

Федеральное государственное бюджетное учреждение
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

На правах рукописи

УДК 621.039.6



Хвостенко Петр Павлович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТОКАМАКА Т-15
И КОНЦЕПЦИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ
ТОКАМАКА Т-15МД

Специальность: 05.14.03

Ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Официальные оппоненты: Гладуш Геннадий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», г. Москва, г.Троицк

Зимин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва.

Красильников Анатолий Витальевич, доктор физико-математических наук, директор Частного учреждения «ИТЭР - Центр», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «17» мая 2016 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу 123182 г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 520.009.06, кандидат физико-математических наук



А.С. Колокол

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основной тенденцией развития общества в XXI веке является непрерывный рост энергопотребления, связанный как с ростом народонаселения, так и с нарастанием потребности в энергии стран третьего мира, что необходимо для их развития. Возможности удовлетворения возрастающих потребностей в энергии, как за счет топлива органического происхождения, так и за счет 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, а также торий. Одним из наиболее перспективных инновационных источников энергии является управляемый термоядерный синтез (УТС). Основным стратегическим направлением работ в области УТС в Российской Федерации является поддержка и участие в проекте ИТЭР, а также участие в разработке демонстрационного термоядерного реактора ДЭМО как экологически чистого источника энергии.

Развитие и создание термоядерного источника нейтронов (ТИН) для гибридной энергетики является параллельным направлением. 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 демонстрации энергетических возможностей реакций синтеза. 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.

Стационарный режим работы предъявляет серьезные требования к технологическим системам реактора. К ним относятся сверхпроводящая магнитная система, вакуумная и криогенная системы, система электропитания, система управления формой и положением плазменного шнура, система нагрева и поддержания плазменного тока и др. Среди инженерных проблем создания термоядерного реактора на основе концепции токамака, на одном из первых мест стоит создание сверхпроводящей магнитной системы. Именно она будет одной из наиболее сложных, дорогих и ответственных частей будущей термоядерной электростанции.

Создание и запуск крупнейшего в мире сверхпроводящего токамака Т-15 в 1988 году потребовало детального исследования совместной работы всех технологических систем установки. Необходимо было определить соответствие принятых при разработке отдельных систем установки проектных решений и расчетных параметров, а также данных полученных ранее при модельных испытаниях, данным, полученным в ходе предмонтажных испытаний

отдельных узлов и проведении инженерно-физических исследований на полностью собранной установке в процессе ее работы.

Необходимо было получить новые экспериментальные данные для уточнения технических решений, которые будут приниматься при проектировании будущих стационарных сверхпроводящих термоядерных установок, в частности термоядерного источника нейтронов (ТИН) для гибридного реактора «синтез-деление».

К середине 90-х годов прошлого века международным термоядерным сообществом было установлено отсутствие реакторных перспектив у токамаков круглого сечения. России для того, чтобы быть на уровне мировых исследований, была крайне необходима установка с длинным импульсом (демонстрация стационарного горения плазмы с высокими параметрами и перехода на неиндуктивное поддержание тока), мощным дополнительным нагревом плазмы, вытянутым сечением и дивертором.

Техническое перевооружение экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15 направленное, на модернизацию электромагнитной системы и вакуумной камеры с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура (токамак Т-15МД), является одной из задач ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года». Разработка и сооружение токамака Т-15МД, как основа концепции ТИН, позволит обеспечить российскую программу УТС инновационной экспериментальной базой на ближайшие десятилетия. Токамак Т-15МД должен стать новым инструментом для научных исследований, с помощью которого будет возможным решение широкого спектра физических проблем и дальнейшее развитие технологий, необходимых для надежного обоснования параметров энергетического термоядерного и гибридного реакторов.

Целями диссертационной работы являлись:

1. Исследование электромагнитной системы первого в мире токамака Т-15 со сверхпроводящей обмоткой тороидального поля на основе ниобий – оловянного (Nb_3Sn) проводника с циркуляционным охлаждением.

Необходимо было получить ответ на главный вопрос о возможности применения ниобий - оловянного проводника в крупных сверхпроводящих магнитных системах токамаков, что являлось принципиально важным для разработки международного проекта ИТЭР.

2. Разработка концепции термоядерного источника нейтронов на базе токамака с компактной диверторной конфигурацией плазменного шнура.

Для достижения указанной целей автором были решены следующие задачи:

- проведен анализ экспериментальных данных, полученных в ходе предмонтажных испытаний элементов электромагнитной системы и вакуумной камеры, приняты технические

решения, направленные на осуществление физического пуска и обеспечение работоспособности установки в процессе ее эксплуатации;

- проведены расчетно-экспериментальные исследования тепловых нагрузок на криогенную систему на различных температурных уровнях в режимах захолаживания, криостатирования и отогрева электромагнитной системы в процессе эксплуатации;

- проведен анализ работы системы омического прогрева камеры штатными нагревателями, создана система прогрева камеры нагревателями, расположенными на внутренней поверхности камеры, что обеспечило снижение тепловой нагрузки на сверхпроводящую обмотку тороидального поля (СОТП) на гелиевом уровне и уровня электропотребления, существенную экономию жидкого азота при прогреве на «захолаженной» установке;

- проведены экспериментальные исследования кондиционирования стенок камеры в режиме тлеющего разряда при различной температуре камеры и газовой среде с целью определения наилучшей эффективности очистки;

- проведены расчеты диаграммы уставок (величины активного напряжения по амплитуде и длительности существования) для вновь созданной системы защиты СОТП при нарушении сверхпроводимости с целью недопущения перегрева обмотки выше разрешенного уровня и, как следствие, ее разрушения;

- проведены экспериментальные исследования токонесущей способности сверхпроводящей тороидальной обмотки, в том числе при работе с плазмой, и анализ причин, определяющих величину критического тока;

- выполнены расчетно-экспериментальные исследования СОТП при нарушении сверхпроводимости;

- обоснованы и разработаны проекты модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура – проекты токамаков Т-15М, Т-15Д;

- разработан проект и начато сооружение крупнейшего в России токамака с диверторной конфигурацией плазменного шнура (токамак Т-15МД).

Научная новизна работы

1. Впервые в мире введен в эксплуатацию сверхпроводящий токамак с катушками тороидального магнитного поля на основе ниобий - оловянного проводника с циркуляционным охлаждением.

2. Впервые на токамаке Т-15 был выполнен комплекс полномасштабных исследований электромагнитной системы во всех рабочих режимах, включая режимы захолаживания, ввода и вывода тока в нормальных и аварийных условиях.

3. Впервые, в широком диапазоне температур, проведены исследования токонесущей способности сверхпроводящей обмотки тороидального поля на основе ниобий - оловянного проводника с циркуляционным охлаждением; определены причины, определяющие токонесущую способность сверхпроводящей обмотки тороидального поля - СОТП.
4. Впервые на токамаках со сверхпроводящими обмотками на основе ниобий - оловянного проводника проведено детальное исследование перехода СОТП в нормальное состояние. Определены область перехода, количество тепла, поглощенного в галетах и в корпусе блока во время защитного вывода энергии, распределение температуры по виткам галеты, скорость распространения нормальной фазы.
5. Впервые экспериментально подтверждено, что нарушение сверхпроводимости в тороидальной обмотке происходит в области сильного магнитного поля, а также правильность принятого решения о вводе хладагента в катушку со стороны сильного магнитного поля.
6. Впервые экспериментально определены тепловые нагрузки на криогенную систему при различных температурах электромагнитной системы в режимах захолаживания, криостатирования и отогрева.
7. Впервые для прогрева вакуумной камеры, находящейся внутри СОТП, применены омические нагреватели, расположенные на внутренней поверхности камеры. Такой способ размещения нагревателей, позволил уменьшить тепловую нагрузку на внутренний азотный экран в процессе прогрева камеры, примерно вдвое, по сравнению с проектной величиной, что дало существенную экономию потребления жидкого азота при криостатировании азотных экранов, а также снизило тепловую нагрузку на гелиевый уровень и величину электропотребления.
8. В рамках концепции термоядерного источника нейтронов дано физическое обоснование, разработана конструкция и сооружается крупнейший в России токамак Т-15МД с дивертором, с большим радиусом плазменного шнура 1.48 м, аспектным отношением 2.2, тороидальным магнитным полем 2.0 Тл и током плазмы 2.0 МА.

Практическая значимость работы

1. Результаты экспериментальных инженерно - физических исследований, проведенных в период предмонтажных испытаний элементов установки и в период работы установки токамак Т-15, были использованы для доработки проектных решений для отдельных элементов и токамака в целом. Они обеспечили достижение проектных параметров токамака Т-15.
2. Созданы и верифицированы расчётные модели для определения стационарных тепловых нагрузок на криогенную систему, максимальной температуры нагрева сверхпроводящей обмотки при защитном выводе энергии, для определения уровня уставок, по амплитуде и

длительности активного напряжения, которые были применены при создании новой системы защиты СОТП при потере сверхпроводимости.

3. Экспериментальные данные по токонесущей способности СОТП в широком диапазоне температур, экспериментальные и расчетные данные по уровню резистивных тепловыделений, динамике роста активных напряжений при нарушении сверхпроводимости были использованы для обоснования применения ниобий-оловянных сверхпроводников в ИТЭР и будущих термоядерных реакторах.

4. Установлено, что причиной резистивных тепловыделений в СОТП являются многочисленные изломы сверхпроводника, полученные на разных стадиях изготовления блоков по технологии «отжиг-намотка». Предложена технология «намотка-отжиг» для изготовления современных сверхпроводящих обмоток.

5. Созданная система омического прогрева вакуумной камеры на основе нагревателей, размещенных на внутренней поверхности камеры, обеспечила существенное снижение потребления жидкого азота и электроэнергии при прогреве камеры на «захоленной» установке.

6. Полученный опыт сооружения и эксплуатации установки Т-15 имеет большое практическое значение для разработки технологий токамака. Он дал толчок к развитию промышленности для создания низкотемпературных сверхпроводников, технологий изготовления электромагнитных систем экспериментальных плазменных установок, и сверхпроводящих магнитных систем будущих термоядерного и гибридного реакторов.

7. Знания, полученные при проведении инженерно-физических исследований на токамаке Т-15, были востребованы при проектировании токамаков со сверхпроводящими обмотками, таких как ИТЭР, EAST (КНР), ТРХ (США), KSTAR (Южная Корея), SST-1 (Индия), ТИН (Россия).

8. На основе разработанной проектной документации в настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» сооружается крупнейший в России токамак с дивертором – Т-15МД.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждена:

- путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных автором, с аналитическими решениями и данными аналогичных исследований на токамаках TORE-Supra, ITER, EAST, KSTAR, SST-1;

- документами о вводе в эксплуатацию и многолетней надежной работе токамака Т-15 с достижением проектных параметров технологических систем, многократной экспериментальной проверкой полученных экспериментальных данных, сопоставлением их с результатами других аналогичных установок;

- одновременным снижением расхода жидкого азота, тепловой нагрузки и электропотребления, при вводе в эксплуатацию модернизированной системы омического прогрева вакуумной камеры;
- документами о проектировании и сооружении крупнейшего в России нового токамака Т-15МД с диверторной конфигурацией плазменного шнура, с большим радиусом плазменного шнура 1.48 м, аспектным отношением 2.2, тороидальным магнитным полем 2.0 Тл и током плазмы 2.0 МА;
- результатами работ, опубликованных в ведущих научных журналах и в трудах отечественных и международных конференций.

Личный вклад автора

Диссертационная работа содержит расчетные, экспериментальные и прикладные результаты исследований, выполненные автором в Институте ядерного синтеза и Институте физики токамаков, РНЦ (впоследствии НИЦ) «Курчатовский институт» в течение 1987 - 2015 годов. Лично автором и при его непосредственном участии:

- осуществлялась обработка и анализ полученных экспериментальных данных, полученных в период проведения предмонтажных испытаний отдельных элементов ЭМС Т-15;
- осуществлялось научно-техническое руководство проведением всех технологических режимов и инженерно-физических исследований во время экспериментальных кампаний;
- созданы расчётные модели и проведены расчеты стационарных тепловых нагрузок на криогенную систему, определены диаграмма уставок по амплитуде и длительности активного напряжения для системы защиты СОТП при нарушении сверхпроводимости, максимальная температура нагрева сверхпроводящей обмотки при защитном выводе энергии из СОТП, скорости распространения нормальной фазы и энергия, выделившаяся в обмотке при защитном выводе тока;
- созданы расчётные модели и проведены расчеты температуры нагрева криорезистивных (охлаждаемых жидким азотом) обмоток управления и внутрикамерных элементов токамака Т-15 с целью определения максимально возможной длительности разряда, а также для определения сценариев тока в обмотках тороидального поля и обмотках управления, охлаждаемых водой, при выборе базовых параметров токамаков Т-15М, Т-15Д и Т-15МД;
- проведен анализ эффективности прогрева вакуумной камеры штатными нагревателями, размещенными на наружной поверхности камеры и создана система прогрева вакуумной камеры токамака Т-15 на основе омических нагревателей, размещенных на внутренней поверхности камеры;

- проведены обработка и анализ экспериментальных данных полученных в технологических режимах: вакуумной откачки криостата и вакуумной камеры, омическом прогреве камеры на «теплой» и «захожденной» установке, при захолаживании, криостатировании и отогреве ЭМС, режимах кондиционирования камеры;

- проведены расчетные и экспериментальные исследования СОТП: температуры нагрева обмотки при нарушении сверхпроводимости и защитном выводе энергии, скорости распространения нормальной фазы, токонесущей способности, влияния плазменных режимов на работоспособность СОТП;

- осуществлялось научно-техническое руководство разработками проектов по модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15 с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура: проекты токамаков с теплыми обмотками Т-15М, Т-15Д и Т-15МД;

- проведены расчеты базовых параметров электромагнитных систем при разработке проектов токамаков Т-15М, Т-15Д и Т-15МД.

С момента реализации и по настоящее время автор является руководителем проекта по техническому перевооружению экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15, реализуемого в рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 гг. и на перспективу до 2020г.», входил в комиссию ГК «Росатом», возглавляемую профессором С.В.Мирновым, по выбору оптимальных путей развития работ по токамакам, входил в рабочую группу, возглавляемую директором ИФТ профессором Э.А.Азизовым, по разработке «Предложений по освоению технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС) в Российской Федерации на 2010-2020 годы», принимал активное участие в модернизации токамака Т-7 (установка НТ-7, КНР), в разработке системы защиты сверхпроводящих обмоток токамака EAST (КНР) [39], являлся руководителем работ по созданию стенда для изучения кондиционирования стенок камеры с помощью ионно-циклотронного нагрева (стенд Thomas, Институт физики плазмы, Юлих, Германия).

Методология и методы исследования

Методология проведенных исследований базировалась на теоретических, численных и эмпирических подходах. При проведении работы использовались общенаучные и специальные методы, традиционные для области создания электрофизических и ядерных энергетических установок.

Основные положения, выносимые на защиту:

Результаты испытаний и опытной эксплуатации с 1987 по 1995 годы установки токамак Т-15, научное обоснование принятых технических решений, обеспечивших их работоспособность при тороидальном магнитном поле 3.5 Тл и токе плазмы 1 МА.

Экспериментальные и теоретические исследования процессов охлаждения, криостатирования и отогрева электромагнитной системы установки Т-15, определение величин теплопритоков к элементам ЭМС на температурных уровнях от 200К до 5К.

Методики расчетов и результаты экспериментальных исследований режимов кондиционирования вакуумной камеры, формулировка технических и технологических условий достижения проектных характеристик вакуумного технологического комплекса токамака Т-15.

Проект и реализованная система прогрева вакуумной камеры, расположенной внутри СОТП, нагревателями, размещенными на внутренней поверхности камеры.

Система защиты СОТП от перегрева выше разрешенного уровня при нарушении сверхпроводимости.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований СОТП, рекомендации по использованию результатов в будущих разработках, включая международный проект ИТЭР.

Физическое обоснование параметров и проекты модернизации токамака Т-15 с целью создания современной экспериментальной установки с диверторной конфигурацией плазменного шнура, способной дать информацию в поддержку проекта ИТЭР.

Проект компактного токамака с дивертором Т-15МД как основа концепции термоядерного источника нейтронов для гибридных систем.

Связь с государственными планами НИОКР

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ, проводимых в Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский институт», в соответствии с Координационным планом по Государственной научно-технической программе «УТС и плазменные процессы», а также в соответствии с Федеральной целевой программой «Ядерные энерготехнологии нового поколения на 2010-2015 годы и на перспективу до 2020 года» (Постановление Правительства РФ № 50 от 03.02.2010 г.).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной и международной конференциях по инженерным проблемам термоядерных реакторов ИПТР –5, 7 (Ленинград, Санкт-Петербург 1990, 2002гг.); 15-м, 16-м, 18-м, 19-м, 20-м, 22-м, 27-м, 28-м Симпозиумах по технологии ядерного синтеза (Утрехт Голландия, 1988г., Лондон, Англия, 1990г., Карлсруэ, Германия, 1994 г., Лиссабон, Португалия, 1996 г., Марсель, Франция, 1998 г., Хельсинки, Финляндия, 2002 г., Льеж, Бельгия, 2012 г, Сан-Себастьян, Испания, 2014 г.); международных конференциях по магнитной технологии МТ (МТ-11, 1989г., Цукуба, Япония; МТ-14, 1995г., Тампере, Финляндия; МТ-22, 2011г., Марсель, Франция); Американском симпозиуме по термоядерной инженерии (15 IEEE/NPSS, Хяниис, 1995г.); 11-м Тематическом совещании по технологиям термоядерной энергетики (Новый Орлеан, США, 1994 г.); 11-й Международной

конференции по открытым магнитным системам для удержания плазмы (Новосибирск, Россия, 2010 г.); 23-й и 25-й конференциях МАГАТЭ по термоядерной энергии (Даджон, Южная Корея, 2010г., Санкт-Петербург, Россия, 2014 г.); Международных (Звенигородских) конференциях по физике плазмы и УТС (2007г., 2008г., 2015г.); XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (г. Звенигород, 2011 г.); Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу и совещанию по нано- и микро-размерным структурам в плазме (Алушта, Украина, 2012г.) и были представлены в ведущих отечественных и зарубежных журналах: Вопросы атомной науки и техники, сер. «Термоядерный синтез», Plasma Devices and Operations, Fusion Technology, Fusion Science and Technology, Fusion Engineering and Design, IEEE Transactions on Magnetics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity.

По теме диссертации опубликовано 49 научных работ в российских и зарубежных журналах, в трудах международных и российских конференций, в тезисах докладов и препринтах. Из них 17 работ опубликовано в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых журналах.

Диссертационная работа изложена на 284 страницах текста, включая 120 рисунков, 40 таблиц, состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, и списка литературы из 123 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность, определены цели и задачи исследования, изложена краткая история исследований по теме диссертации, приведена краткая аннотация диссертационной работы по главам, сформулированы научная новизна работы и ее практическая значимость, личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано описание конструкции электромагнитной системы (ЭМС) и вакуумной камеры установки токамак Т-15 и приведены результаты предмонтажных испытаний отдельных элементов установки [1-8,25]. В разделе 1.1. приводятся научно-технические цели токамака Т-15, которые были сформулированы следующим образом: получение достаточно точной информации по физике высокотемпературной плазмы с термоядерными параметрами необходимой для проектирования термоядерного реактора ИТЭР; оптимизация методов нагрева; управление равновесием и устойчивостью плазмы при наличии мощного неиндукционного нагрева; управление профилями распределения плотности плазмы, температуры и плотности тока с помощью средств нагрева и подпитки плазмы; получение бездиверторных средств контроля примесей; оптимизация фаз старта и гашения разряда; накопление опыта по работе подсистем (сверхпроводящей магнитной, дополнительного нагрева, вакуумной, криогенной и т.д.) крупной термоядерной установки в их взаимодействии.

В Таблице 1 приведены основные параметры установки. Общий вид установки токамак Т-15 показан на рисунке 1.

Таблица 1 - Основные параметры установки Т-15

Параметр	Величина
Большой радиус плазмы, м	2.43
Малый радиус плазмы, м	0.7
Тороидальное магнитное поле на оси плазменного шнура, Тл	3.5
Запасенная энергия в СОТП, МДж	~ 400
Ток в плазме, МА	1.4
Запас устойчивости на границе шнура $q(a)$	2.5
Длительность импульса тока, с	5
Частота повторения импульсов, имп./час	10
Полное изменение потокосцепления индуктора, Вб	15
Мощность СВЧ-нагрева, МВт	6
Мощность инжекции нейтралов, МВт	8

В разделе 1.2. приведено описание конструкции элементов ЭМС. ЭМС включает в себя замкнутый ферромагнитный двенадцати яремный магнитопровод, сверхпроводящую обмотку тороидального поля (СОТП), обмотку индуктора (ОИ), 3 обмотки управления (ОУ), обмотку горизонтального управляющего поля (ОГУП), обмотку вертикального управляющего поля (ОВУП), обмотку индукционного нагрева камеры (ОИН). ЭМС вместе с расположенной

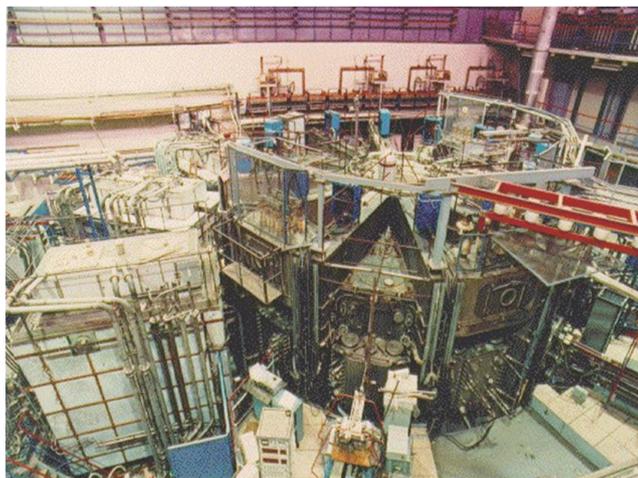


Рисунок 1 - Общий вид установки токамак Т-15

внутри СОТП разрядной камерой расположены внутри общего вакуумноплотного кожуха (криостата). Для уменьшения тепловых потоков внутреннее пространство криостата откачивается до уровня $10^{-5} \div 10^{-6}$ Тор и между элементами, имеющими температуры $T = 4.5\text{K}$ и $T = 300\text{K}$ установлены тепловые экраны, охлаждаемые жидким азотом.

Элементы ЭМС, размещенные внутри криостата, поддерживаются в рабочем состоянии на различных температурных уровнях: при температуре $T = 4.5\text{ K}$ - СОТП с примыкающими к ней силовыми конструкциями; при температуре $T = 80\text{ K}$ - ОИ, ОУ, ОВУП, ОГУП и азотные экраны; при температуре $T = 300\text{ K}$ - магнитопровод, ОИН, разрядная камера и криостат.

Габаритные размеры установки: наружный диаметр 10.9 м, высота 6 м, общий вес 1500 тонн.

В разделе 1.3. приведены результаты предмонтажных испытаний отдельных элементов ЭМС и вакуумной камеры токамака Т-15, проведенные в 1986 -1988 годах. Эти испытания проводились в соответствии со специальными программами, совместно разработанными сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» и НИИЭФА им. Д.В.Ефремова.

Были испытаны следующие узлы установки Т-15: 26 рабочих блоков СОТП; опорная колонна в сборке с цилиндром; подставка под опорную колонну; обмотка индуктора (ОИ); 14 модулей вакуумной камеры (МВК); 12 секций внутреннего азотного экрана (ВАЭ); 30 катушек обмотки вертикального управляющего магнитного поля (ОВУП); секции наружного азотного экрана (НАЭ); обмотки управления ОУ1, ОУ2, ОУ3; 12 стенок и 24 сектора (верхние и нижние) криостата.

Испытания рабочих блоков СОТП проводились на стенде СИМС. Были испытаны 26 блоков (24 основных и два запасных). Ни в одном из них не было обнаружено отклонений по гидравлическому сопротивлению, электрической прочности и вакуумной плотности. Испытательный ток ограничивался величиной 6.9 кА. При таком значении тока по параметру (I x B) достигались условия, превосходящие условия номинального режима работы установки ($I_{\text{ном}} = 3.9$ кА; $B_{\text{Тном}} = 6.3$ Тл; $I \times B_{\text{T}} = 25$ кА x Тл) в 1.3 раза. Практически во всех блоках, начиная с уровня тока $4 \div 4.5$ кА, было отмечено появление слабой резистивности, возрастающей нелинейно с ростом тока. Связанное с этим тепловыделение при токе 6.9 кА достигало в различных блоках величин от 20 Вт до 120 Вт на блок. Такое поведение блоков, изготовленных по методике «отжиг – намотка» было связано с дефектами проводника, возникшими в процессе его изготовления и намотки.

Испытания обмотки индуктора (ОИ) предусматривали трехкратное термоциклирование (охлаждение до $T \sim 100$ К с последующим отогревом до $T \sim 300$ К) газообразным гелием. Испытания проводились с расходами гелия 200 кг/ч и $50 \div 60$ кг/ч, как в процессе захолаживания в штатном режиме на установке Т-15. Время захолаживания до установившихся температур составляло: с расходом гелия 200 кг/ч ~ 30 ч, с расходом гелия - 60 кг/ч ~ 60 ч.

Электрические испытания ОИ проводились как в «теплом», так и в захолаженном состоянии. Электрическая прочность корпусной изоляции ОИ испытывалась постоянным напряжением ± 19 кВ в диапазоне давлений в барокамере $10^{-3} \div 10^{-5}$ Торр. Высокое напряжение подавалось на один из выводных концов ОИ относительно каркаса, который был соединен с корпусом барокамеры, находившейся под потенциалом земли. В ходе электрических испытаний изоляции в условиях вакуума было выявлено, что изоляция выводных шин, выполненная вручную стеклолентой с эпоксидным компаундом, не являлась монолитной и имела место сильная зависимость пробивного напряжения от вакуума в криостате, сорта остаточного газа (атмосферного воздуха или гелия) и от полярности напряжения.

Зависимость пробивного напряжения U от величины давления P показала следующее:

- при одном и том же давлении P величина пробивного напряжения $+ U_{пр}$ существенно ниже (в несколько раз), чем $- U_{пр}$. Другими словами, пробивное напряжение в случае, когда катодом служили каркас индуктора и барокамера, существенно ниже, чем в противоположном случае;
- при давлении в барокамере $P \geq 2 \cdot 10^{-4}$ Торр (воздух) величина пробивного напряжения существующей корпусной изоляции выводных шин обмотки индуктора не превышала $U_{\max} \approx 8$ кВ. Влияние полярности на величину $U_{пр}$ объяснялось автоэлектронной эмиссией с отдельных металлических микровыступов. На поверхности каркаса, индуктора и барокамеры имелись острия, неровности, выступы и т.п., в окрестности которых напряженность электрического поля могла быть существенно больше своего среднего значения.

Результаты электрических испытаний корпусной изоляции ОИ позволили сформулировать следующие конкретные требования к условиям испытания и эксплуатации обмоток ОИ и обмоток ОУ1, ОУ2, ОУ3: рабочее напряжение, подаваемое на ОИ, ОУ1 - ОУ3 и на ОВУП, не должно превышать $U_{\text{раб.макс.}} \leq 4\text{кВ}$; запрет на подачу испытательного и рабочего напряжений на обмотки, если величина давления в криостате превосходила максимальное допустимое значение $P_{\max} = 5 \cdot 10^{-4}$ Торр.

Необходимость создания надежной изоляции в конструкциях сверхпроводящих магнитных систем с принудительным охлаждением доказали испытания и эксплуатация последующего поколения токамаков, в которых электрические пробои имели место: НТ-7 (КНР), EAST (КНР), KSTAR (Корея), SST-1 (Индия). Одним из возможных путей снижения вероятности пробоя при ухудшении вакуума является приближение нулевого потенциала (потенциала земли) к изолированным токоведущим частям, т.е. уменьшение расстояния и, как следствие, повышение величины пробивного напряжения согласно левой ветви кривой Пашена. Такой подход был реализован сначала на установке Т-15 путем обмотки фольгой поверхности изолированных шинопроводов СОП, а затем на токамаке EAST.

Испытания секций наружного азотного экрана (НАЭ) предусматривали вакуумные испытания трубок охлаждения секций НАЭ, а также исследование распределения температур по их поверхности в заоложенном состоянии.

При испытаниях на герметичность трубок охлаждения секций НАЭ было обнаружено большое количество (несколько десятков) течей. Эти течи оказались локализованными в местах пайки трубок к охлаждаемой поверхности преимущественно в районе скоб крепления. Проведенный металловедческий анализ показал, что в большинстве случаев это трещины, распространяющиеся с поверхности трубок вглубь и имеющие по своему виду межкристаллитный характер и пористую структуру. Для обеспечения надежной работы установки было принято решение об изменении технологии крепления всех трубок охлаждения

на секциях НАЭ и использовании вместо пайки сварного соединения. После замены трубок и изменения технологии крепления их к секциям НАЭ (сварное соединение) появления течей не наблюдалось как в «теплом» состоянии, так и после термоциклирования.

Для выяснения эффективности экранирования секциями НАЭ гелиевых поверхностей в установке Т-15, было изучено распределение температуры по поверхности секций, установившееся после окончания процесса захлаживания. Была наблюдаена большая неоднородность распределения температур по поверхности секций НАЭ. Такое распределение температур по поверхности секций НАЭ увеличивало бы тепловую нагрузку на СОТП примерно в 2 раза по сравнению с проектной. Для уменьшения теплопритока к блокам СОТП было принято решение о прокладке со стороны наружного азотного экрана многослойной экранно-вакуумной изоляции, обладающей низкой теплопроводностью. Для уменьшения вероятности возгорания в процессе монтажа установки изоляция дополнительно закрывалась нержавеющей фольгой. Предпринятые меры позволили сгладить неоднородность распределения температуры по излучающей поверхности фольги и уменьшить тепловой поток на СОТП со стороны НАЭ.

Испытания 14 модулей вакуумной камеры (МВК) были проведены на специальном стенде термоциклирования. Термоциклирование осуществлялось с помощью штатных нагревателей, расположенных на поверхности МВК. На каждом МВК имелось восемь нагревателей, изготовленных из нихромовой проволоки диаметром 3 мм. Программой испытаний предусматривалось трехкратное термоциклирование в вакууме: нагрев стенок МВК до температуры $T = 400^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением до $T = 80^{\circ}\text{C}$. Расчетная мощность, которая требовалась для нагрева одного МВК до $T = 400^{\circ}\text{C}$, составляла ~ 40 кВт (при токе в нагревателе 55 А). В процессе испытаний выяснилось, что при максимальной мощности нагрева ($I_{\text{нагр}} = 55$ А) резко падало сопротивление (от десятков МОм до нескольких кОм) керамических втулок, отделяющих нагреватель от поверхности МВК. Химический анализ показал наличие никеля и хрома на поверхности изоляторов (результат испарения нихрома при высокой температуре $T = 800^{\circ}\text{C}$). Было принято решение об уменьшении мощности нагрева ($I_{\text{нагр}} = 45$ А), в результате чего максимальная температура на поверхности МВК достигала уровня 345°C .

В результате термоциклирования 14 модулей вакуумной камеры не было выявлено вакуумных негерметичностей в сильфонах и стенках модулей.

В параграфе 1.4. изложены выводы к Главе 1. Главным результатом предмонтажных испытаний элементов ЭМС и вакуумной камеры и принятых технических решений, направленных на обеспечение работоспособности установки в процессе ее эксплуатации явилось успешное осуществление физического пуска установки Т-15.

Глава 2 посвящена исследованиям процессов охлаждения, криостатирования и отогрева

электромагнитной системы [1,8,9]. Целями исследований являлось определение темпов захлаживания и отогрева ЭМС не приводящих к возникновению термомеханических напряжений в конструкциях выше разрешенного уровня, влияния криосорбции различных элементов воздуха на динамику величины остаточного давления в криостате в процессах захлаживания, криостатирования и отогрева, определение тепловых нагрузок на элементы ЭМС на различных температурных уровнях.

В разделе 2.1. приводится описание системы криогенного обеспечения. В разделе 2.2. описывается процесс захлаживания ЭМС и приводятся расчетные и экспериментальные данные по величинам тепловых нагрузок на элементы ЭМС на различных температурных уровнях и при различных величинах давления в криостате.

Захлаживание всех элементов ЭМС (рисунок 2) в интервале от 300К до 100К осуществлялось газообразным гелием.

Для того, чтобы избежать возникновения термомеханических напряжений в элементах ЭМС, превышающих допустимые, темп захлаживания в этом интервале температур не превышал 5 К/ч, а максимальная разность температур между любыми точками

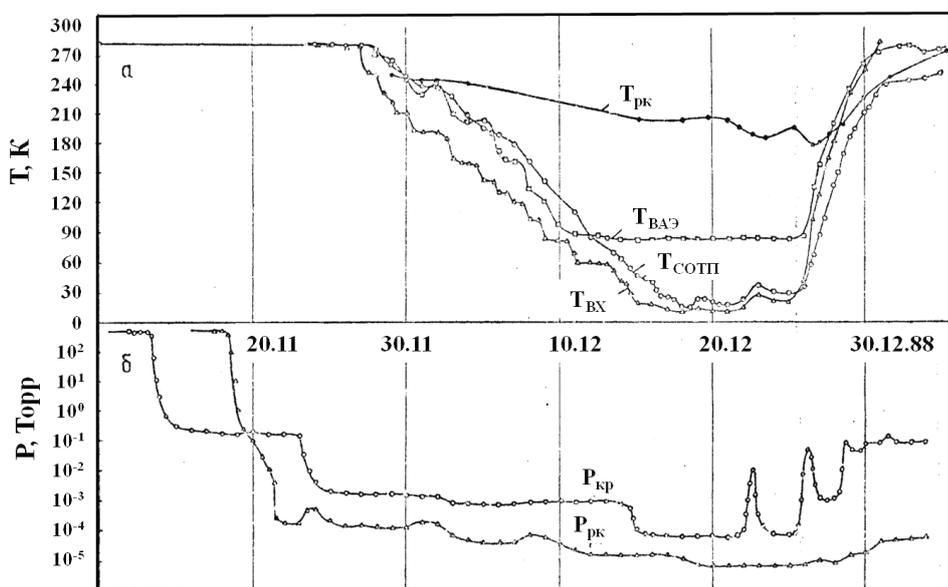


Рисунок 2 – Временные зависимости: а) входной температуры гелия в ЭМС, температуры разрядной камеры, внутреннего азотного экрана и СОТП; б) давления в разрядной камере $P_{рк}$ и криостате $P_{кр}$

охлаждаемых объектов не превышала 50К. Темп захлаживания СОТП составлял в среднем 0.5 К/ч ÷ 0.7 К/ч и мало менялся в процессе охлаждения. Наибольшая разность между температурой входа хладагента и температурой поверхности составила для СОТП около 60К, для внутреннего экрана 70К ÷ 80К, для наружного экрана, в отдельных точках, 120К ÷ 150К. Во время захлаживания наблюдалась довольно высокая равномерность распределения температуры на поверхностях корпусов СОТП. Наибольшая разница температур составляла 20К ÷ 25К на различных температурных уровнях. При захлаживании двумя компрессорами темп охлаждения СОТП составлял до 1.5 ÷ 2.0 К/ч при общем расходе 1500 кг/ч.

В ходе охлаждения ЭМС наблюдалось улучшение вакуума в криостате, что было связано

в первую очередь со снижением газоотделения и конденсацией паров воды. На рисунке 3 показана зависимость парциального давления в криостате гелия, воды, азота и кислорода при изменении входной температуры гелия в СОТП.

Из уравнения баланса потоков тепла, поступающего со стенок криостата и СОТП на НАЭ и отводимого потоком гелия, был определен приведенный коэффициент черноты $\langle \varepsilon \rangle$ системы. Полученное интегральное значение составило $\langle \varepsilon \rangle \approx 0.24$. При достижении температуры на выходе из азотных объектов ~ 100 К осуществлялся переход на криостатирование их жидким азотом. Суммарный расход жидкого азота при криостатировании составлял $25 \div 28$ тонн/ч, при этом средняя температура внутреннего азотного экрана была на уровне $90\text{К} \div 95\text{К}$, наружного азотного экрана $110\text{К} \div 120\text{К}$.

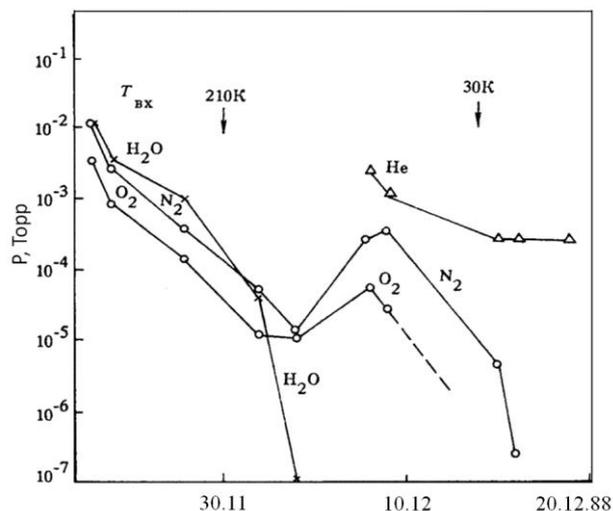


Рисунок 3 - Зависимость парциального давления в криостате гелия, воды, азота и кислорода при изменении входной температуры гелия в СОТП

Холодопроизводительность установки обратной конденсации паров азота, компенсирующей тепловую нагрузку в Т-15 на уровне 80 К, составляла ~ 130 кВт. Стационарная тепловая нагрузка на уровне 80К , вычисленная по измеренной величине доли пара в обратном потоке азота, составляла ~ 60 кВт и распределялась следующим образом: 25 кВт - ЭМС Т-15 (при температуре вакуумной камеры ~ 300 К), 35 кВт - циркуляционный контур.

Время достижения температуры 100К составило примерно 300 час и определялось скоростью охлаждения обмотки тороидального поля. Дальнейшее охлаждение сверхпроводящей обмотки проводилось с помощью двух гелиевых ожижителей ОГ-800, работающих параллельно в рефрижераторном режиме. При температуре ниже 20К один из ОГ-800 переводился в ожижительный режим с выдачей гелия в ванны блока токовыводов, а второй ОГ-800 работал в рефрижераторном режиме с избыточным обратным потоком. Стационарное состояние криорезистивных обмоток и радиационных экранов поддерживалось с помощью циркуляции жидкого азота.

Состояние сверхпроводимости СОТП было зафиксировано при входной температуре гелия $\sim 12\text{К}$ и выходной $\sim 14\text{К}$.

На темп захолаживания от 80К до 5К существенное значение оказывал теплоприток к гелиевым объектам. Теплоприток зависел, в основном, от вакуума в криостате Т-15. При уровне температуры СОТП $\sim 30\text{К}$ происходило улучшение, примерно на порядок, вакуума

в криостате за счет сорбции молекул азота на криогенных поверхностях (рисунок 5). При давлении в криостате $P \sim 5 \cdot 10^{-5}$ Торр стационарная тепловая нагрузка на СОТП составляла ~ 1 кВт. Время выхода на режим криостатирования со 100К до 5К занимало $120 \div 130$ часов. Общее время выхода на температурный уровень 5К $\sim 420 \div 430$ часов.

В разделе 2.3. приводится анализ режима отогрева ЭМС. Скорость отогрева на начальном этапе составляла ~ 5 К/ч с последующим ее снижением до $1 \div 2$ К/ч по мере ослабления влияния теплопритока и повышения удельной теплоемкости объектов. Значение массового расхода гелия составляло $700 \div 1500$ кг/ч. Максимальный разброс температур на поверхности ЭМС достигал 60К, а механические напряжения в корпусах блоков не превышали 50 МПа.

В момент прохождения температур 30К - 35К давление в криостате не превышало $1 \cdot 10^{-4}$ Торр, а при достижении $230К \div 250К$ - $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Обмерзание наружных стенок криостата не наблюдалось и темп отогрева ЭМС не превышал допустимый.

В разделе 2.4. приведены экспериментальные и расчетные данные тепловых нагрузок на СОТП во время физического пуска установки.

Измерения теплопритоков к элементам ЭМС, охлаждаемых гелием, проводились в нестационарных режимах во время процесса захолаживания двумя независимыми способами. Первый из них - вычисление теплопритока по скорости пассивного отогрева элементов СОТП при прекращении циркуляции гелия. В зависимости от температурного уровня СОТП и азотных экранов были получены значения теплопритока к ЭМС $1.1 \div 1.5$ кВт.

Согласно второму способу, теплоприток определялся из баланса потоков тепла при известной скорости охлаждения $dT/dt = \text{const}$. При этом рассчитывались составляющие стационарного теплопритока, связанные с теплопроводностью по опорам, излучением и теплопроводностью по остаточному газу. Экспериментальные оценки тепловой нагрузки на СКО со стороны ЭМС Т-15, выполненные различными способами, достаточно хорошо совпадали друг с другом и составляли $1.0 \div 1.5$ кВт. Расчетные значения лежали в диапазоне $0.6 \div 1.4$ кВт при изменении давления в криостате от $1 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ Торр. Таким образом, наблюдалось хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями стационарной составляющей теплопритока. В разделе 2.5. приводятся выводы к Главе 2.

Глава 3 посвящена исследованиям режимов кондиционирования вакуумной камеры [3, 10-13]. В разделе 3.1. описаны современные методы кондиционирования, которые включали прогрев камеры, тлеющий и СВЧ- разряды, плазменный разряд с переменным током (Тейлоровский разряд). В разделе 3.2. приводится анализ результатов омического и индукционного прогрева камеры. Омический прогрев силовых секций камеры до 1993 г. осуществлялся нагревателями, расположенными на внешней поверхности камеры со стороны

Система омического прогрева нагревателями, уложенными на внутреннюю поверхность камеры, позволила при меньшей мощности прогрева - 75 кВт, достичь той же температуры силовых секций 170°C, что и при прогреве камеры в проектом варианте, с уровнем вкладываемой в нагреватели мощности 130 кВт. Это позволило экономить до 18 тонн жидкого азота в сутки, уменьшить тепловую нагрузку на СОТП и электропотребление, при прогреве камеры в режиме криостатирования азотных экранов.

Раздел 3.4 посвящен результатам исследования кондиционирования камеры в тлеющих разрядах. Тлеющий разряд зажигался с помощью 4-х подвижных штырей. Спектр масс во время тлеющего разряда снимался с помощью 2-х монополярных спектрометров MX-7304. Для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью камеры была применена станция WASA-2. Данная станция была оснащена различного типа зондами (коллекторные, электрические, болометрические), которые монтировались на транспортной тележке, движущейся между местом экспозиции в камере Т-15 и местом анализа. Расположенные в камере анализа спектрометры для ВИМС и Оже - спектрометрии позволяли проводить измерения элементного состава на поверхности коллекторного зонда. Результаты исследования сводились к следующему. Проведение тлеющего разряда позволило частично удалить карбидную и оксидную пленку с поверхности камеры и получить следующий элементный состав поверхности: С – 50%, Fe – 40%, О-10% по сравнению с первоначальным составом: С > 90%, Fe + О < 10%. В разрядной камере достигнуто давление $P \sim 1 \cdot 10^{-7}$ Торр при парциальном давлении паров воды и углеводородов менее 10^{-8} Торр. На основе масс - спектрометрических и Оже - измерений был сделан вывод, что процесс очистки камеры наиболее эффективен в тлеющем H_2 - разряде при температурах поверхности камеры $T > 100^\circ C$. В разделе 3.5. приводятся выводы по результатам исследования режимов кондиционирования вакуумной камеры.

Глава 4 посвящена исследованиям режимов работы сверхпроводящей обмотки тороидального поля (СОТП) в составе токамака [1-3, 8, 14-28]. В разделе 4.1. даны общая характеристика и задачи исследования СОТП. СОТП Т-15 является крупнейшей в мире сверхпроводящей магнитной системой (СМС) на основе ниобий – олова с циркуляционным охлаждением. Необходимо было получить ответ о возможности применения ниобий - оловянного проводника в сверхпроводящих магнитных системах токамаков, что являлось принципиально важным для разработки международного проекта ИТЭР. Исследования СОТП должны были дать ответ о ее токонесущей способности на различных температурных уровнях, возможности нормальной работы в экспериментах с плазмой, условиях ее безаварийной работы при нарушении сверхпроводимости.

В разделе 4.2. дано описание системы питания СОТП, электрических схем в проектом и модернизированном вариантах. Электропитание СОТП осуществлялось с помощью

тиристорного преобразователя с напряжением 75 В и возможностью длительного поддержания постоянного тока величиной 10 кА. Максимальная скорость ввода тока определялась индуктивностью СОТП ($L=52$ Гн) и равнялась 1.5 А/с. Медленный вывод тока из СОТП по окончании работы осуществлялся с постоянной вывода 500 секунд путем ввода в электрическую цепь разрядного сопротивления 0.1 Ом. В случае возникновения нормальной фазы, по сигналу с системы защиты, вывод тока осуществлялся с постоянной времени 104 с, максимальное напряжение на каждой из четырех секций СОТП составляло ± 250 В относительно земли.

В разделе 4.3. описывается система защиты СОТП при нарушении сверхпроводимости. Приводится описание штатной системы защиты, а после ее аварии – вновь созданной системы защиты. Возникновение и распространение нормальной фазы приводило к появлению и росту активного напряжения на части обмотки, перешедшей в нормальное состояние. Регистрация этого напряжения осуществлялось в системе защиты СОТП. Предельные уровни амплитуды и длительности этого напряжения, после превышения которых, осуществляется вывод тока, называются уставками системы защиты. Для определения уровня уставок по амплитуде и длительности, которые обеспечивали защитный вывод тока без нагрева обмотки сверх допустимого уровня, были проведены соответствующие расчеты. Температура определялась путем решения уравнений теплового баланса для нагрева проводника совместно с изоляцией и для нагрева гелия. На основании расчетных данных температуры нагрева проводника была построена диаграмма уставок по амплитуде активного напряжения и длительности его существования для токов в СОТП не превышающих 4кА, при которых термомеханические напряжения в обмотке не превосходили разрешенные. На рисунке 5 проиллюстрирована работа системы защиты при защитном выводе тока из СОТП с уровня 4.06 кА.

В разделе 4.4. приведены результаты исследования токонесущей способности СОТП в зависимости от входной температуры гелия. Токонесущая способность СОТП исследовалась в интервале температур от $4.7\text{K} \div 12\text{K}$. Результаты экспериментов приведены на рисунке 6, на котором указаны не только значения произведения $I_{\text{СОТП}} \times V_{\text{макс}}$ при различных значениях входной температуры гелия, но и номер блока обмотки (по нумерации СОТП в

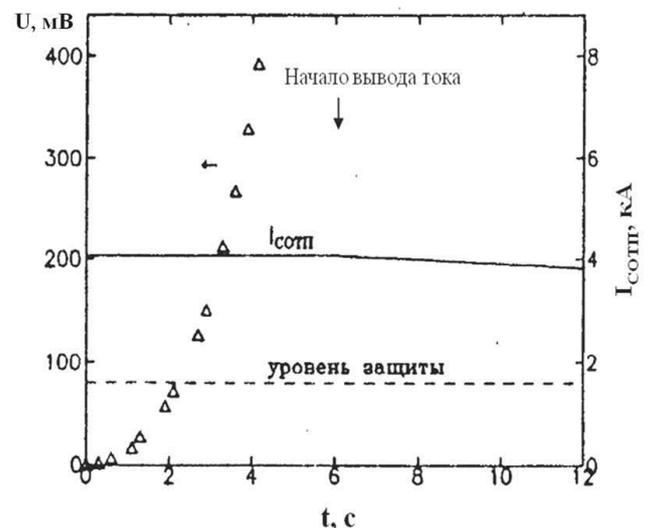


Рисунок 5 - Иллюстрация работы системы защиты СОТП при возникновении нормальной фазы. Δ - нарастание активного напряжения, уровень уставки в системе защиты -80 мВ, длительность -4 с.

сборе), инициировавшего переход обмотки в нормальное состояние.

Во всех случаях защитный вывод энергии из СОТП был связан с преимущественным развитием нормальной фазы в одном из 3-х блоков: №2, №22 и №23. Эти блоки, по результатам предмонтажных испытаний отдельных блоков имели повышенную, по сравнению со средней, резистивность. Ток величиной 4 кА, при входной температуре гелия 4.7 К и массовом расходе 730 кг/ч, был введен в СОТП и находился в ней в течение 8 часов, а затем был выведен без перехода обмотки в нормальное состояние. В разделе 4.5. приводятся результаты измерения резистивных тепловыделений. Источниками резистивных тепловыделений являлись дефекты сверхпроводящей скрутки, которые могли возникнуть в процессе изготовления проводника и намотки катушек. Резистивное тепловыделение в СОТП определялось интегральным методом, по разнице теплосодержания выходного и входного гелия. Общее тепловыделение за счет резистивности при токе в СОТП 3.6 кА составляло около 300 Вт. Суммарные резистивные тепловыделения в тороидальной конфигурации не превышали суммарных тепловыделений отдельных блоков.

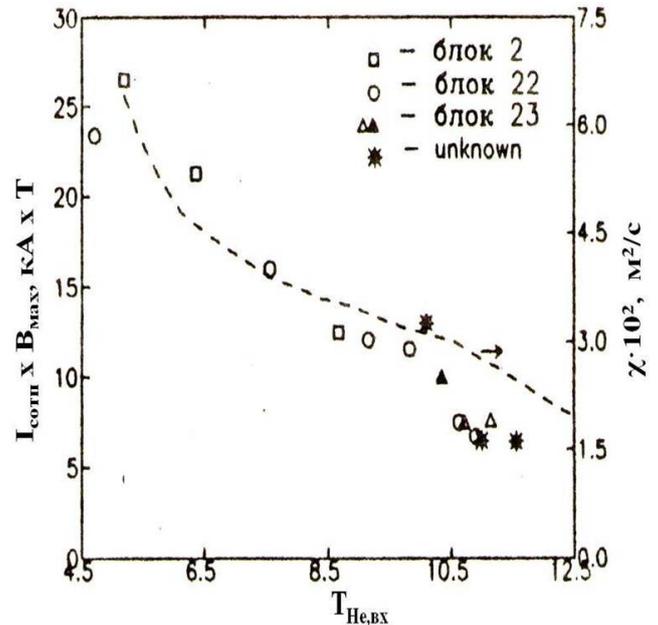


Рисунок 6 - Температурные зависимости токнесущей способности СОТП ($I_c \times V_{max}$) и температуропроводности стабилизирующей меди (χ)

В разделе 4.6. приводятся экспериментальные и расчетные результаты исследований нагрева СОТП при защитном выводе энергии. Для детального анализа нагрева катушек при появлении нормальной фазы и последующем выводе энергии на выводных трубках гелия из галет блока № 22 были установлены температурные датчики. Переход в нормальное состояние блока №22 при входной температуре гелия $T_{вх} \sim 8.8$ К произошел при токе 2800 А. Вывод тока начался примерно 3 секунды спустя после появления нормальной фазы при постоянной выводе $\tau = 104$ с. Разница в поведении во времени выходной температуры гелия из галет и температуры корпуса блока подтверждала факт, что переход в нормальное состояние происходил на внутренних витках галеты со стороны сильного магнитного поля. Количество тепла, выделившееся в двойных галетах, рассчитанное по разнице энтальпий (Δh) входящего и выходящего гелия, составило $Q = 330 \div 410$ кДж (расход гелия через две галеты составлял $\dot{m} = 2.8 \div 3.5 \cdot 10^{-4}$ кг/с). Оценка энергии поглощенной в корпусе блока за счет его теплоемкости дала величину $\sim 10 \div 20$ кДж.

Моделирование перехода блока №22 при токе 2.8 кА было сделано в предположении, что переход в нормальное состояние произошел на внутренних витках галеты со стороны сильного магнитного поля. В расчетах учитывалась экспериментально определенная зависимость тока перехода от входной температуры гелия. Скорость распространения нормальной фазы вдоль медного проводника, в обе стороны от места своего зарождения, рассчитывалась из решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho^v c S \frac{\partial T}{\partial t} - 2\alpha P (T - T_0) + j^2 \rho S = 0 \quad (1)$$

или с учетом $x=x_0-vt$, уравнение переписывалось в виде:

$$\frac{d^2 T}{d\varepsilon^2} + \frac{v\rho^v c}{\lambda} \frac{dT}{d\varepsilon} - \frac{2\alpha P}{\lambda S} (T - T_0) + \frac{j^2 \rho}{\lambda} = 0, \quad (2)$$

где λ , c , ρ – коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и электропроводности меди; j – плотность тока, S – поперечное сечение проводника; T и T_0 – температура проводника и хладагента.

Если пренебречь теплоотдачей от нагретого проводника в хладагент ($\alpha=0$), то величина адиабатической скорости ($v_{ад}$) распространения нормальной фазы вдоль проводника в обе стороны от точки ее зарождения определяется выражением $v_{ад} = \frac{I}{2S\rho^v c} \sqrt{\frac{\rho\lambda}{T_c - T_0}}$, где λ – коэффициент теплопроводности, I – ток, T_0 – начальная температура проводника, равная температуре хладагента, T_c – критическая температура перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное, ρ^v – плотность. Критическая температура T_c определялась экспериментальной зависимостью параметра $I_c \times B$ как функции температуры для модельной катушки: $I_c \times B$ (кА \times Тл) = 84 – 7 T_c (К). Расчетная величина скорости распространения нормальной фазы $v_{ад}$ составила: для тока $I = 4060$ А ($T_0 = 5.18$ К, $T_c = 8.2$ К) – 0.7 м/с, для $I = 2800$ А ($T_0 = 8.8$ К, $T_c = 10.2$ К) – 0.2 м/с, для $I = 2020$ А ($T_0 = 10.8$ К, $T_c = 11.06$ К) – 0.19 м/с.

Спустя одну секунду от момента возникновения нормальной фазы, за счет теплопроводности межвитковой изоляции, начинали нагреваться и переходить в нормальное состояния соседние витки галеты, а 4 секунды спустя, переходили в нормальное состояние соседние галеты. Распределение плотности энергии по виткам галеты, перешедшей в нормальное состояние, показано на рисунке 7. Количество тепла,

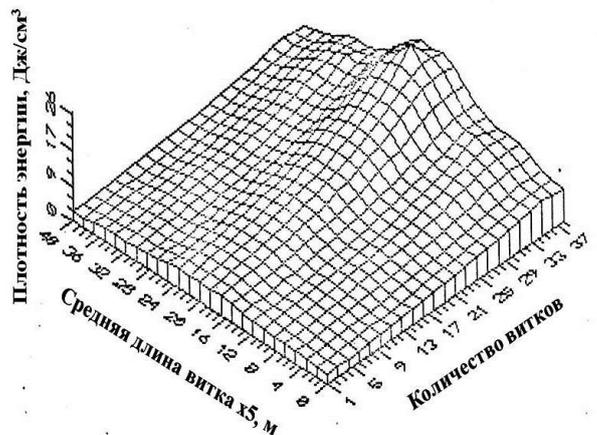


Рисунок 7 - Распределения плотности энергии по виткам галеты

выделившееся в галете, перешедшей в нормальное состояние, вычисленное как $Q = S \int_0^L w dl$, составило 210 кДж (S- поперечное сечение СТНЭ). Количество тепла, выделившееся в каждой соседней галете, составило 180 кДж. Таким образом, суммарное количество тепла, выделившееся в двух соседних галетах, гидравлически объединенных по выходу гелия, составило 390 кДж, что находилось в хорошем согласии с экспериментально полученными данными.

Для моделирования нарастания активных напряжений и скорости распространения нормальной фазы были выбраны случаи нарушения сверхпроводимости при токах 4060 А и 2020 А. Нарастание активных напряжений при распространении нормальной фазы описывалось следующей зависимостью $U(t) = \frac{2 \cdot I \cdot V_t}{S} \cdot \sum_{i=1}^n \int_0^t \rho(B, T) dt$, где I – постоянный транспортный ток, V_t - скорость распространения нормальной фазы, S - сечение стабилизирующей меди, n - число витков перешедших в нормальное состояние за время t. На рисунке 8 (а,б) сплошными линиями показаны результаты расчетов роста активных напряжений в случаях распространения нормальной фазы со скоростями 0.5 м/с, 0.75 м/с для тока 4060 А, и 0.1 м/с, 0.2 м/с для тока 2020А. Экспериментальные данные показаны треугольниками. Хорошее совпадение между экспериментальными данными и расчетными кривыми свидетельствовало о близости выбранной модели

расчета к реальной ситуации и позволило определить скорость распространения нормальной фазы в искомых случаях. Был сделан вывод, что скорость распространения нормальной фазы определялась

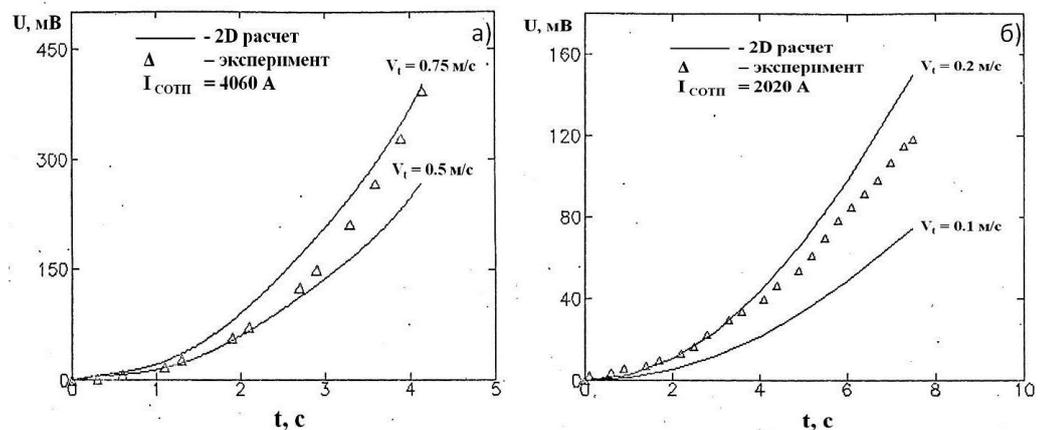


Рисунок 8 - Нарастание активных напряжений - а) для тока 4060 А: сплошные кривые - двумерный расчет для скоростей распространения нормальной фазы 0.5 м/с и 0.75 м/с, Δ – эксперимент; б) - для тока 2020 А: сплошные кривые - двумерный расчет для скоростей распространения нормальной фазы 0.1 м/с и 0.2 м/с, Δ – эксперимент

скоростью распространения теплового фронта по стабилизирующей меди вдоль проводника. В разделе 4.7. приводятся экспериментальные данные по влиянию импульсов с плазмой на работу СОТП. В экспериментах, импульсы со срывами тока плазмы 0.8 МА, следовавшие каждые 6 минут, не вызвали ни одного перехода СОТП в нормальное состояние, также, как и отдельный

срыв тока в 1 МА со скоростью изменения полоидального поля $dB/dt \sim 20$ Тл/с. В разделе 4.8. приведены выводы к Главе 4.

Глава 5 посвящена разработкам проектов модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры установки токамак Т-15 с целью создания диверторной плазменной конфигурации [29-37]. Раздел 5.1. посвящен разработке проекта установки Т-15М. Проект модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры установки токамак Т-15 (Т-15М) выполнялся в течение 2000 - 2002 гг. коллективами Института ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт» и НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Основные цели создания установки Т-15М определялись необходимостью обеспечения максимального интегрирования в международную программу исследований по созданию ТЯР, включая решение разнообразных задач в поддержку международного проекта ИТЭР и одновременно необходимостью обеспечения максимально полной программы исследований по УТС в Российской Федерации. В разделе 5.1.1. приводятся цели и физическое обоснование создания установки Т-15М. Предлагаемая установка должна была обеспечить возможность реализации ИТЭР-подобной конфигурации формы плазменного шнура (в пропорции 1/4) с сепаратрисой и полоидальным дивертором. В разделе 5.1.2. обосновывается выбор основных параметров установки. В Таблице 2 приведены данные двух основных конфигураций плазмы, которые можно было реализовать в одной установке.

Таблица 2 - Основные параметры токамаков ITER-FEAT и Т-15М

	ITER-FEAT	Т-15М (I)	Т-15М (II)
Ток плазмы I_p , МА	15	1.7	1.7
Аспектное отношение A	3.1	3.1	3.1
Большой радиус тора R_0 , м	6.2	1.55	1.55
Малый радиус плазмы a , м	2	0,5	0,5
Вытянутость сечения k_{y5}/k_x	1.7/1.85	1.7/1,85	1.7/1.85
Треугольность δ_{y5}/δ_x	0.35/0.5	0.35/0.5	0.22/0.35
Тороидальное поле на оси плазмы $B_{t Ro}$, Тл	5.3	2.5	2.5
Длительность плато тока плазмы $\Delta t_{plateau}$, с	400	2-3	3-5
Мощность нагрева плазмы $P_{доп.}$, МВт	40	≤ 3	15-20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м^{-3}	1	0.5	1
Запас потока $\Delta \Psi_{ои}$, Вб	200	8	8
Конфигурация плазмы	SN	SN	SN

Вариант (I) являлся геометрически подобным ITER-FEAT по конфигурации плазмы. Вариант (II) с уменьшенной треугольностью плазмы и увеличенным расстоянием до диверторных пластин, расширял диапазон плазменных конфигураций и вариантов дивертора, которые могли быть исследованы в Т-15М.

Общий вид установки в 3-D формате приведен на рисунке 9. В разделе 5.1.3. приведен алгоритм масштабирования параметров Т-15М по отношению к ITER-FEAT. В разделе 5.1.4.

приведены исходные параметры базовых сценариев разряда, а в разделе 5.1.5. рассчитанные сценарии разряда, как в чисто омическом разряде, так и с дополнительным нагревом плазмы. В разделе 5.1.6. даны выводы к физическому обоснованию создания токамака Т-15М. Величина мощности дополнительного нагрева плазмы, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы

составляла $2.5 \div 3.0$ МВт. При уровне поглощённой в плазме мощности ~ 20 МВт возможно достичь на оси плазмы с плотностью $n_e \approx 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температур $T_e \approx T_i \approx 7 \div 10$ кэВ. При тангенциальной инъекции пучков нейтралов 80 кэВ/9МВт возможно достижение длительного горения разряда $\Delta t_{\text{имп.}} \approx 30$ с при неиндуктивном поддержании тока масштаба 0.5 МА. Раздел 5.1.7. посвящен описанию электромагнитной системы токамака Т-15М. Для определения технических параметров ЭМС была создана программа расчета (раздел 5.1.7.1.), с помощью которой в зависимости от заданного алгоритма токов в обмотках определялись временные зависимости температуры нагрева проводников, температуры охлаждающей воды, величины выделившейся энергии в обмотке, скорости охлаждения обмоток после прохождения импульса тока. В разделе 5.1.7.2. дано описание параметров и конструкции обмотки тороидального поля. ОТП состояла из 20 катушек D-образной формы и обеспечивала величину тороидального магнитного поля 2.5 Тл на радиусе 1.55 м. Каждая катушка имела 28 витков. Катушки ОТП уложены в корпуса из нержавеющей стали, воспринимающие механические нагрузки. Обмотка индуктора (раздел 5.1.7.3.) конструктивно состояла из шести одинаковых катушек по 124 витка в каждой. Две средние катушки включены последовательно на общий источник электропитания. Остальные катушки запитывались своими собственными источниками. Полное изменение магнитного потока в ОИ – 6 Вб. В разделе 5.1.7.4. дано описание конструкции обмоток управления. Шесть обмоток управления, расположенные снаружи ОТП, создавали диверторную конфигурацию плазменного шнура, и две активные обмотки осуществляли равновесие плазменного шнура по вертикали. Сценарии токов и напряжений в обмотках полоидального поля изложены в разделе 5.1.7.5. В разделе 5.1.8. представлена конструкция

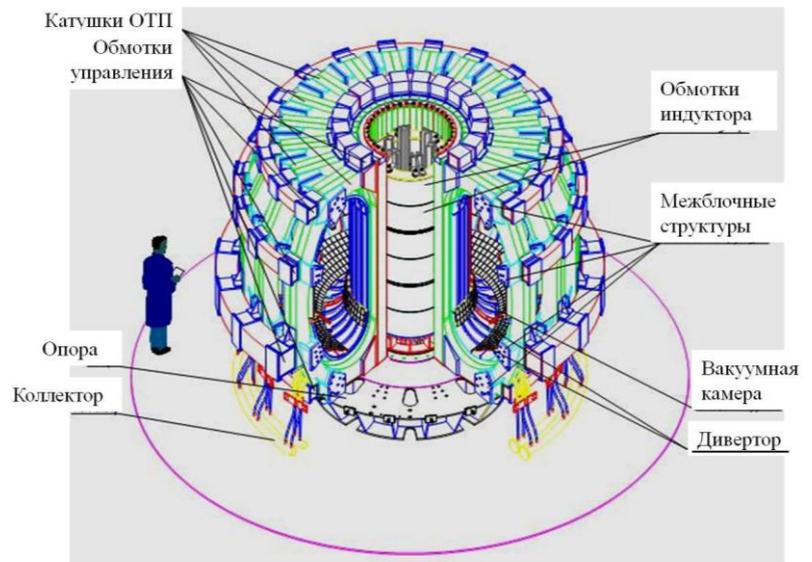


Рисунок 9 – Общий вид токамака Т-15М

вакуумной камеры и внутрикамерных элементов. ВК представляла собой металлоконструкцию оболочечного типа из стали 12X18H10T, размещаемую внутри ЭМС и электрически изолированную от неё. Объем камеры 33 м³. Конструкцию ВК составляли 4 D-образных модуля, которые сваривались между собой в единое целое на монтажной площадке, после предварительной сборки с катушками ОТП. Для поддержания рабочей температуры (220⁰С) на наружной поверхности ВК проложен нагревательный кабель укрытый теплоизоляционными матами. В нижней части ВК располагалось диверторное устройство, приемные пластины которого изготовленные из графита марки РГТ должны были воспринимать тепловую нагрузку до 10 МВт/м². В разделе 5.1.9. дано описание системы питания ЭМС Т-15М. При проведении экспериментов с плазмой уровень максимальной потребляемой активной мощности составлял 170 МВт, максимальной потребляемой реактивной мощности – 280 МВАр, длительность импульса составляла 12 с, с частотой следования 15 мин, при этом скорости нарастания активной и реактивной нагрузок соответственно составляли 30 МВт/с и 50 МВАр/с. Анализ режимов работы генераторов ТЭЦ-16 ОАО Мосэнерго при дополнительной импульсной нагрузке показал, что включение импульсной нагрузки до 300 МВт не приводило к нарушению устойчивости работы узла ее подключения. В разделе 5.1.10. изложены выводы к разделу 5.1.

В разделе 5.2. дано описание проекта по созданию диверторной конфигурации плазменного шнура в существующей вакуумной камере установки Т-15 – проект токамака Т-15Д. В разделе 5.2.1. изложены цели модернизации и физические задачи токамака Т-15Д. Модернизация токамака Т-15 была нацелена на получение плазмы с температурой до 10 кэВ, создание однонулевой полоидальной диверторной конфигурации, увеличение длительности плазменного разряда до 25 с (в перспективе до 1000 с) и общей мощности нагрева до 20 МВт. Параметры токамака Т-15Д представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Параметры токамака Т-15Д

Магнитное поле, Тл	3.5
Ток плазмы, МА	1
Длительность импульса, с	5 / 25
Большой радиус, м	2.43
Аспектное отношение	6.1
Вытянутость	1.47
Треугольность (средняя)	0.25
Дивертор	Однонулевой
НИ, МВт	9
ЭЦР, МВт	7
НГ, МВт	4
ИЦР	4

В разделе 5.2.2. изложены этапы модернизации токамака Т-15Д. Реализацию модернизации Т-15Д планировалось осуществить в 2008 - 2022 гг. в три этапа, которые включали в себя, как постепенное увеличение мощности нагрева до 24 МВт, так и замену криорезистивных обмоток управления на сверхпроводниковые и установку охлаждаемых защитных элементов стенки камеры с целью увеличения длительности разряда до 1000 с. В разделе 5.2.3. приводятся

расчетные данные по возможной максимальной длительности тока плазмы. Длительность

импульса разряда при наличии методов неиндукционного поддержания тока при фиксированной величине тока плазмы определяется допустимой величиной и длительностью токов, текущих в полоидальных обмотках, охлаждаемых жидким азотом. Анализ диверторных конфигураций показал, что максимальная длительность разряда при использовании криорезистивных обмоток при токе плазмы 1 МА не может превышать 20 с, а при токе 0.6 МА - не более 60 секунд.

Поддержание равновесной диверторной конфигурации плазмы в течение более 100 секунд требовало замены криорезистивных обмоток на сверхпроводящие и установки охлаждаемой водой первой стенки камеры. В разделе 5.2.4. дано описание состава комплекса внутрикамерных элементов (ВКЭ). Функционально комплекс ВКЭ Т-15Д состоял из четырёх основных устройств: системы для создания дополнительных магнитных полей, приёмного диверторного устройства, первой стенки, системы электромагнитной и технологической диагностик. Для создания и управления диверторной сепаратрисной конфигурацией токамака Т-15Д с заданной вытянутостью и треугольностью была предусмотрена модификация существующей системы

полоидальных магнитных полей. Система включала шесть тороидально направленных токопроводящих витков, охлаждаемых водой и расположенных внутри вакуумной камеры токамака. Расположение внутрикамерных элементов показано на рисунке 10. Диверторное устройство

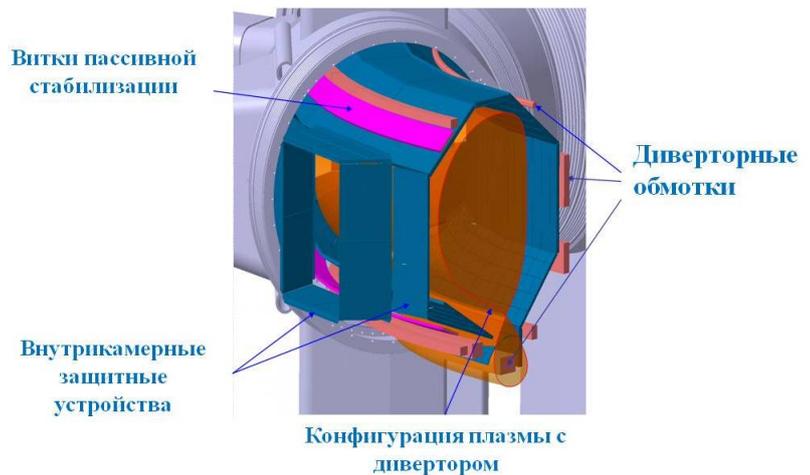


Рисунок 10 – Расположение внутрикамерных элементов

располагалось в нижней части вакуумной камеры и включало в себя приемные пластины и защитное покрытие стенки под дивертором. Диверторные приемные пластины должны были воспринимать без потери работоспособности тепловые потоки большой удельной мощности (до 20 МВт/м^2). Защитное покрытие приемных пластин планировалось на начальном этапе экспериментов изготовить из графитовых материалов. Верхняя часть вакуумной камеры также должна быть покрыта защитным слоем, изготовленным из графитовых материалов. Для стационарного охлаждения приемных пластин было предусмотрено водяное охлаждение. Расчеты основных сценариев разряда и плазменных параметров в установке Т-15Д (Раздел 5.2.5) были проведены с использованием транспортного кода ASTRA. Для описания процессов переноса использовался режим с Н-модой удержания. Эффективность генерации тока ЭЦ -

волнами была оценена с использованием кода OGRAY. Расчеты показали следующее. В режиме с высокой плотностью плазмы $n_e = 1.44 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (0.8 от плотности Гринвальда n_{Gr}) при мощности нагрева 16 МВт и токе плазмы 1 МА возможно достижение температуры $T_e, T_i > 3$ кэВ в центральных областях. При более низкой плотности $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температура в центре шнура превышала 6 кэВ. Режимы с полностью неиндукционным током могли быть реализованы при $I_p = 1$ МА при помощи генерации токов ЭЦ - волнами и нейтральной инжекцией при плотности плазмы $3.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Для режима с током 1 МА и при плотности, близкой к пределу Гринвальда, для достижения Н-моды в водородной плазме необходима мощность, превышающая 10 МВт. В разделе 5.2.6. приведены выводы к разделу 5.2 в целом.

Глава 6 посвящена разработке проекта и созданию компактного токамака Т-МД с дивертором – основы концепции термоядерного источника нейтронов [38, 40-49]. В разделе 6.1.

дано физическое обоснование токамака Т-15МД, приводятся цели и задачи установки, расчеты базовых сценариев разряда, как в омическом режиме, так и с дополнительным нагревом плазмы. Экспериментальная установка токамак Т-15МД (рисунок 11, 3-D формат) предназначена для решения широкого спектра физических проблем и развития технологий, необходимых для надежного обоснования параметров энергетического термоядерного реактора. Создание установки Т-15МД необходимо для дальнейшего развития экспериментальных исследований, проводимых в Российской Федерации на

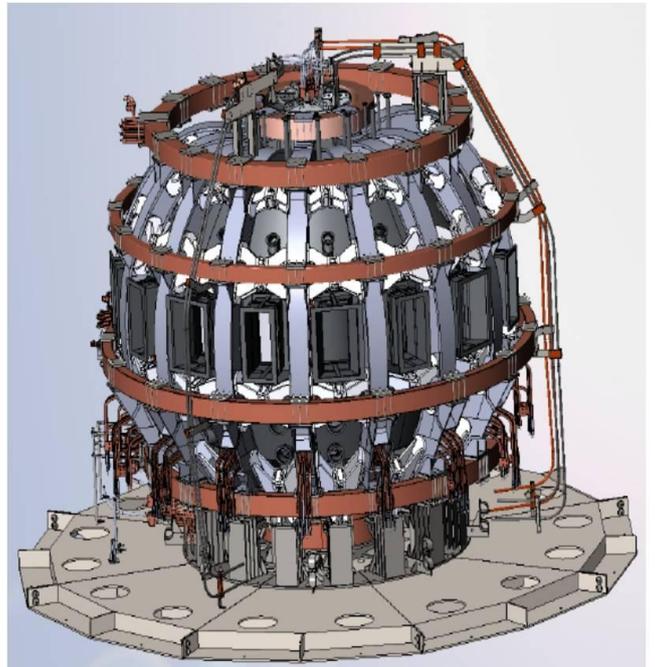


Рисунок 11 – Общий вид токамака Т-15МД

установках токамак Т-10, Т-15, Т-11М, Туман-3 и Глобус-М. Установка будет оборудована комплексом дополнительного нагрева ($P_{aux} \approx 20$ МВт), обеспечивающим одновременное достижение высокой температуры ($T_i \sim T_e \sim 10$ кэВ) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$), и позволяющим управлять профилями параметров плазмы при неиндукционном поддержании тока, современной системой управления плазмой и технологическим оборудованием, а также оборудована современным диагностическим комплексом. Одной из важнейшей составляющей проекта является накопление базы данных, необходимой для перехода к следующему шагу – термоядерному источнику нейтронов (ТИН) на основе токамака. В таблице 4 приведены основные параметры установки Т-15МД. При выборе параметров установки одним из главных критериев являлась минимизация аспектного отношения при величине тороидального поля на

оси плазменного шнура 2 Тл и тока плазмы 2 МА. Совокупность этих требований определило геометрические размеры установки и плазменного шнура. Были определены критерии начальной стадии формирования плазменного шнура. Подъём тока осуществляется со скоростью ~ 1.5 МА/с, длительность плато тока в омическом режиме - 1.5 с, резистивное напряжение $0.7 \div 0.8$ В. Средняя температура омической плазмы достигает 1.5 кэВ, а время удержания плазмы – 200 мс. В режимах с дополнительным нагревом плазмы мощность, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы составляет $P_{L \rightarrow H} = 1.5 \div 2$ МВт.

Таблица 4 - Основные параметры токамака Т-15МД

Ток плазмы I_p , МА	2
Аспектное отношение А	2.2
Большой радиус тора R_0 , м	1.48
Малый радиус плазмы а, м	0.67
Вытянутость сечения k_{95}	1.7-1.9
Треугольность δ_{95}	0.3-0.4
Тороидальное поле на оси плазмы B_{tRo} , Тл	2.0
Длительность плато разряда $\Delta t_{plateau}$, с	5-10
Суммарный запас потока $\Delta \Psi_{oi}$, Вб	6
Мощность нагрева плазмы $P_{доп.}$, МВт	20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м^{-3}	≤ 1

В режиме с дополнительным нагревом плазмы при вкладываемой мощности 13 МВт (5 МВт - ЭЦР и 8 МВт -ИН) температура в центре шнура более 5 кэВ. Поддержание тока на уровне 1 МА при плотности плазмы $0.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ обеспечивается вводом дополнительной мощности 13 МВт. При этом, величина

бутстреп-тока - 400 кА и ток увлечения при инжекции нейтралов - 600 кА.

В разделе 6.2. дано описание конструкции электромагнитной системы. В состав ЭМС входят: обмотка тороидального поля (ОТП); обмотка индуктора (ОИ); шесть обмоток управления (ОУ1-6); обмотка горизонтального управляющего поля (ОГУП), состоящая из 4 катушек; опорные конструкции.

ОТП состоит из 16-ти катушек D-образной формы (рисунок 12). Каждая катушка имеет 50 витков, собирается из четырех секций намотанных из серебросодержащего медного полого проводника с размерами $22.5 \times 32 \text{ мм}^2$ и с отверстием $\varnothing 10.5 \text{ мм}$. Катушки ОТП устанавливаются в D-образные корпуса из нержавеющей стали. Внутренние «ноги» катушек образуют арочный распор.



Катушки ОТП охлаждаются дистиллированной водой, число параллельных ветвей охлаждения в катушке равно 4. Проведённые тепловые расчёты

ОТП показали, что максимальная температура проводника при тороидальном магнитном поле 2 Тл и длительности плато тока 10 секунд составляет 77 °С.

Обмотка индуктора состоит из трех независимых катушек (151, 447 и 151 витков). Каждая катушка наматывается двумя параллельными проводниками трапециевидальной формы (размеры 14.8 x 15.5 x 20 мм² с отверстием Ø8 мм), изготовленных из серебряно-медного сплава. Катушки охлаждаются водой и 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 ОУ1-6 (рисунок 13) представляют собой катушки, собранные из двухслойных секций, намотанные полыми медными проводниками, охлаждаемые водой. ОУ1, ОУ2, ОУ3, ОУ4 и ОУ5 крепятся к корпусам обмотки тороидального поля снаружи. ОУ6 укладывается в основную опору. 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.

Были рассчитаны сценарии токов в обмотках управления и эволюция развития конфигурации плазменного шнура в режимах с омическим и дополнительным нагревом.

В разделе 6.3. описана конструкция вакуумной камеры (ВК). ВК состоит из оболочки, патрубков, элементов защитного покрытия, опорной структуры, витков пассивной стабилизации, верхнего и нижнего диверторов, элементов системы омического прогрева, системы электромагнитной диагностики, подвижной диафрагмы и четырех штырей тлеющего разряда. Объем вакуумной камеры ~ 47 м³, площадь поверхности, обращенная к плазме – 150 м². Температура прогрева оболочки ВК - 220°С, дивертора - 400°С. Материал ВК – AISI 321 немагнитная ($\mu = 1.0 \div 1.1$) нержавеющей сталь. Вакуумная камера



имеет 16 экваториальных портов прямоугольного сечения, к которым пристыковываются экваториальные патрубки и 136 патрубков различного диаметра, предназначенных для диагностических и технологических целей. Фланцевые соединения всех патрубков ВК, кроме

Рисунок 13 – Обмотки управления ОУ1-6 и ОГУП

экваториальных, выполнены на металлическом уплотнителе типа conflat. Внутренняя поверхность камеры снабжена рёбрами, на которые устанавливаются элементы защитного покрытия. Материал элементов – графит FP479. На внешнем и внутреннем обводах ВК на внутренних поверхностях конических оболочек и цилиндра устанавливаются медные витки пассивной стабилизации, поверхность которых защищена графитовыми плитками.

Верхний и нижний диверторные устройства должны воспринимать без потери работоспособности тепловые потоки удельной мощностью до 10 МВт/м². Максимальная температура поверхности графитовых приёмных пластин дивертора во время разрядного импульса не превышает 1000 °С. Водяная система охлаждения дивертора обеспечивает снижение температуры поверхности пластин до значения 220 °С за время не более 15 минут после плазменного импульса. Дивертор представляет собой кольцевую структуру из 16 секторов. Внутренние приёмные пластины расположены на конусной части дивертора. Толщина пластин 25 мм. Габариты пластин ~ 100 × 110 мм². Внешние пластины дивертора расположены на плоской части подложки. Толщина пластин 25 мм. Размеры пластин от 70 мм до 150 мм.

Система омического прогрева выполнена нагревателями на основе кирс-кабеля. Внешняя поверхность ВК, кроме внутреннего цилиндра, закрыта теплоизоляцией, которая состоит из отдельных матов. Маты представляют собой термостойкий чехол, заполненный минеральной ватой. Температура на наружной поверхности теплоизоляции не превышает 40 °С. Внутри ВК размещено большое количество датчиков электромагнитной диагностики. В разделе 6.4. приводятся планы по вводу установки в эксплуатацию. В 2016 г. должен быть начат монтаж установки на штатном месте. В 2017 г. установка должна быть подключена к технологическим системам (электропитание, водоснабжение), произведена наладка всех технологических систем совместно с установкой и осуществлен физический пуск в омическом режиме. В 2018-2021 годах будут введены в работу системы дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока. В разделе 6.5. даны выводы к Главе 6.

В заключении представлены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В процессе исследования ЭМС был выполнен большой объем экспериментальных и расчетных работ, которые позволили получить данные о технических возможностях электромагнитной системы, найти решения и создать технологические системы, которые позволили обеспечить, надежную безаварийную работу электромагнитной системы токамака Т-15 в течение всего срока эксплуатации.

Главным итогом этих исследований стал утвердительный ответ о возможности применения ниобий - оловянного проводника в сверхпроводящих магнитных системах установок токамак.

Успешная работа СОТП Т-15, обеспечившая проведение физического эксперимента при проектном значении величины тороидального поля на оси плазменного шнура 3.5 Тл и максимальном поле на проводнике 6.3 Тл, стала основанием для принятия решения о применении ниобий - оловянного проводника с циркуляционным охлаждением в международном проекте реактора ИТЭР.

Второй целью работы являлась разработка токамака с компактной диверторной конфигурацией плазменного шнура для решения актуальных задач термоядерного синтеза и гибридных систем. Установка должна была иметь диверторную конфигурацию плазменного шнура. На этом пути сначала были разработаны проект ИТЭР - подобной установки - токамак Т-15М и проект токамака Т-15Д. С началом развертывания работ по созданию термоядерного источника нейтронов для гибридных систем, был создан проект токамака Т-15МД как основа концепции ТИН. Реализация данного проекта осуществляется в настоящее время, в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года».

В результате выполнения работы решена научная проблема, имеющая важное научное и народно-хозяйственное значение: обоснована на инженерно-физическом уровне и экспериментально продемонстрирована техническая осуществимость сверхпроводящего токамака с магнитной системой на основе ниобий-олова с размерами и характеристиками, соответствующими требованиям энергетических термоядерных и гибридных установок. Разработан проект и начато сооружение установки токамак Т-15МД как основа концепции ТИН.

Таким образом, цели работы достигнуты.

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом.

1. В широком диапазоне параметров испытаны элементы электромагнитной системы и вакуумной камеры установки токамак Т-15, на основе которых были приняты технические решения по модернизации отдельных элементов, направленные на обеспечение долговечной и надежной работы в период эксплуатации. Принятые технические решения обеспечили снижение тепловой нагрузки на СОТП в режиме криостатирования и работоспособность нагревателей в течение всего срока эксплуатации. Они уменьшили вероятности появления вакуумных негерметичностей в трубках охлаждения и электрических пробоев в вакууме изоляции токоведущих частей тороидальной и полоидальной обмоток, снизили максимальную величину мощности прогрева вакуумной камеры токамака.
2. Исследованы процессы захолаживания, криостатирования и отогрева электромагнитной системы установки Т-15 в сборе. Получены первые экспериментальные данные по требуемой скорости захолаживания и отогрева элементов установки в различных температурных

диапазонах. Определены тепловые нагрузки на элементы электромагнитной системы на различных температурных уровнях. Суммарная стационарная тепловая нагрузка на азотном уровне в режиме криостатирования азотных объектов составила ~ 60 кВт. Стационарный теплоприток на СОТП на гелиевом уровне составлял в зависимости от величины давления в криостате $0.6 \div 1.5$ кВт (проектная величина – 1.5 кВт). Показано соответствие экспериментальных данных и обосновывающих проект расчетов.

Показано, что снижение тепловой нагрузки на азотный и гелиевый температурные уровни в токамаках со сверхпроводящей ЭМС возможно за счет улучшения качества поверхностей элементов (например, за счет их электрополировки) и улучшения вакуумных условий в криостате до значений давления $P < 1.0 \cdot 10^{-5}$ Торр (за счет повышения герметичности конструкций, охлаждаемых гелием). Предлагаемая оптимизация конструкции и условий эксплуатации ЭМС позволит минимизировать необходимую холодопроизводительность системы криогенного обеспечения, а следовательно, ее стоимость.

3. Анализ экспериментальных данных, полученных при кондиционировании стенок вакуумной камеры в режимах омического прогрева и тлеющего разряда при различных температурах поверхности камеры, позволил определить энергетическую эффективность штатной системы омического прогрева ($\sim 60\%$), а также требуемую температуру поверхности камеры для наиболее эффективной очистки стенок в режиме тлеющего разряда.

4. Показана эффективность предложенной системы омического прогрева на базе нагревателей, расположенных на внутренней поверхности камеры Т-15. Это техническое решение позволило при меньшей мощности прогрева - 75 кВт, достичь той же температуры силовых секций 170 °С, что и при прогреве камеры в проектом варианте, с уровнем вкладываемой в нагреватели мощности 130 кВт и снизить расход на 18 тонн жидкого азота в сутки при прогреве камеры в режиме криостатирования азотных экранов, а также уменьшить тепловую нагрузку на СОТП и электропотребление.

5. Получены новые данные о токонесущей способности ниобий - оловянной сверхпроводящей тороидальной обмотки с циркуляционным охлаждением, в том числе под воздействием переменных магнитных полей в условиях плазменного разряда с токами до 1 МА, и установлены причины, определяющие величину критического тока сверхпроводника.

Экспериментально установлено, что нарушение сверхпроводимости в тороидальной обмотке Т-15 происходит в области сильного магнитного поля, что подтвердило правильность принятого проектного решения о вводе хладагента в катушку со стороны сильного магнитного поля.

Испытания СОТП подтвердили возможность длительной работы установки Т-15 (месяцы) при проектном значении тороидального поля $B_T = 3.5$ Тл ($I_{\text{СОТП}} = 3.9$ кА, $B_{\text{max}} = 6.3$ Тл)

при входной температуре гелия $T_{\text{вх}} = 4.7\text{К}$. Экспериментально доказано, что величина критического тока СОТП в целом определяется наличием отдельных блоков с повышенной резистивностью.

Подтверждено, что причиной резистивных тепловыделений являются многочисленные изломы сверхпроводника, полученные на разных стадиях изготовления блоков по технологии «отжиг-намотка». Предложена и реализуется технология «намотка-отжиг» для изготовления катушек СОТП и центрального соленоида, на основе ниобий – оловянного проводника, в международном проекте ИТЭР.

6. Выполнены расчетно-экспериментальные исследования СОТП при нарушении сверхпроводимости, которые позволили определить температуру нагрева обмотки при защитном выводе энергии, скорость распространения нормальной фазы и величину энергии выделившейся в обмотке.

7. Получены новые знания и опыт сооружения, а также анализ работы СОТП установки Т-15, которые имеют большое практическое значение для разработки технологий и развития промышленности для создания сверхпроводников, технологии изготовления магнитных систем экспериментальных плазменных установок и будущих сверхпроводящих магнитных систем термоядерного и гибридного реакторов. Результаты исследований электромагнитной системы токамака Т-15 были востребованы при проектировании токамаков со сверхпроводящими обмотками, таких как ИТЭР, EAST (КНР), TPX (США), KSTAR (Южная Корея), SST-1 (Индия), ТИН (Россия).

8. Разработаны технические проекты модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15 с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура в поддержку проекта ИТЭР – проекты установок Т-15М и Т-15Д. Проекты этих установок были адаптированы к созданной инженерной инфраструктуре токамака Т-15.

Физические обоснования, технологические разработки отдельных систем и разработанные программы расчетов параметров электромагнитных систем для проектов установок Т-15М и Т-15Д были использованы при проектировании токамака Т-15МД.

Проведенный анализ воздействия импульсной электрической нагрузки на работу ТЭЦ-16 МОСЭНЕРГО при работе модернизированной электромагнитной системы токамака позволил принять решение о возможности проектирования установки с потребляемой электрической мощностью 300 МВт в течение 12 секунд.

9. Разработан проект и начато сооружение крупнейшего в России токамака с двухнулевой диверторной конфигурацией плазменного шнура, аспектным отношением 2.2, тороидальным магнитным полем 2.0 Тл и током плазмы 2.0 МА – токамак Т-15МД. Важной составляющей проекта является накопление базы данных и технологий для создания нейтронных источников

для гибридных систем. Физический пуск токамака Т-15МД планируется осуществить в 2017 году, а в 2018-2021 гг. будут введены системы дополнительного нагрева плазмы. Токамак такого масштаба будет установкой современного уровня, построенной в России в ближайшей перспективе.

Следующим этапом развития работ по гибридным системам должно стать сооружение демонстрационного нейтронного источника ДЕМО-ТИН на основе токамака со сверхпроводниковой магнитной системой, проектирование которого уже началось.

В процессе проведения предмонтажных испытаний отдельных элементов и узлов ЭМС Т-15, сборке и эксплуатации уникальной установки Т-15, разработок проектов по модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры Т-15, изготовления элементов ЭМС и вакуумной камеры токамака Т-15 МД, принял участие большой коллектив рабочих, инженеров, специалистов, научных работников различных предприятий и организаций, чей самоотверженный труд и знания позволили успешно выполнить сложные и ответственные задачи. Особую искреннюю благодарность я хотел бы выразить д.ф.-м.н., профессору Э.А.Азизову, который был инициатором создания диверторного токамака Т-15МД, оказывал постоянное внимание и всестороннюю поддержку, давал ценные советы при подготовке диссертации. Д.П.Иванову, создателю первого в мире сверхпроводящего токамака Т-7, который являлся первым моим руководителем при пуске и эксплуатации токамака Т-7, а также его модернизации (токамак НТ-7, КНР), вносил ценные предложения по методике проведения экспериментов и принимал активное участие в интерпретации результатов исследований токонесущей способности СОТП Т-15. Профессору, д.ф.-м.н. Б.В.Кутееву за ценные замечания и полезные советы, сделанные при рецензировании рукописи диссертации. Своим коллегам И.О.Анашкину, А.Н.Вертипороху, В.Н.Гарнову, В.А.Кочину, В.А.Михайличенко, А.Е.Угроватову совместно с которыми проводились экспериментальные исследования и создавались системы защиты СОТП и омического прогрева камеры. А.Н.Чудновскому, совместно с которым, были созданы программы для расчетов нагрева СОТП при возникновении нормальной фазы и параметров электромагнитных систем установок Т-15М, Т-15Д и Т-15МД. В.М.Леонову, который провел расчеты основных сценариев разряда для вышеуказанных установок. Сотрудникам НИИЭФА им. Д.В.Ефремова: Э.Н.Бондарчуку, который являлся руководителем работ со стороны НИИЭФА по разработке проектов установок Т-15М и Т-15Д, а также руководителем расчетно-конструкторского отдела по разработке ЭМС всех трех проектов модернизации Т-15; В.А.Крылову руководителю отдела по разработке конструкции вакуумных камер и внутрикамерных элементов; А.Б.Минееву, внесшему большой вклад в физическое обоснование всех проектов модернизации токамака Т-15.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Альхимович В.А., Ахтырский С.В.,...Хвостенко П.П. и др. Результаты физического пуска установки Т-15 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Термоядерный синтез», 1989, вып. 3, С. 3-17.
2. Cheverev N.S., Bondarchuk E.N., Glukhikh V.A.,...Hvostenko P.P. et al. T-15 Results of testing of Systems and Parts // Fusion Technology 1988, v. 2, pp. 356-360.
3. Альхимович В.А., Александров Ю.Н., Анашкин И.О...Хвостенко П.П. и др. Испытания и сборка электромагнитной системы установки Токамак-15 // Препринт ИАЭ-5138/7, 1990.
4. Ivanov D.P., Anashkin I.O., Khvostenko P.P. et al. Reliability of Force Cooled Superconducting Magnets for Fusion // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, Volume: 22 , Issue: 3, Page(s): 4200604.
5. Иванов Д.П., Колбасов Б.Н., Лелехов С.А.,...Хвостенко П.П. и др. Необходимость повышения надежности сверхпроводящих магнитных систем с принудительным охлаждением // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 1, С. 5-16.
6. Ivanov D.P., Kolbasov B.N., Anashkin I.O., Khvostenko P.P. et al. Operational experience with forced cooled superconducting magnets // Fusion Engineering and Design. 2013. Т. 88. № 9-10. pp. 1569-1575.
7. Ivanov Denis, Kolbasov Boris, Anashkin Igor, Khvostenko Pyotr et al. Operational Experience with Forced Cooled Superconducting Magnets // 27th Sym. on Fusion Technology, September 24-28, 2012 Liege (Belgium), Book of abstracts, p. 3.59.
8. E. N. Bondarchuk, L. B. Dinaburg, N. I. Doinikov,...Khvostenko P.P. et al. Tokamak-15 electromagnetic system. Design and test results // Plasma Devices and Operations, Volume 2, Issue 1, 1992, pp.1-25.
9. Дюжев В.Е., Жулькин В.Ф., Посадский И.А., Крикунов А.А., Константинов А.Б., Хвостенко П.П. Исследование режимов охлаждения, криостатирования и отогрева ЭМС Т-15 // Тез. док. V Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1990), С. 124-125.
10. Вертипорох А.Н., Голованов О.Г., Зайцев М.А.,...Хвостенко П.П. и др. Изучение режимов прогрева вакуумной камеры установки Т-15 // Препринт ИАЭ- 5061/7, 1989.
11. Alkhimovich V. A., Vertiporokh A. N., Igon'kina G. B.,...Khvostenko P.P. et al. T-15 plasma chamber design and testing // Plasma Devices and Operations, Volume 2, Issue 1, 1992, pp.27-46.
12. Garnov V.N., Kabanovsky S.V., Khvostenko P.P. et al. Ohmic baking system upgrade for wall conditioning of tokamak-15 discharge chamber // Proc. of the 19th Sym. on Fusion

- Technology, Lisbon, Portugal, 16-20 September 1996, vol.1, p.515.
13. Khvostenko P.P., Alexandrov E.V., Anashkin I.O. et al. Design and testing of protective graphite shield for tokamak-15 discharge chamber and moveable electrodes for glow discharge // Proc. of the 20th Sym. on Fusion Technology, Marseille, France, 7-11 September 1998, vol.1, pp.169-172.
 14. Альхимович В.А., Анашкин И.О., Бритоусов Н.Н.,...Хвостенко П.П. и др. Результаты первых испытаний сверхпроводящей магнитной системы установки Токамак-15 // Препринт ИАЭ-5233/10, 1990.
 15. Альхимович В.А., Анашкин И.О., Асмаловский В.В.,...Хвостенко П.П. и др. Исследование сверхпроводящей обмотки тороидального поля установки Токамак-15 // Препринт ИАЭ-5572/7, 1992.
 16. Посадский И.А., Хвостенко П.П., Чудновский А.Н. Расчет уровня уставок в системе защиты сверхпроводящей обмотки тороидального поля установки Т-15 // Препринт ИАЭ-5675/7, 1993.
 17. Chudnovsky A.N., Khvostenko P.P. and Posadsky I.A. Determination of settings in the protection system for Tokamak-15 superconducting magnet (SM) // IEEE Transaction on Magnetics, vol.32, No.4, July 1996, pp.3117-3120.
 18. Anashkin I.O., Vertiporokh A.N., Volobuev A.N.,...Khvostenko P.P. First tests of the T-15 toroidal field superconducting system // Proc. of the 11th Int. Conf. on Magnet Technology, Tsukuba, Japan, 1989, v.2, pp.773-776.
 19. Альхимович В.А., Бритоусов Н.Н., Вертипорох А.Н.,...Хвостенко П.П. Результаты первых экспериментов на установке Т-15 // Сб. научных трудов ИАЭ, 1989, т.2, С. 3-7.
 20. Альхимович В.А., Анашкин И.О., Бритоусов Н.Н.,...Хвостенко П.П. Результаты первых испытаний сверхпроводящей магнитной системы установки Токамак-15 // Тезисы докладов 5-ой всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Л., 10-12 октября 1990, С. 5-6.
 21. Britousov N.N., Chernoplekov N.A., Ivanov D.P., Kashirskikh G.M., Khvostenko P.P. et al. Fusion Facility T-15: First Experiments with Electromagnetic System // Proc. of the 16th Sym. on Fusion Technology, London, U.K., 3-7 September 1990, p.597.
 22. Alkhimovich V.A., Anashkin I.O., Britousov N.N.,...Khvostenko P.P. et al. The current capacity tests of the tokamak T-15 Nb₃Sn toroidal coil assembly // IEEE Transactions on Magnetics, 1991, vol.27, No.2, pp.2057-2059.
 23. Anashkin I.O., Ivanov D.P., Khvostenko P.P. et al. Status and test results of the Tokamak-15 superconducting toroidal field coil // Proc. of Fusion Engineering, 15th IEEE/NPSS Sym. on Fusion Engineering, Hyannis, 1993, October, vol.2, pp.1152-1157.

24. Anashkin I.O., Ivanov D.P., Khvostenko P.P. et al. The analysis of current-carrying capability of the T-15 superconducting magnet // Proc. of the 18th Sym. on Fusion Technology, Karlsruhe, Germany, 22-26 August 1994, vol.2, p.961.
25. Буткевич И.К., Иванов Д.П., Кикнадзе Г.И.,...Хвостенко П.П. и др. Сверхпроводящие магнитные системы для Токамаков / под ред. Н.А.Черноплекова // Издательство литературы по атомной технике, Москва, 1997,167 с.
26. Anashkin I.O., Chudnovsky A.N., Ivanov D.P., Khvostenko P.P. et al. Study of the tokamak-15 superconducting toroidal field coil (STFC) heating under the quench // FUSION TECHNOLOGY, VOL.26, No3, Part 2, NOV.1994, pp. 453-457.
27. Бендер С.Е., Бритоусов Н.Н., Бычков А.Г.,...Хвостенко П.П. и др. Результаты измерений полоидальных полей и получение разрядов с плазмой в установке Т-15 // Препринт ИАЭ-5138/7, 1990.
28. Belyakov V. A. , Bender S. E., Bondarchuk E.N.,...Khvostenko P.P. et al. Plasma position and current control in T-15 tokamak // Plasma Devices and Operations, Volume 2, Issue 1, 1992, pp. 61-75.
29. Алексеев А.Б., Альхимович В.А.,...Хвостенко П.П., Цаун С.В. Проект токамака Т-15М // Тез. докл. 7-ой межд. конф. по инженер. проблемам термояд. реакторов, С.-Петербург, 28-31 октября 2002, С.15-16.
30. Dnestrovskij Yu.N., Leonov V.M., Notkin G.E., Khvostenko P.P. et al. Discharge scenario for T-15M tokamak design project // Problems of Atomic Science and Technology. 2000 (UK). No 3. Series: Plasma Physics (5). pp. 25-27.
31. Bondarchuk E. N., Filatov O. G., Khvostenko P. P., Smirnov V. P. and T-15M Team. Status of tokamak T-15M Project // Book of Abstracts of International Conference on Engineering Problems of Thermonuclear Reactors (EPTR 2002), St. Petersburg, October 28–31 (2002), pp. 15–16.
32. Какурин А.М., Леонов В.М., Ноткин Г.Е., Хвостенко П.П. и др. Основные сценарии разряда токамака Т-15М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, С. 53-75.
33. Alekseev, A.B., Arneman, A.F., Bondarchuk, E.N.,...Khvostenko P.P. et al. T-15M MAGNET SYSTEM // 22th Sym. on Fusion Technology, Helsinki, Finland, 9th–13th September, Book of Abstracts, 2002, p.279.
34. Mironov S.A., Grigoriev S. A., Mineev A. B.,...Khvostenko P.P. et al. Design and design features of the T-15M Tokamak vacuum vessel // Plasma Devices and Operations, Volume 12, Number 1, March 2004, pp. 19-30 (12).
35. Хвостенко П.П., Альхимович В.А., Велихов Е.П. и др. Физическое обоснование

- реконструкции Т-15 // XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 12-16 февраля 2007 г.
36. Альхимович В.А., Велихов Е.П., Вершков В.А.,...Хвостенко П.П. и др. Инженерно – физическое обоснование реконструкции токамака Т-15 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, С. 3-15.
 37. Вдовин В.Л., Смирнов В.П., Хвостенко П.П. и др. Сценарии и система ионно-циклотронного нагрева плазмы и поддержания тока в токамаке Т-15 // XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 11-15 февраля 2008 года.
 38. Azizov E.A., Belyakov V.A., Filatov O.G., Velikhov E.P. and T-15MD Team: Bondarchuk E.N.,...Khvostenko P.P. et al. Status of Project of Engineering-Physical Tokamak // 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea Rep. of 11-16 October 2010, FTP/P6-01.
 39. Be Y.F., Cheng S.M., Chudnovsky A.N., He Y.X., Khvostenko P.P., Posadsky I.A. Optimization of the Protective Energy Removal Parameters for Tokamak HT7-U // Proc. of the 20th Sym. on Fusion Technology, Marseille, France, 7-11 September 1998, vol.1, pp.795-798.
 40. 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, No 1T, pp.180-183.
 41. Azizov E., Khvostenko P., Belyakov V. et al. Status of Upgrading Project of Tokamak T-15// 25th IAEA Fusion Energy Conference St. Petersburg, Russian Federation, October 13–18, 2014, Book of Abstracts, FIP/3-2, p.515.
 42. Roy I., Anashkin I., Barsukov A.,...Khvostenko P. et al. The Auxiliary Heating and Current Drive Systems on The Tokamak T-15 Upgrade // 25th IAEA Fusion Energy Conference St. Petersburg, Russian Federation, October 13–18, 2014, Book of Abstracts, EX/P1-50, p.204.
 43. Khvostenko P., Vdovin V., and Azizov E. ICRF System on Tokamak T-15 // 25th IAEA Fusion Energy Conference St. Petersburg, Russian Federation, October 13–18, 2014, Book of Abstracts, FIP/P5-4, p.540.
 44. Bondarchuk E.N., Azizov E.A., Alekseev A.B.,...Khvostenko P.P. et al. Engineering Problems of Tokamak T-15 Electromagnet System Reconstruction // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, Volume: 22 , Issue: 3, Page(s): 4201604
 45. Khvostenko P.P., Azizov E.A., Alfimov D.E. et al. The magnet system of the Tokamak T-15 upgrade // Proc. of the 28th Sym. on Fusion Technology, San Sebastian, Spain, September 29/October 3, 2014, P4 076.
 46. 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, pp. 1090-1093.

47. Sushkov A.V., Azizov E.A., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Khvostenko P.P. et al. Modernization of the T-15 Tokamak – current status and plans // International Conference & School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas", Alushta, 2012, September 17-22, pp.1-30.
48. Азизов Э.А., Алфимов Д.Е., Анашкин И.О.,...Хвостенко П.П. Модернизация токамака Т-15: Статус и планы // XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 9-13 февраля 2015 года, Сб. тезисов докладов, Москва, 2015, С. 68.
49. 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.