.

Key words: tokamak, plasma, divertor configuration, magnet system, toroidal winding, control coils, vacuum vessel, vacuum pump, substation, water cooling system, diagnostics.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-15-38

ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией развития общества в XXI веке является непрерывный рост энергопотребления, связанный как с ростом народонаселения, так и с удовлетворением потребности в энергии стран третьего мира, что необходимо для их развития. Возможности существующих источников энергии как за счёт топлива органического происхождения, так и за счёт возобновляемых источников ограничены вследствие их естественных пределов.

Базовым источником энергии в очень долгосрочной перспективе может служить ядерная энергия деления, если в топливный цикл будут включены весь природный уран и торий. С этой целью разрабатываются ядерные реакторы на быстрых нейтронах различного типа [1]. В настоящее время ядерная

энергетика базируется, в основном, на реакторах с тепловыми нейтронами, проблема которых заключается в исчерпаемости топливных ресурсов в течение XXI века. Кроме того, в тепловых реакторах образуется большое количество высокоактивного отработанного топлива, которое требует специального обращения и оборудования специальных хранилищ.

Термоядерная энергетика, основанная на синтезе ядер дейтерия и трития, обладает принципиальными преимуществами по сравнению с ядерной и другими видами источников энергии. Во-первых, она имеет практически неисчерпаемые топливные ресурсы (изотопы водорода) и возможность воспроизводства топлива внутри комплекса установки. Во-вторых, она не имеет высокоактивных отходов и практически безопасна при любых мыслимых авариях активной зоны, в том числе не требует эвакуации населения из окружающей зоны. В-третьих, при использовании малоактивируемых конструкционных материалов термоядерный реактор проще выводится из эксплуатации.

Основным носителем энергии термоядерного синтеза служат нейтроны. Их энергия преобразуется в тепло в blankets термоядерного реактора, а затем в другие виды энергии. Другой путь использования потоков термоядерных нейтронов заключается в создании термоядерных источников нейтронов (ТИН) для гибридных (синтез—деление) реакторов, blankets которых содержат уран-238, торий-232 или минорные актиниды из отработанного ядерного топлива [2, 3]. ТИН могут использоваться для наработки ядерного топлива для тепловых и быстрых реакторов (плутония-239 и урана-233), для трансмутации долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО), а также для выработки энергии в подкритических системах. Требования к плазменной части и нейтронным потокам для гибридных реакторов на порядок ниже, чем к чисто термоядерным реакторам, что может существенно сократить время их внедрения.

Основой создания термоядерных и гибридных реакторов будут установки управляемого термоядерного синтеза, в которых осуществляется удержание высокотемпературной плазмы в магнитных полях различной конфигурации. К таким установкам относятся токамаки, стеллараторы и открытые ловушки. Среди них наибольшие успехи достигнуты на токамаках. На токамаках впервые была продемонстрирована возможность достижения условий интенсивного протекания реакций синтеза и генерация нейтронных потоков большой мощности [4, 5]. Обширная база данных, полученная на десятках токамаков, и современные коды для моделирования процессов позволили международному сообществу в составе России, США, Японии, Индии, Китая, Южной Кореи и Европейского Союза разработать проект и начать строительство Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР [6].

К сожалению, проводимые в России термоядерные исследования на токамаках охватывают только узкую часть спектра ключевых задач ИТЭР. Это связано, в первую очередь, с отсутствием в России крупной установки с подобной ИТЭР конфигурацией. России для того, чтобы быть на уровне мировых исследований, крайне необходима установка с длинным импульсом (возможности достижения стационарного горения плазмы с высокими параметрами и перехода на неиндуктивное поддержание тока), мощным дополнительным нагревом плазмы, вытянутым сечением и дивертором. Как показывает развитие работ по проекту международного реактора-токамака ИТЭР, для оптимального продвижения к промышленному термоядерному реактору сочтено целесообразным в каждой из стран-участниц проекта иметь современный токамак, на котором можно проводить исследования как в поддержку программы ИТЭР, так и для развития реакторных технологий. Российская программа должна включать в себя разработку технологий, необходимых для создания нейтронных источников [7, 8]. Эта идеология нейтронных источников для выжигания актинидов и наработки топлива для атомной энергетики считается в России одной из перспективных для достижения более быстрой отдачи от исследований по УТС и реальной демонстрацией энергетических возможностей реакций синтеза.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ТОКАМАКА T-15MD

Проекты по модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака T-15 с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура были выполнены в 2000—2010 гг. совместно Институтом ядерного синтеза (ИЯС) РНЦ «Курчатовский институт» (впоследствии ИФТ НИЦ «Курчатовский институт») и НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

В 2000—2002 гг. был разработан проект ИТЭР-подобной установки токамак T-15M [9], имеющей размеры плазменного шнура 1/4 от линейных размеров плазмы в установке ИТЭР. В силу экономических причин этот проект не был реализован.

В 2005—2006 гг. в ИЯС было принято решение о модернизации Т-15 путём создания диверторной конфигурации внутри круглой вакуумной камеры с помощью ввода в камеру дополнительных полоидальных обмоток — токамак Т-15Д [10]. Технический проект модернизации токамака Т-15 был разработан АО «НИИЭФА» совместно с РНЦ «Курчатовский институт» в 2007 г. и был включён в общий проект по техническому перевооружению комплекса токамака Т-15. Позже эта идея была реализована в процессе модернизации токамака TORE-SUPRA, получившего название токамака WEST [11].

В 2010 г. проект по техническому перевооружению экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15 как часть термоядерного раздела был включён в Федеральную целевую программу «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года» (ФЦП «ЯЭТНП») [1].

Однако анализ состояния и перспектив работ по физике и технологии токамаков в России, выполненный комиссией ГК «Росатом» по выбору оптимальных путей развития работ по токамакам, созданной по инициативе Е.П. Велихова, показал, что проект модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15 в предложенном в ФЦП «ЯЭТНП» виде не может решить ни одну из актуальных задач исследований в поддержку ИТЭР и разработки демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО. Кроме того, развитие атомной энергетики нуждается в использовании термоядерных нейтронов для наработки искусственного топлива и трансмутации ДВАО. В связи с этим возникла необходимость создания стационарных источников термоядерных нейтронов, обеспечивающих потоки $0,2—1,0$ МВт/м² на базе токамаков.

На основании рекомендаций комиссии ГК «Росатом», рассмотренных и одобренных секцией № 6 НТС ГК «Росатом», РНЦ «Курчатовский институт», ГК «Росатом» и РАН разработали «Предложения по освоению технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС) в Российской Федерации на 2010—2020 гг.». Эти «Предложения», заслушанные и одобренные экспертными советами и секцией № 6 НТС ГК «Росатом», были направлены в Правительство РФ. Аппарат Правительства, рассмотрев «Предложения», поручил ГК «Росатом», Минобрнауки и РАН обеспечить реализацию «Предложений» в рамках ранее утверждённых планов, ФЦП и обязательств РФ в области международного сотрудничества [12].

Предложения охватывали работы по УТС в России до 2020 г. Среди этих предложений были создание новой экспериментальной и стендовой базы, в том числе на основе инновационных решений путём замены и модернизации установок и стендов, проведение исследований и инновационных технологических разработок на новой экспериментальной и стендовой базе в поддержку ИТЭР и в обоснование создания стационарных термоядерных реакторов и гибридных систем на основе токамаков — источников термоядерных нейтронов.

На основе «Предложений» по инициативе Э.А. Азизова в ИФТ РНЦ «Курчатовский институт» была разработана концепция нового варианта модернизации токамака Т-15, основанная на использовании вытянутой одно- и двухнулевой диверторной конфигурации плазменного шнура с аспектным отношением в диапазоне 2,2—3,1, удлинением до 1,9, «тёплой» (не сверхпроводящей) электромагнитной системой, способной создавать тороидальное магнитное поле на оси плазменного шнура 2 Тл, мощными квазистационарными системами дополнительного нагрева и современной инженерной инфраструктурой. При этом ток в плазме должен достигать 2,0 МА при длительности 10 с. На базе этой концепции НИИЭФА совместно с РНЦ «Курчатовский институт» разработали технический проект токамака, получившего название Т-15МД, который был утверждён ГК «Росатом».

Токамак Т-15МД [13] представляет инновационную установку (рис. 1), не имеющую аналогов в мире по параметрам: тороидальное поле 2 Тл при аспектном отношении 2,2. Программа исследований на токамаке Т-15МД будет нацелена на решение наиболее актуальных проблем ИТЭР, таких как механизм формирования и поддержания транспортных барьер-

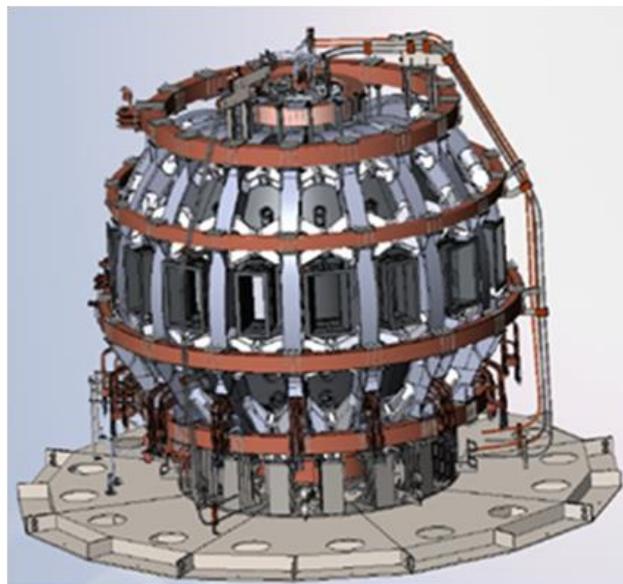


Рис. 1. Общий вид токамака Т-15МД

ров, стационарная генерация неиндукционного тока, нагрев и удержание горячей плазмы, управление процессами на первой стенке и в диверторе, подавление глобальных неустойчивостей и периодических выбросов энергии на стенку и др. Физическая программа исследований с акцентом на отличные от других токамаков параметры установки более подробно изложена в [14].

В качестве прототипа термоядерного источника нейтронов (ТИН-0) токамак Т-15МД будет использоваться как стенд, на котором будут обрабатываться такие подсистемы, как стационарные инжекторы быстрых атомов, и проводиться исследования по взаимодействию пучков быстрых атомов с основной плазмой, испытываться материалы и технологии, в частности, литиевые, первой стенки, дивертора и др. В экспериментах с замкнутым контуром циркуляции лития и изотопов водорода в квазистационарном режиме работы длительностью 30 с ожидается достижение рекордной, превышающей в 3 раза известные на сегодня зарубежные аналоги энергонапряжённости первой стенки токамака-реактора на уровне $0,3 \text{ МВт/м}^2$, что позволит обеспечить технологический переход от экспериментальных установок токамак к промышленным термоядерным и гибридным реакторам УТС. В результате проведённых исследований будет получена физическая и технологическая база в обоснование создания стационарных термоядерных реакторов и перспективных гибридных систем на основе токамаков.

Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока при уровне вводимой в плазму мощности $P_{\text{доп}} \approx 15\text{—}20 \text{ МВт}$, которая позволит достичь высокой температуры ($T_i \sim T_e \sim 5\text{—}9 \text{ кэВ}$) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$) в разряде с длительностью импульса до 30 с. Эта система включает инжекцию нейтралов (ИН) (три инжектора по 2 МВт/75 кэВ , N_0 [15]), электронно-циклотронный нагрев (семь гиротронов по $1,0\text{—}1,5 \text{ МВт}$ каждый, $f = 110\text{—}120 \text{ ГГц}$ с возможностью нагрева как на второй гармонике, так и в бернштейновской моде [16]), ионно-циклотронный нагрев (три антенны по 2 МВт каждая, включая возможность поддержания тока геликонами) [17], нижнегибридный нагрев и поддержание тока (грилл мощностью 4 МВт , $f = 2,45 \text{ ГГц}$) [16].

С 2011 г. по настоящее время в рамках выполнения ФЦП «ЯЭТНП» [1] проходит модернизация как самой электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15, так и модернизация всех технологических систем. Физический пуск токамака Т-15МД должен быть осуществлён в 2020 г. в омическом режиме.

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ Т-15МД

Установка токамак Т-15МД сооружается в Курчатовском комплексе термоядерной энергетики и плазменных технологий (ККТЭиПТ) НИЦ «Курчатовский институт» с использованием инфраструктуры установок Т-10 и Т-15. Привязка установки к имеющейся инженерной инфраструктуре площадки ИФТ (максимальная электрическая мощность, потребляемая от сети, величины напряжения и токов тиристорных преобразователей, параметры системы водоснабжения) во многом определила параметры токамака.

В настоящее время разрешённая максимальная потребляемая импульсная мощность от сети составляет 230 МВА при длительности импульса $6,5 \text{ с}$. ОАО «Мосэнерго» дало разрешение на проектирование токамака с потребляемой импульсной мощностью 300 МВА , 12 с . Величина тороидального магнитного поля на оси плазменного шнура должна быть не менее 2 Тл при минимально возможном аспектном отношении. При этом значении тороидального поля центральный СВЧ-нагрев плазмы может быть осуществлён на второй гармонике электронно-циклотронного резонанса на частоте волны 112 ГГц .

Существенной частью физической программы установки является работа с лимитерными и диверторными конфигурациями плазмы с большой вытянутостью по вертикали. При наличии соответствующего зазора между X-точкой и камерой возможно размещение в этом пространстве диверторных устройств. В этом случае фактически задаётся размер камеры и тороидальной обмотки в вертикальном направлении.

Важным элементом программы является исследование поведения плазмы с токами мегаамперного диапазона при достаточно длинном импульсе поддержания тока. Необходимо отметить, что в России в настоящее время нет работающих токамаков с током плазмы $I_p \geq 1 \text{ МА}$ и длительностью плато тока $t_{\text{плато}} \geq 1 \text{ с}$. При мощности дополнительного нагрева на уровне $10\text{—}15 \text{ МВт}$ весьма желательно получение

разрядов длительностью несколько секунд, что соответствует характерному времени установления профилей основных параметров плазмы.

Указанные особенности могут быть совмещены в установке, имеющей следующие параметры: одно- и двухнулевая (SN, DN) конфигурация плазмы с значениями аспектного отношения $A \sim 2$, вытянутостью плазмы по уровню 95% потока $k_{95} \approx 1,7—1,9$ и треугольностью $\delta_{95} \approx 0,3$. Основные геометрические размеры выбраны следующими: большой радиус тора $R_0 = 1,48$ м, малый радиус плазмы $a = 0,67$ м. Указанные параметры при значении магнитного поля на оси плазмы $B_{T0} = 2,0$ Тл определяют максимальную величину тока плазмы $I_p = 2$ МА.

Требуемый запас магнитного потока в центральном соленоиде $\Delta\Psi_{cs} = 6$ Вб. Для полученных параметров установки Т-15МД предел Гринвальда для плотности плазмы n_e составляет $n_{e,G} = I_p/\pi a^2 \approx 1,4 \cdot 10^{20}$ м⁻³. Основные параметры токамака Т-15МД следующие:

Ток плазмы I_p , МА . . .	2
Аспектное отношение A . . .	2,2
Большой радиус тора R_0 , м . . .	1,48
Малый радиус плазмы a , м . . .	0,67
Вытянутость сечения k_{95} . . .	1,7—1,9
Треугольность δ_{95} . . .	0,3—0,4
Тороидальное поле на оси плазмы B_{T0} , Тл . . .	2,0
Длительность плато разряда $\Delta t_{\text{плато}}$, с . . .	10
Длительность плато тока плазмы 2 МА, с . . .	$\leq 1,5$
Мощность нагрева плазмы $P_{\text{доп}}$, МВт . . .	≤ 20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м ⁻³ . . .	≤ 1
Предел Гринвальда для плотности $n_{e,G}$, 10^{20} м ⁻³ . . .	1,4
Суммарный запас потока $\Delta\Psi_{cs}$, Вб . . .	6

Длительность плато тока $t_{\text{плато}}$ соответствует характерному времени изменения профилей параметров в плазме с уровнем нагрева 10—15 МВт.

Старт разряда и подъём плазменного тока до базового значения предполагается осуществлять индукционным способом. После достижения базового значения тока плазмы должен быть обеспечен переход на неиндуктивное поддержание тока.

Квазистационарный режим горения плазмы в системах с магнитным удержанием плазмы является необходимым и важнейшим с точки зрения перехода к крупномасштабной термоядерной энергетике. В случае модернизированного Т-15 это соответствует длительности импульса 5—10 с при уровне тока плазмы $I_p > 1$ МА и требует применения мощных систем нагрева плазмы и поддержания тока.

Основным методом нагрева и поддержания тока выбрана инжекция быстрых атомов [15, 16]. Это связано как с освоенностью инжекторов с энергией нейтралов 80—100 кэВ, так и с необходимостью отработки режима протекания реакций синтеза при взаимодействии быстрых частиц пучка с плазмой (реакции на пучке). В результате даже при D—D-реакциях в плазме с невысокой температурой (2—3 кэВ) возможна регистрация интенсивных потоков нейтронов, что важно для отработки ряда систем ТИН. Важной составляющей проекта предполагается ЭЦР-нагрев плазмы при уровне мощности 6—7 МВт [16].

При проектировании токамака Т-15МД использовался опыт проектирования и изготовления токамака КТМ [18], сооружённого для Республики Казахстан, а также проекта токамака Т-15М [9]. В свою очередь при разработке токамака Т-15МД был получен необходимый инженерно-технологический опыт для сооружения нейтронного источника. Достижение режима длительного неиндуктивного горения плазмы с высокими параметрами (β_N , $H_{y,2}$, $1/q_{95}$, k , δ , n/n_G) — важнейшая физическая задача токамака Т-15МД.

ФИЗИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ РАЗРЯДА

При предварительной проработке физических сценариев разряда в модернизированной установке Т-15МД, т.е. временной эволюции параметров R , a , k , δ , n_e , I_p , напряжения на обходе U , сопротивления

плазмы R_{PL} , энергетического времени жизни плазмы τ_E , значений β_p (отношение газокINETического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля) и нормализованной β_N и ряда других параметров, были приняты следующие допущения:

- пробой плазмы производится при выходе величины тороидального поля на плато;
- положение области пробоя — вблизи внутреннего обвода плазмы, где больше значения вихревого электрического и тороидального магнитного полей;
- скорость подъёма тока плазмы выбиралась в диапазоне $dI_p/dt \approx 1\text{—}2$ МА/с, концентрация плазмы на стадии подъёма тока выбиралась растущей вместе с током;
- после выхода плазменного тока на плато происходит включение источников нагрева плазмы.

Геометрические параметры зоны пробоя выбирались в соответствии с опытом проектирования системы формирования плазмы ИТЭР [19]. Так же, как и в ИТЭР, в качестве основного выбран вариант старта разряда с внутреннего обхода тора ($R = 1,06$ м).

Анализ начальной стадии разряда показал:

- при поле рассеяния в области пробоя ~ 10 Гс минимальное пробойное значение электрического поля на обходе тора составляет $\sim 0,4$ В/м;
- более предпочтителен старт разряда при уменьшенной зоне пробоя с малым радиусом плазменного шнура $a = 0,25$ м. Этот вариант и принят для дальнейшей проработки физического и инженерного сценария разряда;
- для этого случая максимальный начальный запас потока при ограничении полей рассеяния на уровне 10 Гс (на границе зоны пробоя) при имеющихся ограничениях на источники питания составляет $\approx 3,45$ Вб;
- запас потока к концу начальной стадии разряда (когда ток плазмы достигает уровня 40—50 кА) составляет примерно 3,25 Вб. С таких значений потока начинается стадия подъёма тока плазмы.

Ток плазмы в токамаке Т-15МД целесообразно поднимать со скоростью $dI_p/dt \approx 1,5\text{—}2$ МА/с. При такой скорости подъёма тока плазмы расчёты показывают на отсутствие убегавших электронов. Кроме того, скин-время при подъёме плазменного тока близко к характерному времени подъёма тока, и можно надеяться на отсутствие сильного скинирования.

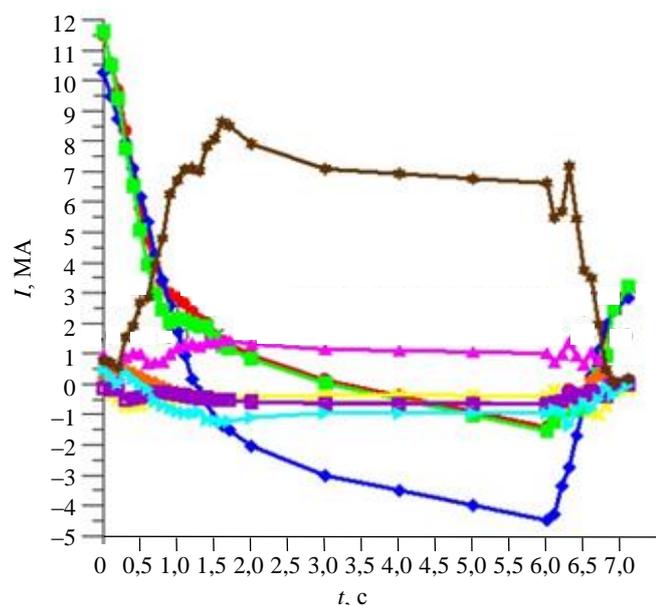


Рис. 2. Сценарии токов в обмотках полоидальной системы в одновитковом приближении: ● — ОИ1; ◆ — ОИ2; ■ — ОИ3; ▲ — ОУ1; ✱ — ОУ2; ◆ — ОУ3; □ — ОУ4; ◆ — ОУ5; ★ — ОУ6

Физические расчёты сценариев разряда были выполнены В.М. Леоновым с использованием кода ASTRA [13, 20]. Принятые в расчётах физические модели подробно описаны в [20].

Формирование плазменного разряда происходит в круглом сечении на внутреннем обходе вакуумной камеры с $R = 1,06$ м и $a = 0,25$ м. К моменту $t = 1,76$ с ток плазмы достигает максимального значения $I_p = 2,0$ МА и формируется односторонняя диверторная конфигурация.

Начальное распределение токов в обмотках управления (ОУ) определялось с учётом возможностей системы питания и необходимостью обеспечить минимальное поле рассеяния в зоне формирования разряда. Один из возможных расчётных сценариев токов в обмотках индуктора (ОИ) полоидальной системы показан на рис. 2.

Как показали расчёты сценариев токов в полоидальной системе, переход из лимитерной в диверторную конфигурацию, сопровождаемый отходом плазмы от стенки, целесообразно провести несколько раньше, чем выход плазменного тока на плато.

На рис. 3 показан сценарий эволюции плазменного шнура, рассчитанный по коду DINA P.P. Хайрутдиновым и В.И. Докукой [21, 22].

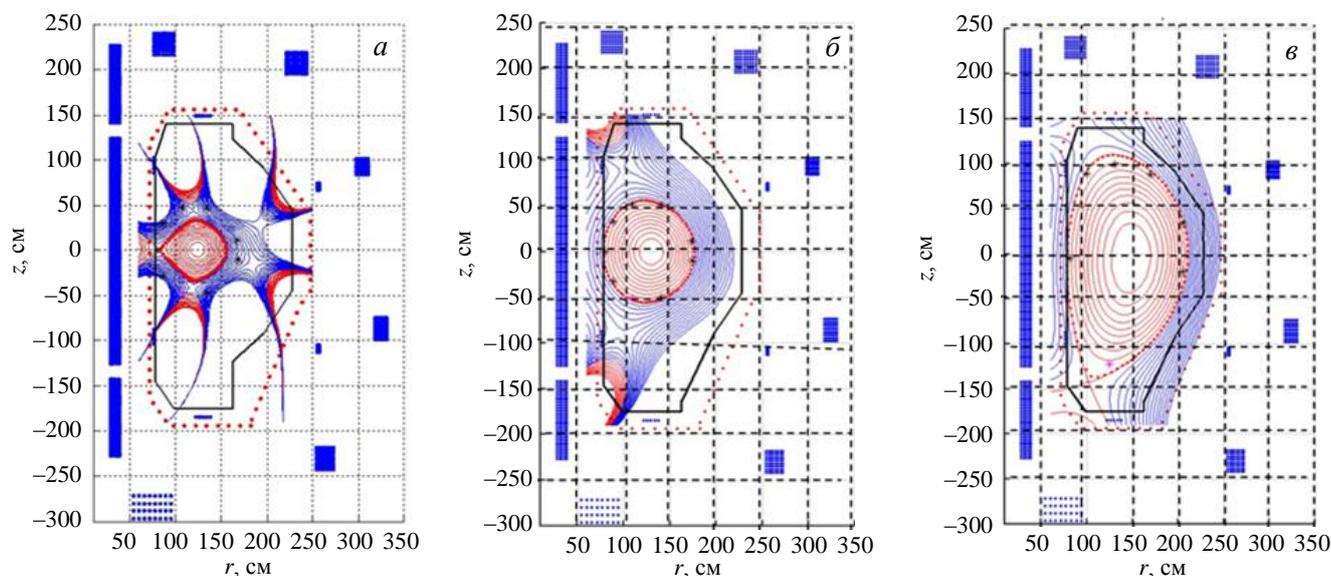


Рис. 3. Сценарий эволюции плазменного шнура: $t = 0$ с, $I_p = 500$ А (а); $t = 50$ мс, $I_p = 58$ кА (б); $t = 1,76$ с, $I_p = 2$ МА (в)

На плато тока омического разряда плазмы принято, что значение концентрации плазмы $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это значение ниже предела Мураками $n_e < 2B_{T0}/qR_0$ ($\approx 1,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) и предела Гринвальда $n_e < I_p/\pi a^2$ ($\approx 1,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$).

Как видно на рис. 4, скорость подъёма тока составляет около 1,5 МА/с, длительность плато тока 1,5 с, резистивное напряжение около 0,7—0,8 В. Средняя температура омической плазмы достигает 1,5 кэВ, время удержания плазмы 200 мс. Существенное затягивание импульса разряда возможно при переходе от омического к дополнительному нагреву плазмы и при генерации токов увлечения.

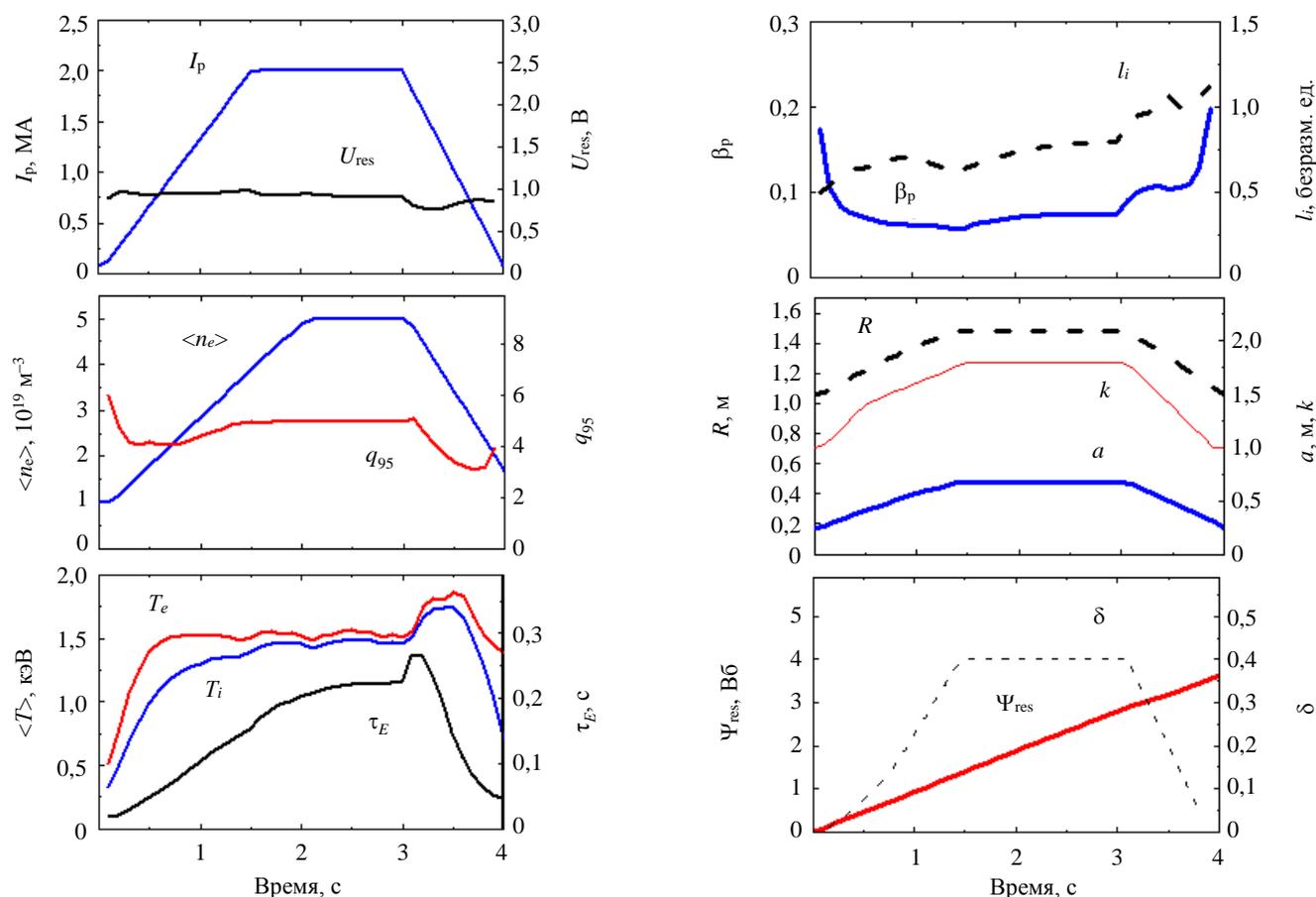


Рис. 4. Сценарий омического разряда при концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

Величина мощности нагрева плазмы, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы, согласно базе данных ИТЭР составляет $P_{\text{ном}} \approx 0,45n_{20}^{0,75} B_{T0} R_0^2 \approx 1,3$ МВт. Другие расчёты мощности L—H-перехода дают $P_{L-H} = 1,5-2$ МВт [23]. Поэтому при уровне мощности нагрева плазмы 10—15 МВт удержание плазмы в T-15МД должно соответствовать H-моду удержания.

Дополнительный нагрев при уровне суммарной мощности 13 МВт (5 МВт ЭЦР и 8 МВт ИН) позволяет существенно снизить напряжение на обходе (до уровня $\sim 0,2$ В), затраты потока (до 1,5 Вб) и резко увеличить энергосодержание плазмы, так что средняя температура плазмы достигает 2,5—3 кэВ (в центре плазменного шнура более 5 кэВ).

Пробой и начало развития разряда целесообразно осуществить от внутренней стенки (ближе к центральному соленоиду) для увеличения пробойного электрического поля. Окончание разряда также происходит вблизи внутренней стенки. Сценарий разряда с дополнительным нагревом в плазме при базовом токе плазмы $I_p = 2$ МА, суммарной мощности нагрева $P = 13$ МВт (8 ИН + 5 ЭЦР), концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и эффективном заряде плазмы $Z_{\text{эф}} = 1,6$ приведён на рис. 5.

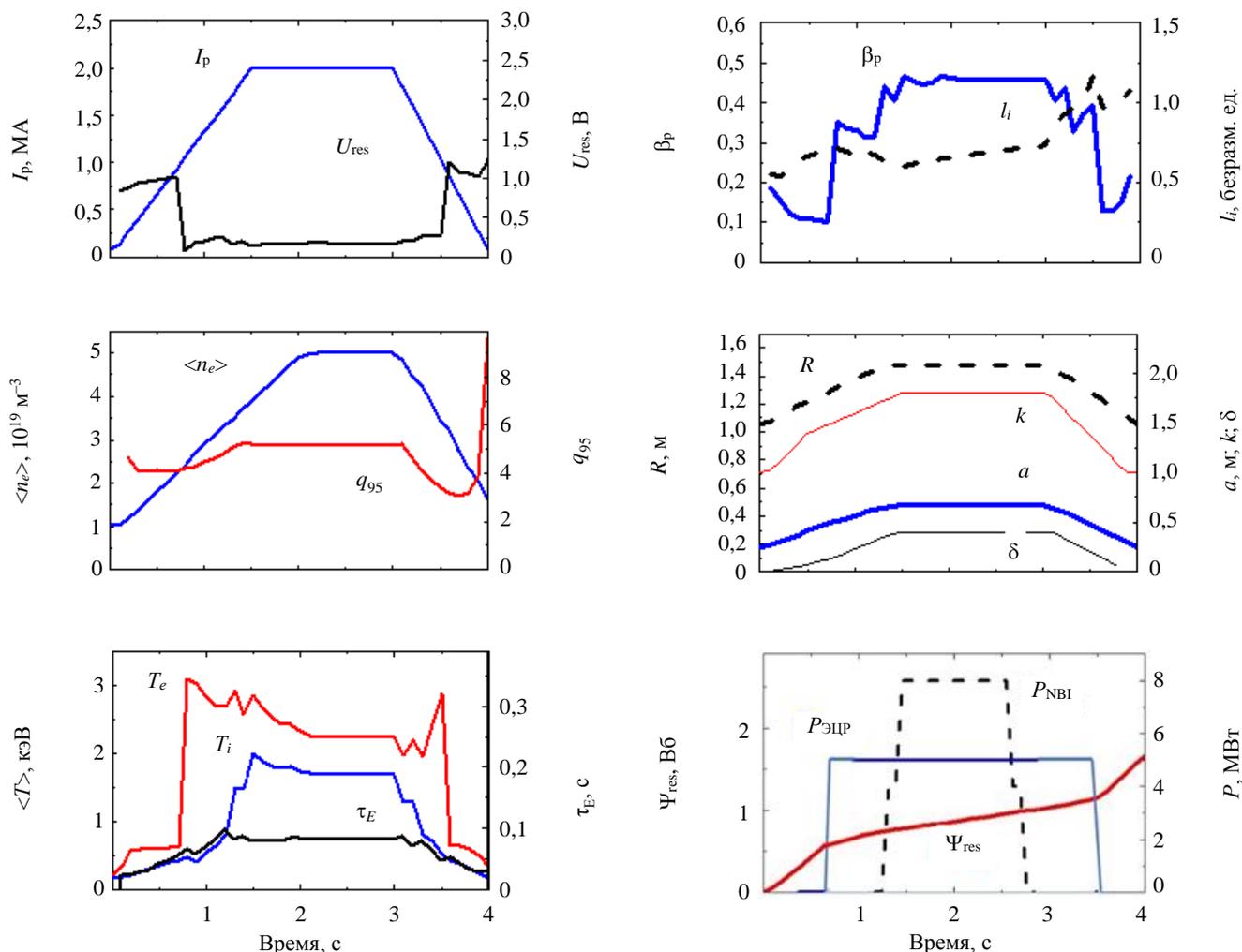


Рис. 5. Сценарий разряда с дополнительным нагревом плазмы (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) при концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

Кроме базового режима с дополнительным нагревом, были рассчитаны дополнительно два режима, представляющих особый интерес.

Первый из них — режим очень длинного импульса (20 с) с полным замещением омического тока. Анализ поведения плазмы в таком режиме является ключевым с точки зрения перспектив создания нейтронных

источников на основе токамака (рис. 6). Для организации такого режима потребовалось уменьшение тороидального поля на оси плазмы до 1,5 Тл, снижение рабочего тока плазмы до 1 МА и концентрации плазмы до $0,3 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При этом из 13 МВт полной вкладываемой мощности 5 МВт (ЭЦР) используются только для нагрева плазмы, 8 МВт тангенциальной инжекции нейтралов — для нагрева и поддержания тока. Расчётный уровень неомических токов составляет [20] 400 кА (бутстреп-ток) и 600 кА (ток увлечения при инжекции). Такой режим технически может быть осуществлён в рамках разработанной конструкции токамака.

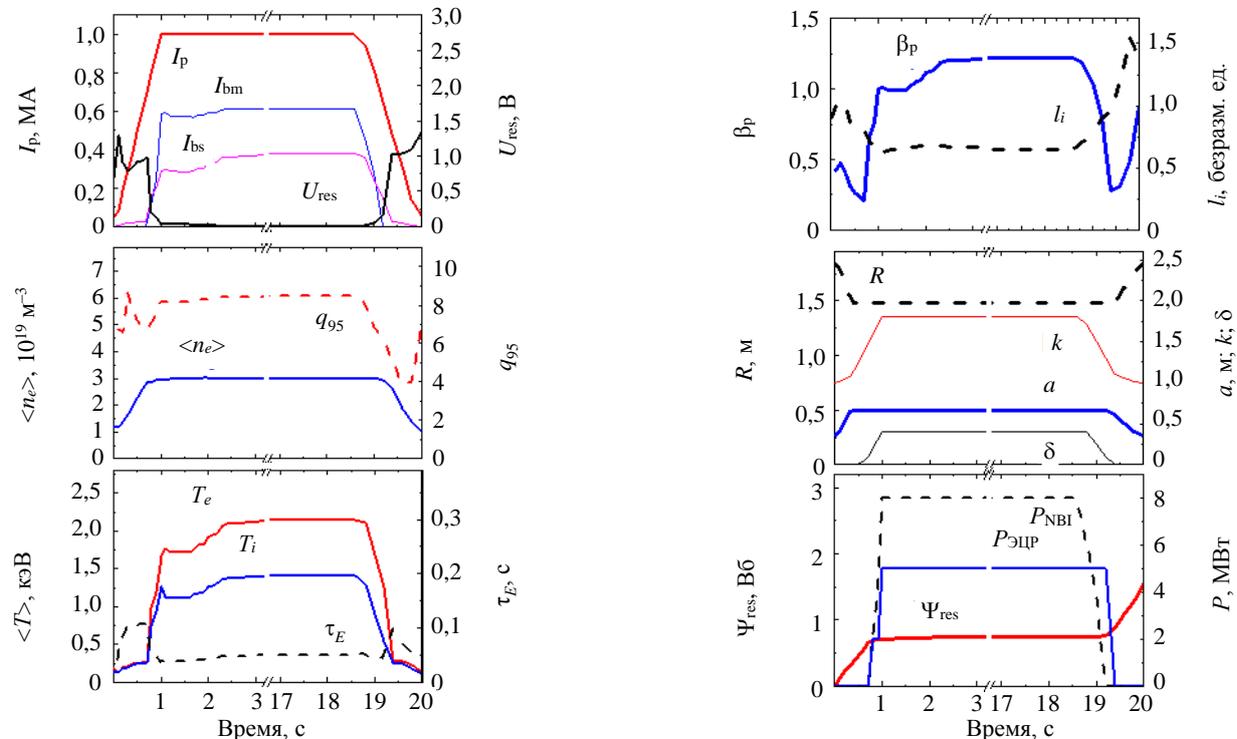


Рис. 6. Сценарий разряда с дополнительным нагревом (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) в установке токамак Т-15МД с длинным импульсом и полным замещением омического тока

Второй режим — с предельным током плазмы (рис. 7). В установке Т-15МД физические ограничения в принципе не запрещают рост тока плазмы на плато разряда с базового значения 2 МА

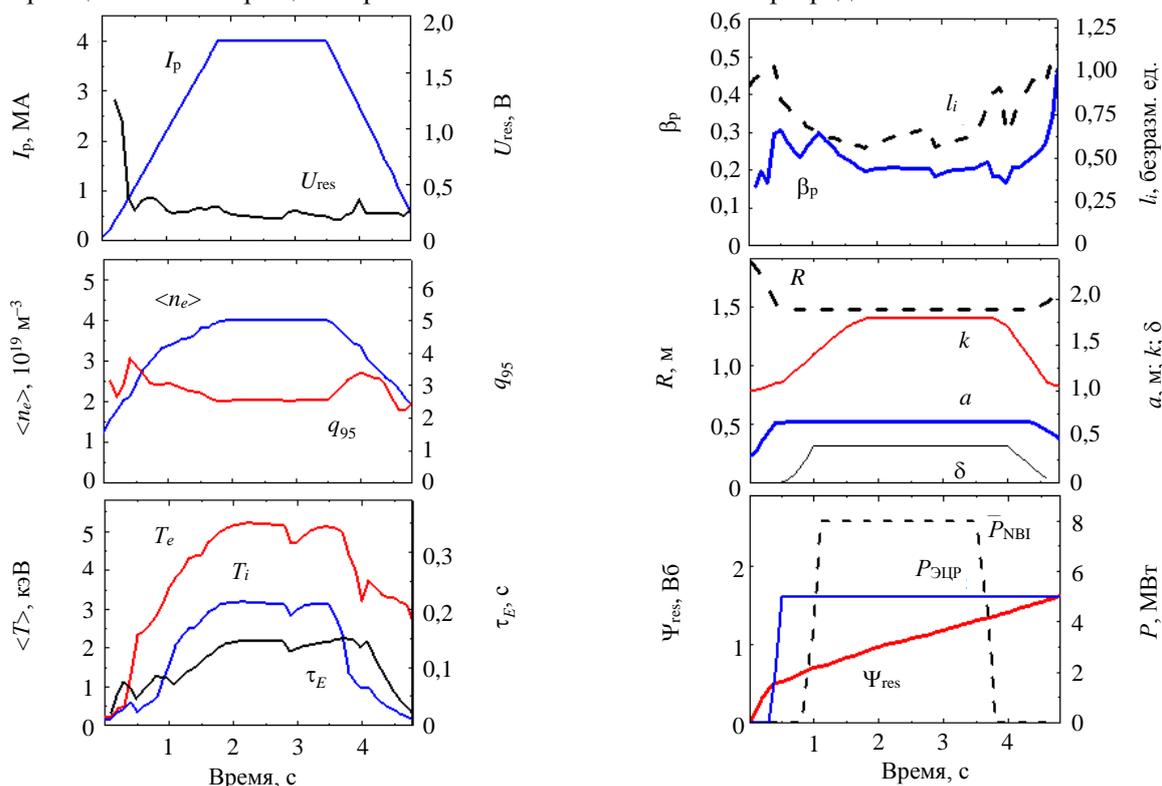


Рис. 7. Сценарий разряда с дополнительным нагревом (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) и током плазмы, увеличенным до 4 МА

до предельного для этой установки значения 4 МА, для которого запас устойчивости на краю плазмы уменьшается до $q_{95} = 2,5$. Соответствующие временные зависимости для этого режима показаны на рис. 7.

Вопрос технической реализации такого режима, в котором токи в полоидальных обмотках примерно вдвое превышают базовые значения, предполагается решить на уже работающей установке в процессе её эксплуатации. Необходимо будет дополнительно провести тепловые расчёты и расчёты напряжённо-деформированного состояния.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Электромагнитная система установки токамак Т-15МД предназначена для генерирования тороидальных и полоидальных магнитных полей [21, 23].

В состав ЭМС Т-15МД входят:

— обмотка тороидального поля (ОТП), состоящая из 16 D-образных катушек;

— ОИ), состоящая из трёх катушек;

— шесть обмоток управления (ОУ1—ОУ6);

— обмотка горизонтального управляющего поля (ОГУП), состоящая из четырёх катушек;

— опорные конструкции.

Электромагнитная система токамака Т-15МД представлена на рис. 8.

Для определения параметров электромагнитной системы были проведены многочисленные расчёты. Целями этих расчётов являлись минимизация аспектного отношения плазменного шнура при обеспечении необходимой величины тороидального магнитного поля 2 Тл при длительности 10 с, достижение тока 2 МА и запаса магнитного потока в обмотке индуктора не менее 6 Вб. При этом должны были быть обеспечены существующие параметры систем электропитания и водоснабжения. На основании этих расчётов были определены основные параметры ЭМС:

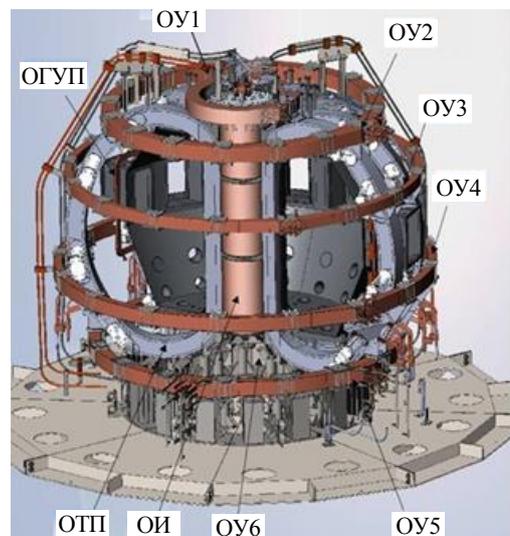


Рис. 8. Электромагнитная система токамака Т-15МД

Число катушек ОТП . . .	16
Индукция тороидального магнитного поля на оси плазменного шнура, Тл . . .	2
Гофрировка тороидального поля на внешней границе плазмы, % . . .	0,76
Число катушек обмотки индуктора . . .	3
Число обмоток управления . . .	6
Число катушек ОГУП . . .	4
Перепад давления охлаждающей воды, атм. . . .	8
Суммарный расход охлаждающей воды, м ³ /ч . . .	82
Масса материала обмоток (серебросодержащей меди), т . . .	90
Полная масса ЭМС, т . . .	180



Рис. 9. Кольцевая опорная ферма на фундаменте токамака Т-15

Установка Т-15МД расположена в экспериментальном зале на фундаменте установки Т-15. Отсутствие магнитопровода в токамаке Т-15МД приводит к необходимости оценки влияния полей рассеяния на расположенные вблизи токамака металлоконструкции.

Опорными конструкциями ЭМС являются центральная ферма установки Т-15, опорная ферма установки Т-15 (рис. 9), монтажная подставка, подставка ОТП.

Центральная ферма Т-15 использована для установки токамак Т-15МД. В ферме прорезаны пазы в зоне под нижними вертикальными патрубками вакуумной камеры для обеспечения доступа к ним и установки диагностического оборудования.

Монтажная подставка — это база, на которой собирается вся электромагнитная система. Необходимость в ней обусловлена большим пустым промежутком между центральной и опорной фермами существующей установки Т-15МД. Подставка состоит из восьми секций, изолированных электрически друг от друга. В секциях подставки предусмотрены отверстия и люки для кабелей электропитания установки, подвода охлаждающей воды к коллекторам, обслуживания нижних вертикальных патрубков вакуумной камеры и т.д. Монтажная подставка вместе с опорами для катушек ОТП и вакуумной камеры показана на рис. 10.



Рис. 10. Монтажная подставка вместе с опорами для катушек ОТП и вакуумной камеры

Центральная опора имеет кольцевую форму и состоит из двух изолированных друг от друга частей. Опора позволяет установить и демонтировать обмотку управления ОУБ. В верхней части опоры имеются отверстия для крепления опор камеры. На опоре расположены съёмные отжимные болты для юстировки и корректировки катушек ОТП.

В токамаке Т-15МД отсутствуют центральный железный сердечник и внешний магнитопровод. В расчётах, проведённых в ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» и НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в рамках выполнения проекта токамака Т-15М [26], получены оценки полей, индуцируемых в области развития разряда на его начальной стадии от наводимых во внешних контурах токов, а также токов в этих контурах установки при срыве тока плазмы.

Из расчётов следовало, что при начальной скорости роста тока плазмы $I_p = 1,2 \cdot 10^6$ А/с на контурах индуцируется напряжение $U \approx 6$ В, что приводит к появлению токов в контурах и, как следствие, магнитных полей в области формирования разряда $B_T \approx 4 \cdot 10^{-4}$ Тл и $B_z \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Анализ начальной стадии разряда показал, что эффект влияния элементов металлических конструкций незначителен на стадии инициации плазмы и эти поля могут быть скомпенсированы внешними обмотками управления.

ОБМОТКА ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

Обмотка тороидального поля, изготовленная в ООО «НПО ГКМП» [22, 25], показана на рис. 11. Основные параметры ОТП:

Число катушек . . .	16
Число витков в катушке . . .	50
Проводник . . .	Медный серебросодержащий
Площадь и диаметр проводника, мм . . .	22,5×32, Ø10,5
Площадь поперечного сечения меди, мм ² . . .	631,5
Длина проводника ОТП, м . . .	9120
Масса проводника, кг . . .	51 920
Максимальный ток, кА . . .	22
Максимальное напряжение на корпусной изоляции, кВ . . .	2
Омическое сопротивление ОТП при 20 °С, Ом . . .	0,26
Собственная индуктивность обмотки, Гн . . .	0,8
Число параллельных ветвей охлаждения . . .	64
Перегрев проводника при $B_T = 2$ Тл и времени плато 10 с, °С . . .	57
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч . . .	40
Потери давления, МПа . . .	0,8

ОТП состоит из 16 катушек D-образной формы. Форма катушек обусловлена размерами плазменного шнура, наличием дивертора, требованиями к гофрировке тороидального магнитного поля, требованиями инжекции.



Рис. 11. Обмотка тороидального поля, состоящая из 16 катушек

Каждая катушка собирается из четырёх секций (двух центральных и двух боковых), намотанных из серебросодержащего медного полого проводника размером 22,5×32 мм и с отверстием Ø10,5 мм. Серебросодержащий медный проводник был выбран в качестве токонесущего элемента по причине сохранения им электропроводности медного проводника и приобретения прочностных свойств нержавеющей стали. Именно эти свойства проводника позволили спроектировать ОТП, создающую магнитное поле 2 Тл при длительности 10 с и аспектном отношении плазменного шнура 2,2. Каждая катушка имеет 50 витков. Из-за того, что максимально возможная длина производимого фирмой LUVATA (Финляндия) проводника размером только 11,4 м (11,4 м — средняя длина витков в катушке), то в каждой катушке имеется 50 соединений (спаев). Это потребовало при изготовлении катушек проведения тщательных испытаний каждого соединения. Каждый паяный шов сначала проверялся на прочность водой давлением 4 МПа, а затем проверялся на герметичность путём надавливания газообразного гелия давлением 1,5 МПа и проверкой герметичности снаружи шва щупом с течеискателем. Кроме этого, образцы соединений (спаев) испытывались на механическую прочность (на разрыв). Разрыв проводника происходил не по месту паяного соединения.

Витковая и корпусная изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты и стеклотенты. Изоляция накладывается на проводник, секцию или катушку с промазкой её эпоксидным компаундом, опрессовывается и запекается. Крайние секции после запечки витковой изоляции перед наложением корпусной изоляции механически обрабатываются для получения трапециевидальной формы на внутренней ноге. Катушка ОТП после намотки и запечки в ООО «НПО ГКМП» показана на рис. 12.



Рис. 12. Катушка ОТП после намотки и запечки

Катушки ОТП устанавливаются в D-образные корпуса из нержавеющей стали, представляющие собой коробку, сваренную из отдельных частей, и боковую крышку, также состоящую из нескольких частей. Обмотка фиксируется в корпусе с помощью стеклотекстолитовых прокладок, которые устанавливаются на дно, боковые поверхности и под крышку на эпоксидном компаунде холодного отверждения. После чего подгоняется боковая крышка и осуществляется её приварка. Пустоты внутри корпуса заполнялись эпоксидным компаундом. Катушка ОТП внутри D-образного корпуса перед отправкой в НИЦ «Курчатовский институт» показана на рис. 13.



Рис. 13. Катушка ОТП внутри D-образного корпуса

Боковые стороны корпусов соседних катушек связаны между собой четырьмя межблочными структурами, привариваемыми к половинкам корпуса до установки катушек. Межблочные структуры соседних катушек соединяются изолированными планками-шпонками. Корпуса катушек имеют на наружной поверхности приваренные горизонтальные площадки, служащие для установки и крепления ОУ и катушек ОГУП. Внутренние «ноги» катушек образуют арочный распор. В этой зоне между катушками устанавливаются тонкие стеклотекстолитовые прокладки для исключения образования замкнутых контуров на обходе тора. Вверху и внизу внутренние ноги соседних корпусов штифтуются между собой изолированными штифтами и стягиваются изолированными болтами.

Выводные концы катушек расположены в их нижних частях. Выводные клеммы катушек соединяются между собой неохлаждаемыми шинами-перемычками. Рядом с ними расположены компенсирующие шины с обратным током. Каждая группа из четырёх катушек запитывается с помощью кабелей, подходящих снизу. Снизу также производится подвод и отвод охлаждающей воды. Катушки ОТП охлаждаются дистиллированной водой, число параллельных ветвей охлаждения в катушке равно четырём.

Проведённые тепловые расчёты ОТП [21] показали, что максимальный перегрев проводника при тороидальном магнитном поле 2 Тл и длительности плато тока 10 с не превышает 57 °С.

ОБМОТКА ИНДУКТОРА

Обмотка индуктора состоит из трёх независимых катушек (151, 447 и 151 витков) [20]. Трёхсекционный индуктор, изготовленный в ООО «НПО ГКМП», показан на рис. 14. Каждая катушка наматывается двумя параллельными проводниками трапецеидальной формы (стороны трапеции 14,8 мм и 15 мм, высота 20 мм, отверстие для воды $\varnothing 8$ мм), изготовленными из сереброросодержащей меди. Катушки состоят из разного количества витков. Количество витков в центральной катушке увеличено по сравнению с верхней и нижней для того, чтобы конструкционные зазоры между катушками отодвинуть от экваториальной плоскости ОИ для улучшения условий пробы.



Рис. 14. Трёхсекционный индуктор

Между обмотками устанавливаются два стальных полукольца высотой 56 мм с изоляционными вставками. Выводные концы каждой из обмоток индуктора сбандажированы между собой, выведены вверх, закрепляются изоляционными колодками к стальным полукольцам и силовой структуре индуктора. Выводные концы расположены внутри индуктора равномерно через 120°. Трубки охлаждения обмоток индуктора также разделены на три зоны внутри индуктора и выводятся аналогично выводным концам в зонах между кронштейнами силовой структуры, но внизу индуктора.

Во время импульса тока на обмотки индуктора действуют вертикальные и радиальные силы. Жёсткость индуктора в вертикальном направлении из-за большой суммарной толщины изоляции мала. Для предотвращения появления вертикальных разрывающих усилий в изоляции все обмотки предварительно сжаты. Силовая структура индуктора представляет собой два торцевых фланца, каждый из которых состоит из шести изолированных друг от друга секторов, стянутых между собой изолированными болтами. Верхний и нижний фланцы стягиваются между собой предварительно напряжёнными составными по длине шестью шпильками М36 (общее усилие затяжки 90 т). На шпильках устанавливаются пакеты тарельчатых пружин, компенсирующих вертикальные силы, действующие на обмотки индуктора (электродинамические и термомеханические) при протекании токов. Верхний фланец через изоляцию устанавливается на верхнюю часть корпусов катушек ОТП в зоне арочного распора и прикрепляется 16 болтами М20 к катушкам ОТП, рассчитанными на общую нагрузку 120 т. Нижний фланец силовой структуры центрируется относительно катушек ОТП с помощью клинового устройства. Используются шпильки и болты повышенной прочности с пределом текучести не хуже 400 МПа. Параметры обмотки индуктора приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры обмотки индуктора

Параметр	ОИ1	ОИ2	ОИ3
Число витков в обмотке	151	457	151
Средняя длина витка, м		2,11	
Длина проводника катушки, м	638	1928	638
Масса меди, кг	1420	4290	1420
Максимальный ток, кА	±40	±40	±40
Омическое сопротивление обмотки, мОм	11	34,3	11
Собственная индуктивность обмотки, мГн	2,8	24,8	2,8
Число параллельных ветвей охлаждения	4	4	4
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	3,4	1,8	3,4
Потери давления, МПа	0,8	0,8	0,8

Катушки запитываются независимыми системами питания. Запас магнитного потока в центральном соленоиде $\Psi_{\text{ои}}$ приблизительно 6 Вб ($I_{\text{ои}} = \pm 40$ кА). Сценарий тока в центральной катушке обеспечивается четырьмя тиристорными преобразователями (± 40 кА, 3 кВ).

ОБМОТКИ УПРАВЛЕНИЯ

Электромагнитная система установки Т-15МД включает в себя шесть ОУ и четыре катушки обмотки горизонтального поля ОГУП [21, 22]. Обмотки спроектированы с расчётом на перегрев не более чем 60 °С и возможность их охлаждения за период между импульсами 15 мин. Параметры обмоток даны в табл. 2.

Таблица 2. Технические параметры обмоток управления

Параметр	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6	ОГУП
Число катушек	1	1	1	1	1	2	4
Число секций в катушке	5	5	4	5	5	6	1
Число витков в катушке	100	100	48	60	80	432	10
Площадь и \varnothing Си-проводника, мм	22×22, \varnothing 10,5	23,5×23,5, \varnothing 8,8	22×22, \varnothing 10,5	23,5×23,5, \varnothing 8,8	23,5×23,5, \varnothing 8,8	18×18, \varnothing 8	
Средняя длина витка, м	5,47	14,6	19,1	20,4	16,5	4,67	12
Максимальный ток, кА	15	12	15,5	17	17	20,5	10
Число параллельных каналов	5	10	8	10	10	12	1
Расход воды, м ³ /ч	1,2	4,3	1,9	4,3	4,8	5,7	1,4
Температура нагрева проводника за импульс, °С	53	32	61	37	41	61	60

Все обмотки управления ОУ1—ОУ6 представляют собой катушки, собранные из двухслойных секций, намотанных полыми медными проводниками. Изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты и стеклоленты с эпоксидным связующим. В зонах крепления к катушкам ОТП обмотки имеют силовые крепления (секторы-каркасы) из нержавеющей стали толщиной 15—20 мм, равномерно распределённые по обходу обмотки, под секторами-каркасами изоляция обмоток усилена стеклотекстолитовыми и резиновыми прокладками, предохраняющими их от возможных механических повреждений.

Обмотки управления ОУ1—ОУ5 крепятся снаружи к корпусам обмотки тороидального поля, обмотка ОУ6 укладывается в центральную опору токамака Т-15МД (см. рис. 8). Подвод тока к обмоткам управления осуществляется кабелями. Все обмотки управления охлаждаются дистиллированной водой. Четыре катушки ОГУП имеют рамочную форму и крепятся к корпусам ОТП на наружном обводе в пространстве между ОТП и вакуумной камерой. Каждая катушка ОГУП имеет 10 витков, намотанных медным полым проводником.

Обмотки управления, изготовленные на заводах ЭФО АО «НИИЭФА» (ОУ1, ОУ2 и ОУ6) и ООО «НПО ГКМП» (ОУ3, ОУ4, ОУ5, ОГУП), представлены на рис. 15, а—г.



Рис. 15. Обмотки управления: ОУ1 и ОУ6 (а); ОУ2 (б); ОУ3, ОУ4, ОУ5 (в); катушки обмотки управления ОГУП (г)

ВАКУУМНАЯ КАМЕРА

Вакуумная камера (ВК) токамака Т-15МД предназначена для получения в ней плазмы с термоядерными параметрами, размещения внутрикамерных элементов и диагностик. Технические характеристики ВК:

Количество полномасштабных циклов разряда плазмы за весь срок эксплуатации . . .	5×10^4
Длительность разряда, с . . .	≥ 5
Пауза между импульсами, мин . . .	15
Количество срывов тока плазмы ($B_t \leq 2$ Тл; $I_p \leq 2$ МА). . .	5×10^3
Температура прогрева ВК, °С . . .	220 ± 20
Предельное фоновое давление, Па . . .	10^{-5}
Пиковая тепловая нагрузка на дивертор, МВт/м ² . . .	10
Мощность теплоотвода с первой стенки, МВт/м ² . . .	0,2
Минимальный зазор плазма—первая стенка в экваториальной плоскости установки:	
на внутреннем радиусе, мм . . .	30
на наружном радиусе, мм . . .	150
Расстояние между X-точкой и защитным покрытием дивертора:	
по наружной ветви сепаратрисы, м . . .	0,5
по внутренней ветви сепаратрисы, м . . .	0,25
Толщина стенки:	
внутреннего цилиндра, мм . . .	5
внешнего цилиндра, мм . . .	8
конических и плоских элементов, мм . . .	8
Внутренний размер камеры по вертикали, м . . .	3,39
Площадь поверхности, обращённой к плазме, м ² . . .	~150
Материал облицовки первой стенки . . .	Графит FP479
Объём вакуумной камеры, м ³ . . .	~47
Материал вакуумной камеры . . .	Нержавеющая сталь 321 ($\mu \leq 1,1$)

Вакуумная камера показана на рис. 16.

В состав вакуумной камеры входят оболочка, патрубки, элементы защитного покрытия, опорная структура, витки пассивной стабилизации, верхний и нижний диверторы, элементы системы омического прогрева, система электромагнитной диагностики, подвижная диафрагма, четыре штыря тлеющего разряда.

Вакуумная камера имеет 16 экваториальных портов прямоугольного сечения (400×880 мм 8 шт., 400×840 мм 4 шт. и 400×720 мм 4 шт.), к которым пристыковываются экваториальные патрубки. Фланцевые соединения экваториальных патрубков обеспечиваются сваркой. На период пусконаладочных работ предусмотрена возможность уплотнения с помощью эластомерных уплотнителей.

В верхней и нижней части ВК имеются малые патрубки Ду40 и Ду63, которые привариваются к оболочке ВК. Сварные соединения выполняются изнутри ВК и позволяют выполнить 2—3 цикла сварки-резки в случае демонтажа при ремонте ВК. Патрубки Ду160, Ду200 и Ду250 снабжены заглушками, вместо которых в процессе эксплуатации устанавливаются удлинительные патрубки или иное оборудование. Фланцевые соединения всех патрубков ВК, кроме экваториальных, выполняются на металлическом уплотнителе типа conflat.

Геометрия экваториальных патрубков определялась требованиями к инжекции пучков нейтралов: про-свет патрубка по нормали к оси пучка 300×800 мм; пучки быстрых атомов вводятся тангенциально к плазменному шнуру по радиусу (прицельный параметр): $R = R_0 - a/2 = 1,48 - 0,67/2 = 1,145$ м, где R — текущий большой радиус тора, R_0 — большой радиус плазмы, a — малый радиус плазмы.



Рис. 16. Вакуумная камера

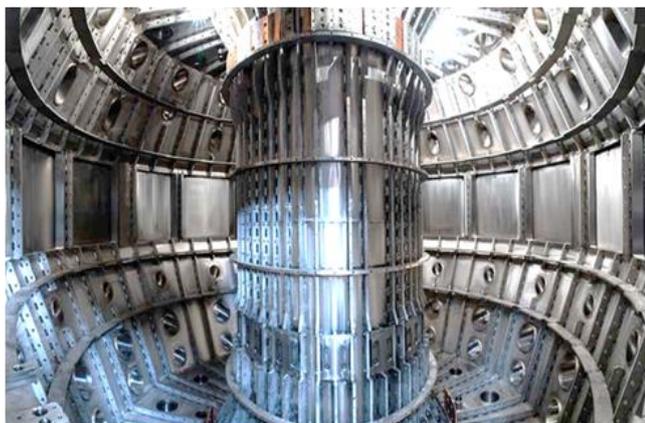


Рис. 17. Внутренняя поверхность камеры

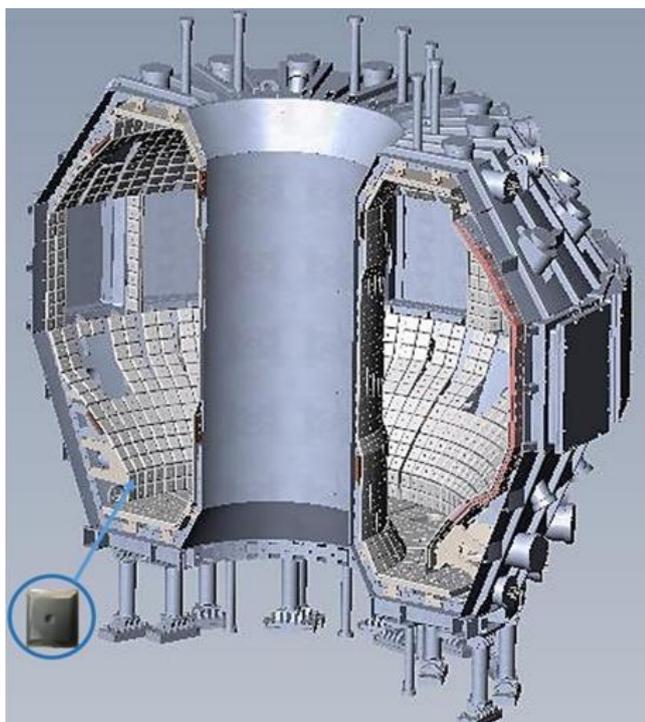


Рис. 18. Защитное графитовое покрытие на внутренней поверхности камеры

В трёх верхних вертикальных патрубках Ду160 установлены штыри тлеющего разряда, которые предназначены для технологической очистки внутренней поверхности ВК и поверхностей внутрикамерных элементов.

Внутренняя поверхность камеры снабжена рёбрами (рис. 17), на которые устанавливаются элементы защитного покрытия (рис. 18).

Каждый элемент представляет собой пластину из графита FP479 толщиной 20 мм с оправой из стали 12X18H10T, с помощью которой пластина крепится к рёбрам. Модульный принцип конструкции и универсальные узлы крепления оправы позволяют устанавливать элементы различной конфигурации. Конструкция крепления элементов защитного покрытия позволяет выполнить их замену при эксплуатации или ремонте со вскрытием ВК на атмосферу. Элементы защитного покрытия образуют сплошную поверхность на внутреннем цилиндре и витках пассивной стабилизации. На наружном обводе камеры элементы защитного покрытия устанавливаются между экваториальными патрубками и на перемычке устройства пассивной стабилизации.

Защитное покрытие в верхней части ВК, которое обеспечивает восприятие тепловой нагрузки при работе с двухнулевой магнитной конфигурацией, состоит из 16 элементов первой стенки, имеющих водяное охлаждение. Элемент первой стенки представляет собой подложку из стали 12X18H10T, к которой крепятся элементы защитного покрытия из графита FP479 толщиной до 25 мм. Подложка из стали 12X18H10T имеет на внутренней стороне систему каналов прямоугольного сечения, через которые прокачивается охлаждающая вода. Обеспечение водой каждого из элементов первой стенки осу-

ществляется через два патрубка Ду63 в потолке ВК.

Конструкция элементов защитного покрытия имеет промежутки, которые обеспечивают визуализацию плазмы через верхние, верхние наклонные, экваториальные, нижние горизонтальные и нижние наклонные патрубки.

Витки пассивной стабилизации предназначены для уменьшения скорости ухода плазмы по вертикали. Витки пассивной стабилизации представляют собой тороидально направленные токопроводящие витки с межвитковой перемычкой, которые размещаются на внутреннем и внешнем обводах внутри оболочки ВК. Витки имеют электрический разрыв в тороидальном направлении. В месте тороидального электрического разрыва концы витков соединены между собой в полоидальном направлении перемычкой, которая представляет собой параллельные шины, наложенные одна на другую с изоляцией между ними. Перемычка электрически изолирована от ВК. Шины перемычки коммутированы таким образом, чтобы суммарный ток верхнего и нижнего витков был равен нулю. Поперечное сечение каждого из витков и шин перемычки прямоугольное (20×200 мм). На поверхности витков и перемычки, обращённых к плазме, установлены элементы защитного покрытия.

Материал витков и шин перемычки — бронза с удельным сопротивлением 0,033 мкОм·м при температуре 220 °С.

Дивертор токамака Т-15МД должен воспринимать без потери работоспособности тепловые потоки удельной мощностью до 10 МВт/м². Максимальная температура поверхности приёмных графитовых плиток дивертора во время разрядного импульса не должна превышать 1000 °С. Система охлаждения дивертора должна обеспечивать снижение температуры поверхности плиток до значения 220 °С за время не более 15 мин после плазменного импульса.

Дивертор располагается в нижней и верхней частях вакуумной камеры. Дивертор представляет собой кольцевую структуру из 16 секторов. Внутренние приёмные графитовые плитки расположены на конусной части дивертора. Толщина плиток 25 мм. Габариты плиток ~100 × 10 мм (см. рис. 17). Крепление плиток к подложке осуществляется винтами с наружной стороны пластины. Для улучшения теплопередачи между подложкой и приёмной плиткой уложена прокладка из граффлекса. Между головкой винта и планкой предусмотрена пружинная шайба, позволяющая сохранить усилие предварительного натяга резьбового соединения при изменении температуры деталей в процессе эксплуатации.

Внешние плитки дивертора расположены на плоской части подложки. Крепление внешних плиток выполнено аналогично креплению внутренних.

Опора представляет собой оребрённую несущую конструкцию, выполненную из стали 12Х18Н10Т. Верхняя часть опоры выполнена в виде охлаждаемой подложки, на которой закрепляются плитки. Каналы охлаждения в подложке образуют параллельные ветви. В нижней части подложки к каналам подходят трубки, соединяющие каналы с двумя коллекторами. Прогрев приёмных плиток до 400 °С осуществляется с помощью кабеля типа КНМСНХ, закреплённого на нижней поверхности подложки.

Для контроля температурных характеристик элементов дивертора установлены термопары, представляющие собой термостойкий кабель КНМСС (ХК). Термопары расположены по оси сектора внутри графитовых плиток, всего 35 термопар. Расстояние между термопарами ~30 мм. На той же оси сектора предусмотрена установка диагностических электрических зондов. Диагностический зонд диаметром 40 мм расположен на радиусе $R = 1160$ мм от центральной оси установки. Предусмотрено перемещение зонда на расстояние 370 мм от наружной поверхности графитовой плитки. Малые диагностические зонды диаметром 5 мм выступают над поверхностью плиток, обращённых к плазме, на 2 мм. Расстояние между зондами ~30 мм, всего 33 зонда. Зонды, выполненные из графита, изолированы электрически от графитовых плиток и конструкции опоры. В качестве проводов от зондов применён термостойкий кабель типа КТМС. Выводы кабелей и проводов из вакуумной камеры выполнены через нижние вертикальные и горизонтальные патрубки вакуумной камеры.

СИСТЕМА ОМИЧЕСКОГО ПРОГРЕВА КАМЕРЫ

Для кондиционирования стенок камеры токамака Т-15МД используются омический прогрев [27] и тлеющий разряд. Для достижения температуры прогрева камеры 220 ± 20 °С 95 омических нагревателей (нихромовая проволока диаметром 1,2 мм внутри оболочки из нержавеющей стали диаметром 6 мм с изолятором из окиси магния, сопротивление 1 Ом/м) проложены на поверхности камеры как снаружи, так и изнутри (на цилиндре). Впервые такие нагреватели использовались для прогрева камеры сверхпроводящего токамака Т-15 [28].

Все 95 нагревателей разделены на четыре характеристические зоны камеры. Зона 1 (32 нагревателя) — верхний внутренний конус, верх камеры, верхний внешний конус; зона 2 (32 нагревателя) — нижний внутренний конус, низ камеры, нижний внешний конус; зона 3 (15 нагревателей) — поверхность цилиндра, обращённая к плазме; зона 4 (16 нагревателей) — горизонтальные патрубки.

Нагреватели зон 1, 2, 4 расположены на внешней поверхности камеры, в то время как нагреватели зоны 3 расположены внутри камеры. 30 концов нагревателей зоны 3 выводятся через четыре нижних патрубка. Концы нагревателей подсоединяются к однофазным тиристорным регуляторам, которые осуществляют регулирование величины токов в нагревателях.

Температура поверхности камеры измеряется термопарами (всего 102 шт.). Два из 16 сечений камеры по полоидальному обходу имеют по 17 термопар. Сигналы с термопар поступают в систему сбора данных, где они обрабатываются и затем отображаются на мониторе в виде цифровых значений температуры во времени. Одновременно с этим рассчитываются и отображаются на мониторе токи в нагревателях и значение полной мощности.

Внешняя поверхность ВК, кроме внутреннего цилиндра, закрыта теплоизоляцией, которая состоит из отдельных матов, что позволяет легко их демонтировать в случае необходимости. Маты представляют собой термостойкий чехол, заполненный минеральной базальтовой ватой. Теплоизоляционные маты укладываются на поверхность ВК в два слоя. Первый слой теплоизоляции укладывается в промежутках между силовыми рёбрами ВК, второй слой — поверх рёбер с перекрытием стыков в первом слое теплоизоляции. Суммарная толщина изоляции 100 мм была выбрана для того, чтобы температура на её поверхности при прогреве не превышала 40 °С.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СБОРКА ЭМС И ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Предварительная сборка магнитной системы токамака Т-15МД [25] была проведена в ООО «НПО ГКМП». Целями предварительной сборки магнитной системы являлись проверка сопряжения всех элементов между собой, получение необходимого опыта для последующей сборки токамака в НИЦ «Курчатовский институт».

Для сборки магнитной системы внутри цеха был вырыт котлован глубиной 1,6 м и диаметром 10 м для заливки плиты, усиленной металлической сеткой (рис. 19). Поверхность фундаментной плиты для установки центральной фермы и секторов опорной структуры в горизонтальной плоскости была выверена



Рис. 19. Фундамент под сборку ЭМС и вакуумной камеры

лазерным нивелиром с точностью, позволяющей произвести их установку с применением минимального количества прокладок (3 шт.).

На первом этапе проводились сборка и монтаж центральной фермы на фундамент. Точность монтажа в горизонтальной плоскости обеспечивалась установкой маячков между центральной фермой и фундаментом с последующей заливкой цементным раствором получившегося зазора. Точность монтажа секторов опорной структуры в горизонтальной плоскости обеспечивалась установкой изолирующих прокладок между фундаментом и секторами. В центре опорной структуры проводился монтаж технологической колонны с наружным диаметром 830 мм.

Отклонение от вертикали с точностью 1 мм обеспечивалось технологическими прокладками, установленными между фланцем колонны и секторами опорной структуры.

Для последующей установки катушек ОТП на секторы опорной структуры проводился монтаж подставок под катушки ОТП (см. рис. 10), технологических тумб для временной установки катушек ОТП с клиновыми домкратами для выставления катушек ОТП с требуемым допуском в вертикальной плоскости. Первая катушка ОТП с приклеенной к плоскости клина изоляционной прокладкой устанавливалась опорным кронштейном на плоскость клинового домкрата и крепилась с помощью прижима к технологической колонне. Вторая катушка ОТП устанавливалась как первая, с обеспечением крепления изолированными шпильками к первой катушке ОТП. Крепление остальных катушек ОТП происходило аналогично креплению второй катушки ОТП. Сборка тороидального магнита показана на рис. 11.



Рис. 20. ОТП вместе с обмотками управления ОУ1, ОУ3, ОУ4

Межблочная механическая структура пристыковывалась к корпусам с помощью сварки. Изначально все четыре ряда межблочной механической структуры (верхняя, нижняя промежуточная, верхняя промежуточная и нижняя) были приварены точечно. Окончательная сварка была проведена после проверки правильности установки межблочной структуры.

После монтажа 16 катушек ОТП был проведён монтаж обмоток управления ОУ1, ОУ3, ОУ4 (рис. 20).

Для установки четырёхугольной формы активных катушек обмотки горизонтального поля ОГУП, размещаемых вокруг тора в пространстве между оболочкой вакуумной

камеры и тороидальной обмоткой, одна из тороидальных катушек была демонтирована. Положение катушек ОГУП контролировалось лазерным нивелиром. Монтаж катушек проводился с помощью кронштейнов, которые приваривались к корпусам тороидальных катушек. Катушки ОГУП были скреплены между собой. Размещение катушек ОГУП внутри тороидальной обмотки показано на рис. 21. Монтаж обмотки индуктора в экспериментальном зале в НИЦ «Курчатовский институт» сверху в центральное отверстие, образованное сводом катушек тороидального поля, невозможен в силу недостаточности выноса крюка мостового крана.

Поэтому на стадии предварительной сборки было принято решение о монтаже индуктора сбоку после монтажа половины катушек тороидального поля.

На рис. 22 показано расположение индуктора вместе с восемью катушками ОТП после монтажа. Для обеспечения возможности монтажа внутри обмотки тороидального поля вакуумная камера после её прогрева до максимальной температуры 187 °С с целью определения надёжности большого количества сварных швов и вакуумных уплотнений [28] была разрезана на четыре секции. Используя специальные рельсы, три секции камеры поочерёдно были заведены в конструкцию, состоящую из 12 катушек ОТП, куда ранее были смонтированы три катушки ОГУП. Окончательно монтажный модуль, состоящий из четырёх катушек ОТП, секции камеры и катушки ОГУП как единое целое, был интегрирован в уже собранную конструкцию до полной её сборки (рис. 23, а, б). Единая тороидальная камера формируется внутри ЭМС на своих опорах, устанавливаемых на общую с ЭМС кольцевую подставку и изолированных от неё. При этом сварка четырёх секций между собой возможна только из внутреннего объёма камеры, так как ОТП в значительной мере перекрывает, а центральный соленоид полностью исключает доступ к внешней поверхности камеры. После окончания предварительной сборки ЭМС (ОТП и ОГУП) совместно с секциями вакуумной камеры были демонтированы на отдельные элементы для последующей их покраски (кроме секций ВК) и транспортировки из ООО «НПО ГКМП» в НИЦ «Курчатовский институт» для монтажа токамака Т-15МД в экспериментальном зале. Монтаж электромагнитной системы был начат в октябре 2018 г. Ожидается, что полностью монтаж установки будет завершён в марте 2019 г. На рис. 24 показан монтаж ЭМС токамака Т-15МД в экспериментальном зале.



Рис. 21. ОГУП внутри ОТП



Рис. 22. ОИ совместно с восемью катушками ОТП



Рис. 23. 3/4 ОТП с тремя секциями вакуумной камеры и монтажный модуль (а); полностью собранная ОТП с четырьмя секциями вакуумной камеры (б)

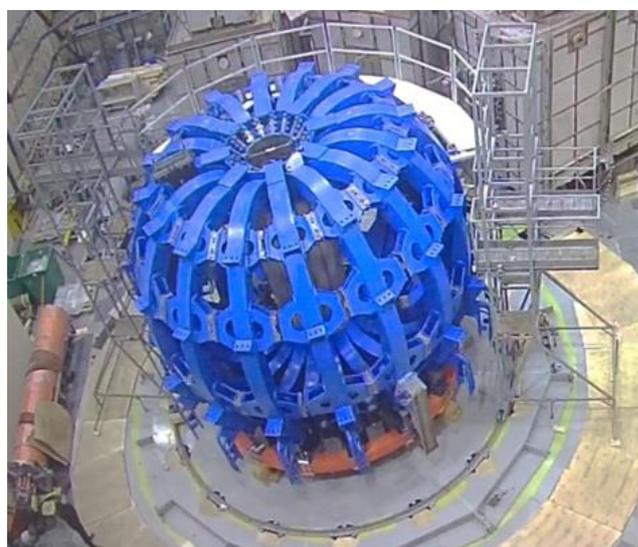


Рис. 24. Монтаж ЭМС токамака Т-15МД в экспериментальном зале

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

После ввода в работу в 1988 г. сверхпроводящего токамака Т-15 технологическое оборудование выработало свой ресурс и потребовалась его замена на современное. Проводимая модернизация инженерных и технологических систем [29] позволит повысить технические характеристики систем и их надёжность, а автоматизация технологических процессов повысит безаварийную работу и обеспечит значительное уменьшение обслуживающего персонала.

Система высоковакуумной откачки. Четыре турбомолекулярных насоса (Varian Turbo-V2000HT/3K-T, DN250) обеспечат высоковакуумную откачку камеры с общей производительностью $\sim 10 \text{ м}^3/\text{с}$ (H_2), два криогенных насоса (Suzuki Shokan SA10SI-01S, DN250) имеют производительность $4 \text{ м}^3/\text{с}$ (H_2) каждый. Каждая из четырёх откачных ячеек состоит из винтового форвакуумного насоса (Hanbell PS80) и турбомолекулярного насоса. Насосы будут размещены снизу установки на расстоянии 6 м от неё во избежание поломки их из-за появления больших рассеянных магнитных полей во время работы с плазмой. Всё откачное оборудование было испытано как в ручном, так и в автоматическом режиме с применением системы управления.

Система водяного охлаждения. Магнитная система, внутрикамерные элементы, турбомолекулярные насосы, оборудование дополнительного нагрева плазмы охлаждаются дистиллированной водой с давлением 5 и 10 атм. Нагретая дистиллированная вода охлаждается в теплообменниках речной водой. Количество различных насосов для дистиллированной воды 12, для речной воды — 10. Общая производительность насосов для дистиллированной воды $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ (четыре насоса, $560 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $H = 125 \text{ м}$ каждый), а массовый расход речной воды $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Оборудование для системы водяного охлаждения было смонтировано и испытано.

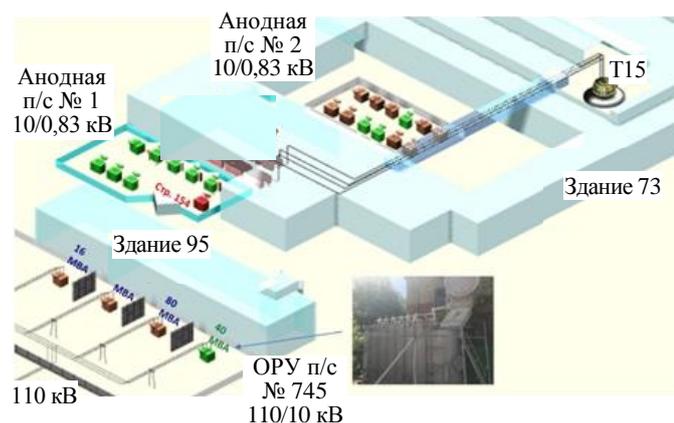


Рис. 25. Ситуационный план объектов электроснабжения (зеленый цвет — вновь устанавливаемое оборудование)

Всё оборудование приобретено, и часть его смонтирована и испытана. 32 из 96 вакуумных распределительных устройства (10 кВ, $I = 1000, 2000, 3150 \text{ А}$), размещённые в здании 95, были введены в работу. Реконструкция подстанции № 745 завершена в 2018 г.

Подстанция № 110 (110/10/0,4 кВ) предназначена для электропитания технологического оборудования, размещённого в здании 73, где будет расположен токамак. Трансформаторы различной мощности (10/0,4 кВ, 400—1000 кВА) и 32 вакуумных распределительных устройства (10 кВ, 1000 А) введены в работу в 2017 г.

Подстанции № 1, 2 предназначены для электропитания магнитной системы токамака Т-15МД и систем дополнительного нагрева плазмы. 16 новых импульсных масляных трёхфазных трансформаторов будут смонтированы в восьми баках (в одном баке — два трансформатора) на подстанции № 1, четыре трансформатора будут размещены на подстанции № 2. Каждый трансформатор подключён к тиристорному преобразователю. Все трансформаторы будут изготовлены и смонтированы в 2019 г.

Двадцать новых тиристорных преобразователей для питания тороидальной обмотки и трёх катушек индуктора должны быть установлены вместо старых. Тиристорные преобразователи для тороидальной обмотки имеют выходные параметры 1 кВ, 20 кА, а для трёх катушек индуктора — 1 кВ, 40 кА. Новые тиристорные преобразователи будут изготовлены и установлены в 2019 г.

Система электропитания. Система питания токамака Т-15МД (рис. 25) включает две подстанции 110/10 кВ, две подстанции 10/1 кВ, тиристорные преобразователи и различное оборудование. Общее потребление мощности во время импульса с током плазмы 2 МА и дополнительным нагревом плазмы 15 МВт составит 280 МВА. Подстанция № 745 (НИЦ «Курчатовский институт») соединена с теплоэлектроцентралью маслонаполненным кабелем 110 кВ. Два масляных трансформатора 80 МВА, 110/10 кВ и один масляный трансформатор 40 МВА, 110/10 кВ предназначены для импульсной нагрузки во время экспериментов с плазмой. Трансформатор 16 МВА, 110/10 кВ предназначен для собственных нужд.

Диагностическая система. Токамак Т-15МД будет снабжён современной физической диагностикой [29]. Для измерения ионной температуры посредством CXRS будет использован диагностический пучок быстрых атомов ($E = 20\text{—}60$ кэВ, $I_b = 10$ А) (рис. 26, а) совместно со светосильным спектрометром высокого разрешения (рис. 26, б) и многощелевым спектрометром высокого разре-

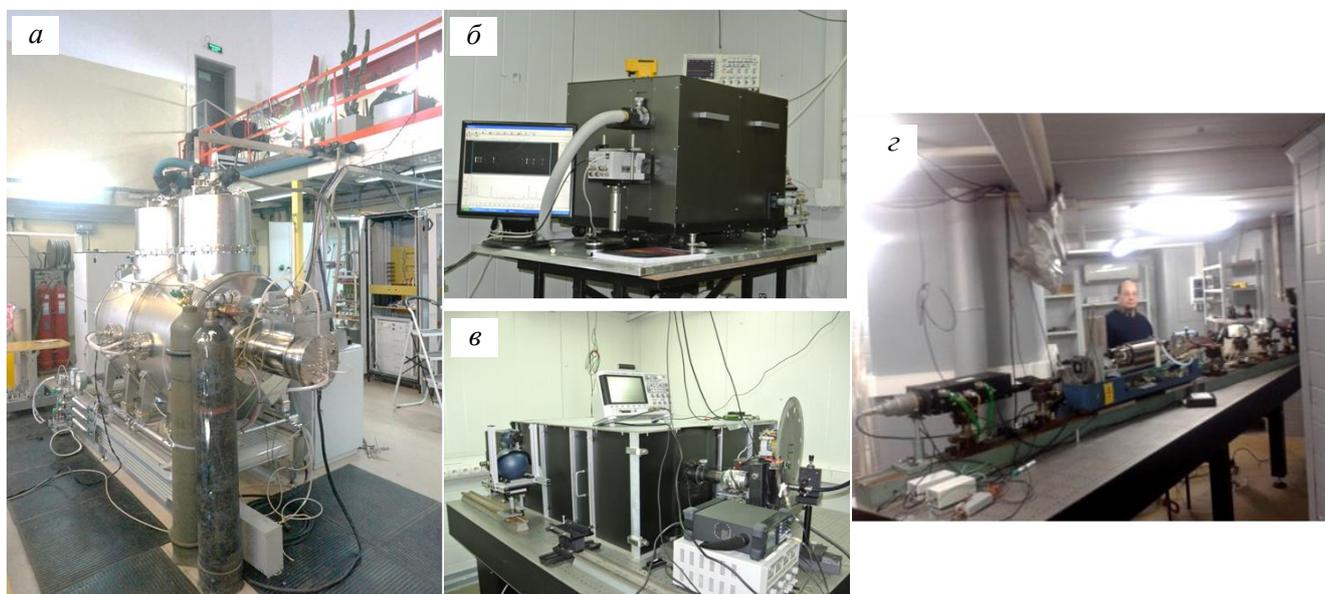


Рис. 26. Инжектор пучка нейтральных атомов (а), светосильный спектрометр (б), многощелевой спектрометр (в), твердотельный лазер 100 Гц (г)

шения (рис. 26, в). Электронная температура будет измеряться методом томсоновского рассеяния с помощью твердотельного лазера 100 Гц (рис. 26, г). Для измерения плотности плазмы будут использоваться СВЧ- и лазерный интерферометры. Внутри вакуумной камеры будет установлено большое количество электромагнитных зондов для измерения тока плазмы, напряжения обхода, магнитных полей, МГД-активности и т.д. Будут регистрироваться мягкое рентгеновское излучение и радиационные потери. Всё диагностическое оборудование имеется, а часть его была задействована в экспериментах на токамаке Т-10.

Пультовая располагается за стеной зала токамака (рис. 27). Имеется 38 мест для экспериментаторов. Пультовая соединена с Курчатовским вычислительным центром по линии со скоростью передачи 100 Мб/с.



Рис. 27. Пультовая

Информационно-управляющая система (ИУС). Токамак Т-15МД будет работать, используя ИУС [30]. Ядром этой системы является Центральная управляющая система, которая координирует и управляет основными технологическими подсистемами. Оборудование ИУС базируется на контроллерах Schneider Electric и программном обеспечении Wonder Ware. Быстрые проблемно-ориентированные подсистемы, включая блокировки, контроль плазмы, синхронизацию и координацию, основаны на платформе National Instruments (NI). Комплекс для сбора, обработки и хранения экспериментальных данных базируется на платформе NI, MS Windows и MS SQL.



Рис. 28. Центр обработки данных

В настоящее время всё оборудование для ИУС, требуемое для проведения физического пуска токамака Т-15МД в 2020 г., имеется. Центр обработки данных показан на рис. 28. Оборудование системы управления было проверено и испытано совместно с технологическими подсистемами. Требуется окончательная наладка ИУС после подключения всех технологических систем к токамаку Т-15МД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Токамак Т-15МД будет единственной установкой ИТЭР-подобного типа такого масштаба, работающей в России в течение ближайших 10—15 лет. Поэтому такой проект должен стать центром исследований по программе УТС, объединяющим научный и технический потенциал различных коллективов страны. Токамак Т-15МД с мощной системой дополнительного нагрева плазмы (15—20 МВт), позволяющей достигать термоядерных параметров плазмы, станет новым инструментом для научных исследований, с помощью которого в рамках НИОКР будет возможным решение широкого спектра физических проблем и дальнейшее развитие технологий, необходимых для надёжного обоснования параметров энергетического термоядерного и гибридного реакторов. Исследования на установке Т-15МД обеспечат подготовку научных и инженерных кадров для эксплуатации токамака ИТЭР и реализации проектов по созданию стационарных термоядерных реакторов и перспективных гибридных систем на основе токамаков в нашей стране.

Авторы хотели прежде всего отдать дань светлой памяти профессору Э.А. Азизову, который является инициатором создания токамака Т-15МД, поблагодарить всех инженеров, учёных, монтажников, строителей, специалистов, которые принимают участие в проектировании и изготовлении токамака Т-15МД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральная** целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года». Постановление Правительства Российской Федерации от 3 февраля 2010 г. № 50.
2. **Азизов Э.А., Минеев А.Б.** Об унификации подходов к выбору параметров токамаков и некоторых целях дальнейшего развития национальных термоядерных программ. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 3, с. 3—12.
3. **Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И.** Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза. — Физика плазмы, 2010, т. 36, с. 307—346.
4. **Bell M.G., McGuire K.M., Arunasalam V. et al.** Overview of DT results from TFTR. — Nucl. Fusion, 1995, vol. 35, № 12, p. 1429.
5. **Jacquinot J. and JET Team.** JET results in D—T divertor plasmas. — Nuclear Fusion, 1995, vol. 38, № 9, p. 1263.
6. **Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y.** The ITER design. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. 519—565.
7. **Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Gladush G.G. et al.** The concept of the volumetric neutron source on the basis of the JUST-T tokamak for minor actinides transmutation. — Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, p. 279.
8. **Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Buzhinskij O.I. et al.** Plasma-physical and electrophysical aspects of the compact stationary neutron source on the basis of a tokamak. — Plasma Devices and Operations, 2005, vol. 13, № 3, p. 167.
9. **Какурин А.М., Леонов В.М., Ноткин Г.Е., Хвостенко П.П. и др.** Основные сценарии разряда токамака Т-15М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, с. 53—75.
10. **Альхимович В.А., Велихов Е.П., Вершков В.А. и др.** Инженерно-физическое обоснование реконструкции токамака Т-15. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, с. 3—15.
11. **Benoit F., Allegretti L., Aumeunier M.-H. et al.** Implementation of a design and configuration management platform for fusion components on the Tore Supra WEST Project. — Fusion Engineering and Design, 2014, vol. 89, Issues 9—10, p. 1928—1932.
12. **Поручение** Правительства РФ от 12.08.2010 № П7-28262.
13. **Azizov E.A., Belyakov V.A., Filatov O.G., Velikhov E.P. and T-15MD Team.** Status of project of engineering-physical tokamak. — In: 23rd IAEA Fusion Energy Conf. (FEC 2010). Daejeon, Korea Rep., 11—16 October 2010, FTP/P6-01.
14. **Melnikov A.V., Sushkov A.V., Belov A.M. et al.** Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak (brief overview). — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 96—97, p. 306—310.

15. **Azizov E.A., Leonov V.M., Panasenkov A.A., Tilinin G.N., Khvostenko P.P.** Engineering-physical tokamak T-15MD and steady-state injection. — *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 59, № 1T, p. 180—183.
16. **Roy I., Anashkin I., Barsukov A. et al.** The auxiliary heating and current drive systems on the tokamak T-15 upgrade. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, Russian Federation, October 13—18, 2014, Book of Abstracts, EX/P1-50, p. 204.
17. **Khvostenko P., Vdovin V., Azizov E.** ICRF system on tokamak T-15. — *Ibid.*, FIP/P5-4, p. 540.
18. **Azizov E.A., Velikhov E.P., Tazhibayeva I.L. et al.** Kazakhstan Tokamak for Materials Testing (KTM) and Fusion Problems. — Almaty, Kazakstan, 2006.
19. **Gribov Y., Albanese R., Ambrosino G. et al.** ITER-FEAT scenarios and plasma position/shape control. — In: Proc. of the 18th IAEA Fusion Energy Conf. Sorrento, Italy, Oct. 2000, ITERP/02.
20. **Леонов В.М.** Исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке Т-15МД. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2016, т. 39, вып. 3, с. 73—79.
21. **Khayrutdinov R.R., Lukash V.E.** Studies of plasma equilibrium and transport in a tokamak fusion device with the inverse-variable technique. — *J. of Computational Physics*, 1993, vol. 109, № 2, p. 193—201.
22. **Khvostenko P.P., Azizov E.A., Alfimov D.E. et al.** The magnet system of the tokamak T-15 upgrade. — *Fusion Engineering and Design*, 2015, vol. 98—99, p. 1090—1093.
23. **Днестровский Ю.Н., Данилов А.В., Днестровский А.Ю. и др.** Режимы работы модифицированной установки Т-15. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2013, т. 36, вып. 4, с. 45—63.
24. **Bondarchuk E.N. et al.** Engineering problems of tokamak T-15 electromagnet system. — *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, Issue 3, Paper 4201604.
25. **Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Injutin N.V., Romannikov A.N., Solopeco A.V.** Preassembly of the tokamak T-15MD magnet system. — *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 124, p. 114—118.
26. **Технический проект экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15М.** НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, 2002 г.
27. **Khvostenko A. et al.** Prebaking of T-15MD vacuum vessel. — In: 30th Symp. on Fusion Technology. Giardini Naxos, Sicily, Italy, September 16—21, 2018, Book of abstracts, p. 228.
28. **Garnov V.N., Kabanovsky S.V., Khvostenko P.P. et al.** Ohmic baking system upgrade for wall conditionig of tokamak-15 discharge chamber. — In: Proc. of the 19th Symp. on Fusion Technology. Lisbon, Portugal, 16—20 September, 1996, vol. 1, p. 515.
29. **Khvostenko P. et al.** Tokamak T-15MD — two years before the physical start-up. — *Fusion Engineering and Design*; <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.018>.
30. **Моцкин Ю.Я., Соколов М.М., Хвостенко П.П.** Информационно-управляющая система экспериментальной термоядерной установки «Токамак Т-15». — *МКА: ВКС*, 2015, № 3, с. 29—37.



Петр Павлович Хвостенко, научный руководитель, д. техн. н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова, ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён ведомственными знаками отличия ГК «Росатом»; ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Khvostenko_PP@nrcki.ru



Игорь Олегович Анашкин, начальник отдела, лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Эдуард Николаевич Бондарчук, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на металлострой 3, Россия
bondar@sintez.niiefa.spb.su



Николай Владиславович Инютин, Генеральный директор; ООО «НПО ГКМП», 241022 Брянск, бульвар Щорса 7, Россия



Вячеслав Александрович Крылов, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на металлострой 3, Россия
krylov@sintez.niiefa.spb.su



Игорь Валентинович Левин, главный инженер, лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности, награждён ведомственными знаками отличия ГК «Росатом» и Министерства образования и науки; ККТЭиПТ НИЦ «Курчатowski институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Анатолий Борисович Минеев, в.н.с., к.ф.-м.н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на металлострой 3, Россия
mineevab@sintez.niiefa.spb.su



Михаил Михайлович Соколов, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова и А.П. Александрова; ККТЭиПТ НИЦ «Курчатowski институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Sokolov_MM@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2018 г.

После доработки 10 декабря 2018 г.

Принята к публикации 18 декабря 2018 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15—38.