

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА И ВАКУУМНАЯ КАМЕРА ТОКАМАКА Т-15. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ.....	27
1.1. Цели и основные параметры токамака Т-15.....	27
1.2. Электромагнитная система.....	29
1.2.1.Сверхпроводящая обмотка тороидального поля.....	30
1.2.2.Опорный цилиндр.....	36
1.2.3.Механическая опора.....	37
1.2.4.Блок криогенных и токовых вводов.....	38
1.2.5.Полоидальная магнитная система.....	39
1.2.6.Магнитопровод.....	45
1.2.7.Тепловые экраны.....	46
1.2.8.Вакуумная камера.....	48
1.2.9.Криостат.....	51
1.3. Результаты испытаний систем Т-15.....	52
1.3.1. Испытания блоков СОТП.....	53
1.3.2. Испытания опорной колонны.....	55
1.3.3. Испытания обмотки индуктора.....	58
1.3.4. Испытания секций внутреннего азотного экрана с катушками вертикального управляющего поля.....	62
1.3.5. Испытания секций наружного азотного экрана.....	63
1.3.6. Испытания подставки опорной колонны.....	66
1.3.7. Испытания обмоток управления.....	68
1.3.8. Испытания модулей вакуумной камеры.....	69
1.4. Выводы к Главе 1.....	70

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ, КРИОСТАТИРОВАНИЯ И ОТОГРЕВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ Т-15.....	72
2.1. Система криогенного обеспечения Т-15.....	72
2.2. Процесс захлаживания и криостатирование электромагнитной системы...	75
2.3. Отогрев электромагнитной системы.....	81
2.4. Расчетные и экспериментальные определения величин теплопритоков к элементам ЭМС.....	82
2.5. Выводы к Главе 2.....	84
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ.....	86
3.1. Методы вакуумной подготовки (кондиционирования) камеры в установках токамак.....	86
3.1.1. Прогрев камеры.....	87
3.1.2. Плазменный разряд с переменным током (Тэйлоровский разряд).....	87
3.1.3. Тлеющий разряд.....	88
3.1.4. СВЧ – разряд.....	88
3.2. Омический и индукционный прогрев вакуумной камеры установки Т-15.....	89
3.2.1. Режим прогрева.....	93
3.2.2. Тепловой баланс при прогреве вакуумной камеры.....	99
3.3. Омический прогрев камеры нагревателями, размещенными на внутренней поверхности камеры.....	103
3.4. Исследование кондиционирования стенок камеры в тлеющих разрядах.....	113
3.4.1. Методы и средства исследований.....	113
3.4.2. Параметры режимов тлеющего разряда.....	116
3.4.3. Результаты измерений.....	117
3.5. Выводы к главе 3.....	120

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ.....	121
4.1. Общая характеристика и задачи исследования.....	121
4.2. Система питания СОТП.....	122
4.3. Система защиты СОТП.....	123
4.3.1. Штатная система защиты СОТП.....	123
4.3.2. Модернизированная система защиты СОТП.....	126
4.3.3. Расчеты уровня уставок.....	127
4.4. Зависимость токонесущей способности СОТП от температуры.....	139
4.5. Измерения резистивных тепловыделений.....	142
4.6. Исследование нагрева СОТП при защитном выводе энергии.....	144
4.6.1. Экспериментальные результаты.....	144
4.6.2. Расчетная модель и результаты моделирования.....	149
4.7. Влияние плазмы на работу СОТП.....	157
4.8. Выводы к Главе 4.....	160
ГЛАВА 5. СОЗДАНИЕ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭМС И КАМЕРЫ Т-15 – ПРОЕКТЫ ТОКАМАКОВ Т-15М И Т-15Д.....	162
5.1. Модернизация электромагнитной системы и вакуумной камеры установки Т-15 – проект токамака Т-15М.....	162
5.1.1. Цели и физическое обоснование создания токамака Т-15М.....	162
5.1.2. Выбор основных параметров установки Т-15М.....	165
5.1.3. Пределы подобия установок Т-15М и ITER-FEAT.....	167
5.1.4. Исходные параметры и базовые физические сценарии разряда.....	168
5.1.5. Выводы к физическому обоснованию.....	178
5.1.6. Электромагнитная система.....	178
5.1.7. Вакуумная камера.....	192
5.1.8. Система электропитания.....	197
5.1.9. Выводы к разделу 5.1.....	202
5.2. Модернизация электромагнитной системы токамака Т-15 –	

установка Т-15Д.....	203
5.2.1. Цели модернизации и физические задачи токамака Т-15Д.....	203
5.2.2. Этапы модернизации.....	206
5.2.3. Максимальная длительность разряда.....	208
5.2.4. Состав комплекса внутрикамерных элементов	211
5.2.5. Сценарии разряда	217
5.2.6. Выводы к разделу 5.2.....	220
ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ТОКАМАКА Т-15МД	222
6.1. Физическое обоснование параметров токамака Т-15МД.....	222
6.1.1. Цели и задачи токамака Т-15МД	222
6.1.2. Выбор основных параметров токамака Т-15 МД.....	224
6.1.3. Физические сценарии разряда.....	228
6.2. Электромагнитная система.....	236
6.2.1. Состав и параметры ЭМС.....	236
6.2.2. Опорные конструкции ЭМС.....	238
6.2.3. Оценка влияния поля рассеяния на металлоконструкции зала Т-15МД....	241
6.2.4. Обмотка тороидального поля.....	242
6.2.5. Обмотка индуктора.....	246
6.2.6. Обмотки управления.....	248
6.2.7. Сценарий токов в обмотках управления.....	250
6.3. Вакуумная камера установки Т-15МД.....	252
6.3.1. Назначение и технические характеристики.....	252
6.3.2. Состав, компоновка и конструкция ВК.....	254
6.4. Планы по вводу токамака Т-15 МД в эксплуатацию.....	262
6.5. Выводы к главе 6.....	263
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	264
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	269
ЛИТЕРАТУРА.....	272

ВВЕДЕНИЕ

Основной тенденцией развития общества в XXI веке является непрерывный рост энергопотребления, связанный как с ростом народонаселения, так и с удовлетворением потребности в энергии стран третьего мира, что необходимо для их развития. Возможности 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. С этой целью разрабатываются ядерные реакторы на быстрых нейтронах различного типа [1]. В настоящее время ядерная энергетика базируется в основном на реакторах с тепловыми нейтронами, проблема которых заключается в ограниченности топливных ресурсов. Кроме того, в тепловых реакторах образуется большое количество высокоактивного отработанного топлива, которое требует специального обращения и оборудования специальных хранилищ.

Создание экономически эффективных и максимально безопасных быстрых реакторов в значительной степени решит проблемы как топливных ресурсов для тепловых реакторов, так и утилизации высокоактивного отработанного ядерного топлива. Для этого необходимо решить большое число научных и технологических задач, связанных с энергетической эффективностью, необходимым темпом наработки топлива, утилизации ядерных отходов и безопасности [1].

Одним из наиболее перспективных инновационных источников энергии является управляемый термоядерный синтез (УТС). Основным стратегическим направлением работ в УТС в Российской Федерации является поддержка и участие в проекте ИТЭР и 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 [2],[3].

Гибридные реакторы, в blankets которых, содержится уран 238, торий 232 или минорные актиниды из отработанного ядерного топлива могут использоваться для наработки ядерного топлива для тепловых и быстрых реакторов (плутония 239 и урана 233), для трансмутации долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО), а также для выработки энергии в подкритических системах. Требования к плазменной части и нейтронным потокам для гибридных реакторов на порядок ниже, чем к чисто термоядерным реакторам, что может существенно сократить время их внедрения.

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

Программой ИТЭР до 2030 года планируется выполнение исследований и испытаний базовых режимов, технологий и материалов для разработки, при поддержке национальных программ, проекта демонстрационного реактора ДЕМО [7].

ИТЭР так же, как и будущие промышленные термоядерные и гибридные реакторы, будет работать в режиме длительного горения плазмы, что требует применения стационарно работающих систем как собственно установки, так и технологических систем для реализации энергетически и экономически целесообразных режимов.

Стационарный режим предъявляет серьезные требования к базовым 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, система кинетического контроля радиальных профилей основных параметров плазмы, а также система безопасного вывода энергии и частиц, которая включает элементы первой стенки и дивертора.

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.

Первый в мире токамак со сверхпроводящей обмоткой тороидального поля на основе ниобий-титанового сверхпроводника Т-7 был создан в ИАЭ им. И.В. Курчатова в 1979 г. [8]. Дальнейшие эксперименты в нашей стране были продолжены на токамаке Т-15 [9].

Введенный в работу в 1988 г. один из крупнейших в мире токамак Т-15 с круглым сечением плазмы (большой радиус 2 м 43 см и малый радиус 78 см) обладал уникальной сверхпроводящей обмоткой тороидального поля (СОТП) на основе ниобий - оловянного сверхпроводника с циркуляционным охлаждением. Эксперименты на токамаке Т-15 внесли значительный вклад в совершенствование технологий создания и использования сверхпроводящих магнитных систем, развитие диагностических методов и методов дополнительного нагрева, включая СВЧ - нагрев и нагрев пучками нейтральных атомов. Эксперименты были проведены в лимитерной конфигурации и были получены режимы с током до 1 МА, мегаваттным уровнем мощности нагрева и длительностью разряда около 1 с.

После проведения успешной серии экспериментов токамак Т-15 был остановлен из-за недостатка средств на эксплуатацию. К этому времени международным термоядерным сообществом было установлено отсутствие реакторных перспектив у токамаков круглого сечения.

Одновременно с токамаком Т-15 в мире работали несколько сверхпроводящих термоядерных установок: токамаки с круглым сечением плазменного шнура Tore Supra [10], TRIAM1-M [11], HT-7 (модернизированный токамак Т-7) [14] и стелларатор LHD [12, 13]. Разработка, конструирование и экспериментальные исследования на этих установках, а также на российских установках Т-7 и Т-15 позволили накопить ценный опыт работы с криогенной техникой и технологией поддержания квазистационарного разряда в токамаках со сверхпроводящими обмотками тороидального поля (СОТП).

В настоящее время в России основной экспериментальной базы исследований по управляемому термоядерному синтезу является установка Т-10, находящаяся в НИЦ «Курчатовский институт». На токамаке Т-10 (большой радиус 1.5 м, малый радиус 0.4 м), вступившем в строй в 1975 г., проводятся эксперименты по исследованию устойчивости плазмы и удержанию энергии, разработке методов нагрева плазмы и решению разнообразных технологических проблем. На этом токамаке были получены рекордные для российских установок параметры плазмы: плотность плазмы 10^{20} м^{-3} , электронная температура 10 кэВ, ионная температура 1 кэВ, время удержания энергии около 0.1 с, длительность импульса омического разряда 0.8 с и дополнительного нагрева 0.4 с.

К сожалению, проводимые в России исследования охватывают только узкую часть спектра ключевых задач ИТЭР. Это связано, в первую очередь, с отсутствием в России крупной установки с подобной ИТЭР конфигурацией. Диверторные проблемы и проблемы сепаратрисной конфигурации доступны были только на малом сферическом токамаке Глобус-М [15, 16]. Установка Глобус-М, сооруженная в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, позволяет работать с плазмой в сверхкомпактной конфигурации (аспектное отношение $A = R/a \sim 1.5$) и представляет важное поисковое направление для понимания физики

удержания плазмы в токамаках. Однако низкое аспектное отношение, относительно небольшое магнитное поле и малые размеры плазмы на этой установке ограничивают возможности экспериментов в поддержку ИТЭР.

России для того, чтобы быть на уровне мировых исследований была крайне необходима установка с длинным импульсом (возможности достижения стационарного горения плазмы с высокими параметрами и перехода на неиндуктивное поддержание тока), мощным дополнительным нагревом плазмы, вытянутым сечением и дивертором. Российская программа должна включать в себя отработку технологий, необходимых для нейтронных источников [17,18]. Эта идеология нейтронных источников для выжигания актинидов и наработки топлива для атомной энергетики считается в России одной из перспективных с целью достижения более быстрой отдачи от исследований по УТС и реальной демонстрацией энергетических возможностей реакций синтеза.

Создание такой установки диктуется рядом обстоятельств. Как показывает развитие работ по проекту международного реактора - токамака ИТЭР, для оптимального продвижения к промышленному термоядерному реактору сочтено целесообразным в каждой из стран-участниц проекта иметь современный токамак, на котором можно проводить исследования как в поддержку программы ИТЭР, так и развития реакторных технологий.

В Евросоюзе в качестве такой установки является крупный токамак JET (Joint European Tokamak) с тёплой магнитной системой, длинным импульсом, вытянутым сечением плазмы и дивертором, который в настоящее время модернизирован под программу ИТЭР [19,20]. В частности, на нём проводятся эксперименты с аналогичной ИТЭРовской облицовкой внутрикамерных элементов и дивертора (вольфрам), получают дальнейшее развитие технологии инъекции нейтралов (35 МВт, 130 кэВ, 20 с) и частотной (до 50 импульсов) пеллет - инъекции.

В Японии за основу выбрана модернизация крупного токамака JT-60U (Japan Tokamak Upgrade) в JT-60SA (Supper Advanced) [21,22,23] (токамак со сверхпроводниковой магнитной системой, вытянутым сечением плазмы,

с дивертором и длинным импульсом). Цели – расширение возможностей инъекции нейтралов (41 МВт, 100 с), достижение и восприятие тепловых потоков на диверторные пластины на уровне 15 МВт/м^2 .

В Китае на современном токамаке EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) [24,25] (токамак средних размеров $R = 1.8 \text{ м}$, $a = 0.5 \text{ м}$, со сверхпроводниковой магнитной системой, вытянутым сечением плазмы, с дивертором и длинным импульсом) проводятся эксперименты с мощностью нагрева плазмы 26 МВт (мощность пучка нейтралов – 16 МВт, энергия пучка $50 \div 80 \text{ кэВ}$).

В Южной Корее ведутся эксперименты на токамаке KSTAR [26] (токамак средних размеров $R = 1.7 \text{ м}$, $a = 0.4 \text{ м}$, со сверхпроводниковой магнитной системой, вытянутым сечением плазмы, с дивертором и импульсом до 300 с). Мощность дополнительного нагрева плазмы – 26 МВт (мощность пучка нейтралов – 8 МВт, энергия пучка $80 \div 100 \text{ кэВ}$).

В Индии построен небольшой токамак со сверхпроводящей магнитной системой SST-1 (Steady State Tokamak – 1) [27], с большим $R = 1.1 \text{ м}$ и малым $a = 0.2 \text{ м}$ радиусами, умеренной мощностью нагрева (инъекция нейтралов (ИН) – 1 МВт, мощность ионного циклотронного нагрева (ИЦР) – 1 МВт, нижегибридного нагрева и поддержания тока (НГ) – 1 МВт). В то же время на нём предполагается достичь длительности импульса в 1000 с.

В США базой для исследований служат несколько установок (все с тёплой магнитной системой): DIII-D, NSTX (National Spherical Torus Experiment) [28, 29] и, возможно, токамак NHTX (National High-power advanced Torus eXperiment) [30]. Последняя установка является компактным токамаком среднего класса с теплыми обмотками, с аспектным отношением $A \approx 2$ ($R = 1 \text{ м}$, $a = 0.55 \text{ м}$), вытянутым сечением, дивертором и очень мощным нагревом плазмы (суммарная мощность 50 МВт, из них мощность ИН – 30 МВт).

Проекты по модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака T-15 с целью создания диверторной конфигурации плазменного шнура

были выполнены в 2000 - 2010 гг. совместно ИЯС РНЦ «КИ» (впоследствии ИФТ НИЦ «КИ») и НИИЭФА им. Д.В.Ефремова.

В 2000 - 2002 гг. был разработан проект ИТЭР - подобной установки токамак Т-15М [31], имеющей размеры плазменного шнура $\frac{1}{4}$ от линейных размеров плазмы в установке ИТЭР. В силу экономических причин этот проект не был реализован.

В 2005 - 2006 гг. в Институте ядерного синтеза было принято решение о модернизации Т-15 путем создания диверторной конфигурации внутри круглой вакуумной камеры с помощью ввода в камеру дополнительных полоидальных обмоток – токамак Т-15Д [32]. Технический проект модернизации токамака Т-15 был разработан НИИЭФА совместно с РНЦ «Курчатовский институт» в 2007 году и был включен в общий проект по техническому перевооружению комплекса токамака Т-15.

В 2009 г. проект по техническому перевооружению экспериментальной термоядерной установки токамак Т-15, как часть термоядерного раздела был включен в Федеральную целевую программу «Ядерные энерготехнологии нового поколения» на 2010 -2015 годы и на перспективу до 2020 г.» (ФЦП «ЯЭТНП») [1].

Однако, анализ состояния и перспектив работ по физике и технологии токамаков в России, выполненный комиссией ГК «Росатом» по выбору оптимальных путей развития работ по токамакам, созданной по инициативе Е.П. Велихова, показал, что проект модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15 в предложенном в ФЦП «ЯЭТНП» виде не может решить ни одну из актуальных задач исследований в поддержку ИТЭР и разработки демонстрационного термоядерного реактора ДЭМО. Кроме того, развитие атомной энергетики нуждается в использовании термоядерных нейтронов для наработки искусственного топлива и трансмутации ДВАО. В связи с этим возникла необходимость создания стационарных источников термоядерных нейтронов, обеспечивающих потоки $0.2 \div 1.0$ МВт/м² на базе токамаков.

На основании рекомендаций комиссии ГК «Росатом» рассмотренных и одобренных секцией №6 НТС ГК «Росатом», РНЦ «КИ», ГК «Росатом» и РАН разработали «Предложения по освоению технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС) в Российской Федерации на 2010 - 2020 годы» [33]. Эти «Предложения» были заслушаны и одобрены экспертными советами и секцией 6 НТС ГК «Росатом» и ГК «Росатом» были направлены в Правительство Российской Федерации. Аппарат Правительства поддержал «Предложения» и просил ГК «Росатом», Минобрнауки и РАН обеспечить реализацию «Предложений» в рамках утвержденных планов, ФЦП и обязательств РФ в области международного сотрудничества [34].

Предложения охватывали работы по УТС в России до 2020 года и были направлены на достижение следующих основных целей:

1. Создание новой экспериментальной и стендовой базы, в том числе на основе инновационных решений путем замены и модернизации установок и стендов.
2. Проведение исследований и инновационных технологических разработок на новой экспериментальной и стендовой базе в поддержку ИТЭР и в обоснование создания стационарных термоядерных реакторов и гибридных систем на основе токамаков - источников термоядерных нейтронов (ТИН).
3. Разработка и создание демонстрационного гибридного реактора на базе токамака – термоядерного источника нейтронов для наработки топлива и демонстрации трансмутации ДВАО.
4. Создание и проведение исследований и испытаний эффективных и безопасных ядерных технологий и бланкетов различного типа для термоядерных реакторов и гибридных систем.
5. Проведение расчетно-теоретических работ и моделирования, разработка современных кодов в обоснование термоядерных реакторов и гибридных систем.
6. Разработка физических и технологических диагностик для термоядерной и гибридной энергетики.

7. Разработка и создание материалов радиационно-стойких, мало активируемых и сверхпроводниковых, адекватных требованиям термоядерной и гибридной энергетики.

8. Создание информационных технологий для термоядерной и гибридной энергетики.

На основе «Предложений» ИФТ РНЦ «КИ» разработал концепцию нового варианта модернизации токамака Т-15, основанной на использовании вытянутой диверторной конфигурации в камере с аспектом 2.2, удлинением до 1.9, «теплой» электромагнитной системой, мощными квазистационарными системами дополнительного нагрева и современной инженерной инфраструктурой. При этом ток в плазме должен достигать 2.0 МА при длительности 10 сек. На базе этой концепции НИИЭФА совместно с РНЦ «КИ» разработали технический проект токамака [35], получившего условное название Т-15МД, который был утвержден ГК «Росатом».

Токамак Т-15МД [36] представляет инновационную установку, с помощью которой будут исследованы наиболее актуальные проблемы ИТЭР, такие как, механизм формирования и поддержания транспортных барьеров, стационарная генерация неиндукционного тока, нагрев и удержание горячей плазмы, управление процессами на первой стенке и в диверторе, подавление глобальных неустойчивостей и периодических выбросов энергии на стенку и др. В качестве основы концепции термоядерного источника нейтронов, токамак Т-15МД будет использоваться как стенд, на котором будут отрабатываться такие подсистемы, как стационарные инжекторы нейтралов, испытываться материалы и технологии первой стенки, дивертора и др.

С 2011 г. по настоящее время в рамках выполнения ФЦП «ЯЭТНП» [1] проходит модернизация как самой электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15, так и модернизация всех технологических систем. Физический пуск токамака Т-15МД должен быть осуществлен в 2017 году в омическом режиме, а в 2018 ÷ 2021 гг. ввод систем дополнительного нагрева плазмы.

Целями диссертационной работы являлись:

1. Исследование электромагнитной системы первого в мире токамака T-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. 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.

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

Для достижения указанной цели 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 захлаживания, 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 СОТТ на гелиевом уровне и уровня электропотребления,

существенную экономию жидкого азота при прогреве на «захоленной» 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 СОТТ 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 СОТТ 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 катушки СОТП со стороны сильного магнитного поля.

6. Впервые экспериментально определены тепловые нагрузки на криогенную систему при различных температурах электромагнитной системы в режимах захлаживания, 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 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 токнесущей 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 «захоложенной» 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, данными аналогичных исследований на токамаках TORE-Supra, ITER, EAST, KSTAR, SST-1;
- документами о вводе в эксплуатацию и многолетней надежной работой 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 «захоленной» установке, при захолаживании, криостатировании и отопреве 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 (компактного токамака с дивертором);

- 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) [40], 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 в течение 5 секунд.

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, рекомендации по использованию результатов в будущих разработках, включая международный проект ИТЭР.

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.

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.

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, Хянно, 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 совещании 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.

Структура и объем работы

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.

Во введении обосновывается актуальность, определены цели и задачи исследования, научная новизна, достоверность и обоснованность полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено описание основных элементов электромагнитной системы и вакуумной камеры установки токамак Т-15 и результаты их предмонтажных испытаний. Предложены технические решения, направленные на повышение надежности и безаварийной работы установки во время эксплуатации.

Во второй главе дан анализ процессов захлаживания, криостатирования и отогрева электромагнитной системы. Определены тепловые потоки на азотный и гелиевый уровни.

В третьей главе приведены результаты исследования режимов кондиционирования вакуумной камеры и создания новой системы омического прогрева камеры.

Четвертая глава посвящена исследованиям первой в мире циркуляционной сверхпроводящей магнитной системы на основе ниобий - оловянного проводника. Исследована токонесущая способность СОТП в широком диапазоне температур, в т. ч. при наличии переменных магнитных полей во время работы с плазмой и выполнены расчетно-экспериментальные исследования СОТП при нарушении сверхпроводимости.

В пятой главе приводятся физические обоснования и проекты модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры с целью создания диверторных конфигураций плазменного шнура в поддержку проекта ИТЭР - установки Т-15М и Т-15Д.

В шестой главе дано обоснование необходимости сооружения диверторного токамака Т-15МД – концепции термоядерного источника нейтронов для гибридных систем. Приведены технические характеристики и результаты расчетов физических параметров установки, конструкция элементов электромагнитной системы и вакуумной камеры, изготовление которых будет завершено в 2015 году. Физический пуск установки предполагается осуществить в

2017 году, а оснащение установки дополнительными методами нагрева в 2018 - 2021 годах.

В заключении представлены основные результаты работы.

В процессе проведения предмонтажных испытаний отдельных элементов и узлов ЭМС Т-15, сборке и эксплуатации уникальной установки Т-15, модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры 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; 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.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА И ВАКУУМНАЯ КАМЕРА ТОКАМАКА Т-15. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СОЗДАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ

1.1. Цели и основные параметры токамака Т-15

Установка токамак Т-15 предназначена для получения и исследования плазмы с термоядерными параметрами и решения ряда инженерных задач, непосредственно связанных с созданием термоядерного реактора [38]. Токамак Т-15 представляет собой сложный инженерно-физический комплекс, оснащенный большим количеством физических и технологических диагностик.

Научно-технические цели Т-15 были сформулированы следующим образом:

- получение достаточно точной информации по физике высокотемпературной плазмы с термоядерными параметрами необходимой для проектирования опытного 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.

Уникальность установки, отличающая ее от других установок этого класса, состояла в наличии криогенной электромагнитной системы, содержащую, созданную впервые в мире, сверхпроводящую обмотку тороидального магнитного поля на основе интерметаллического соединения ниобий - олова (Nb_3Sn), установленную вместе с вакуумной камерой и криорезистивными полоидальными

обмотками в общем криостате. Токамак Т-15 представляет собой установку, наиболее близкую по конструкторской схеме к будущим термоядерным реакторам и сооружаемой в настоящее время установке ИТЭР.

Основные параметры токамака Т-15 в номинальном режиме (этап 1) и ожидаемые параметры в форсированном режиме (этап 2) приведены в таблице 1.1. Общий вид установки токамак Т-15 показан на рисунке 1.1.

Таблица 1.1 - Основные параметры установки Т-15

Параметр	1 этап	2 этап
Большой радиус плазмы, м	2.43	2.43
Малый радиус плазмы, м	0.7	0.7
Тороидальное магнитное поле на оси плазменного шнура, Тл	3.5	4.5 ÷ 5.0
Запасенная энергия в СОТП, МДж	~ 400	660÷815
Ток в плазме, МА	1.4	1.8 ÷ 2.3
Длительность импульса тока, с	5	5
Частота повторения импульсов, имп/час	10	6
Полное изменение потокосцепления индуктора, Вб	15	17
Мощность СВЧ-нагрева, МВт	4	6
Мощность инжекции нейтралов, МВт	5.5	8
Длительность импульса инжекции нейтралов, с	1.5	1.5

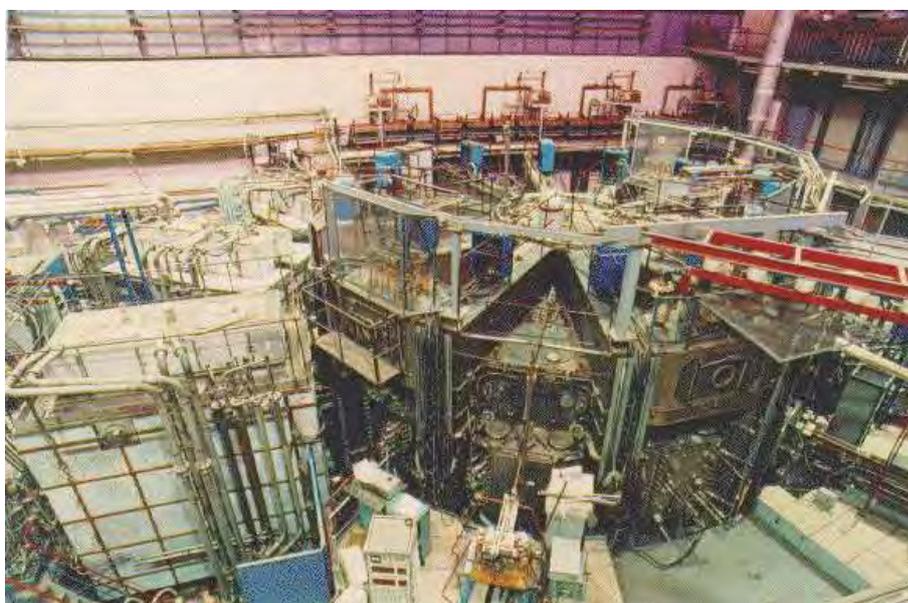


Рисунок 1.1 - Общий вид установки токамак Т-15

1.2 Электромагнитная система

Электромагнитная система (ЭМС) установки токамак Т-15 предназначена для генерирования тороидальных и полоидальных магнитных полей. ЭМС (рисунок 1.2) включает в себя замкнутый ферромагнитный двенадцатипольный магнитопровод из листовой электротехнической стали толщиной 0.5 мм, сверхпроводниковую 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) [38].

ЭМС вместе с расположенной внутри СОТП разрядной камерой размещены внутри общего вакуумноплотного кожуха (криостата). Для уменьшения тепловых потоков на СОТП, внутреннее пространство криостата откачивается до уровня $10^{-5} \div 10^{-6}$ Торр и между элементами, имеющими температуры $T = 4.5\text{К}$ и $T = 300\text{К}$ установлены радиационные экраны, охлаждаемые жидким азотом.

Элементы ЭМС, размещенные внутри криостата, поддерживаются в рабочем состоянии на различных температурных уровнях:

1. При температуре $T = 4.5\text{ К}$ – СОТП и опорная колонна.
2. При температуре $T = 80\text{ К}$ - ОИ, ОУ, ОВУП, ОГУП и азотные экраны.
3. При температуре $T = 300\text{ К}$ - магнитопровод, ОИН, разрядная камера и криостат.

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

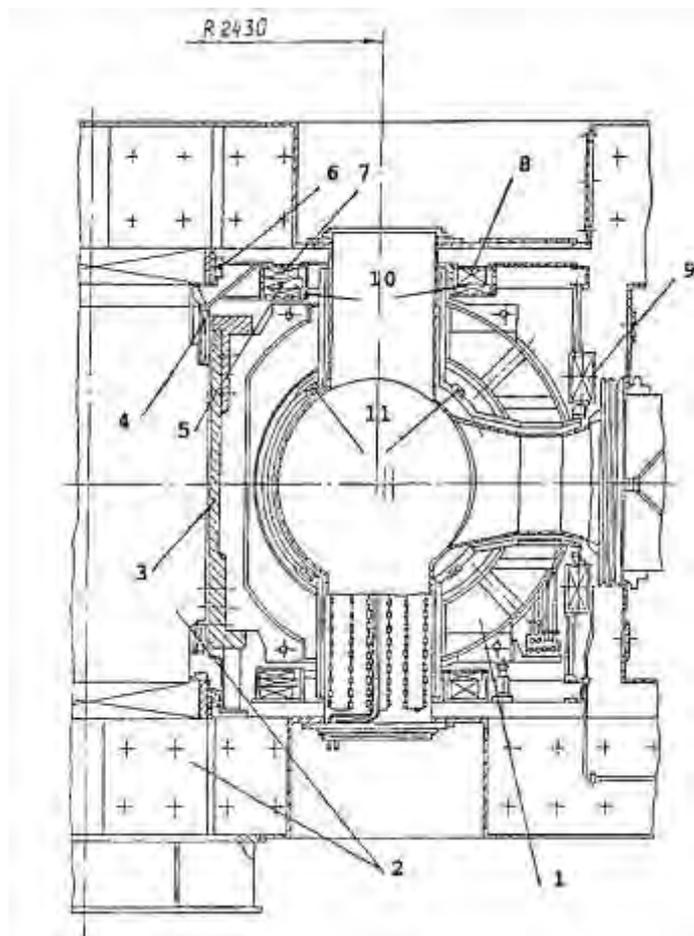


Рисунок 1.2 - Поперечное сечение ЭМС: 1 - катушка тороидального поля; 2 - железный магнитопровод; 3 - опорная колонна; 4,5 - обмотки индуктора, 6 - обмотка индукционного нагрева; 7,8,9 - обмотки управления равновесием и формой поперечного сечения плазмы; 10 - корректирующая обмотка горизонтального поля; 11 - корректирующая обмотка вертикального поля.

1.2.1. Сверхпроводящая обмотка тороидального поля

Выбор конструкции СОТТ Т-15 определялся следующими обстоятельствами [81]. Конструкция провода СОТТ с циркуляционным охлаждением должна была обеспечить запас стабильности сверхпроводящего состояния, как в рабочих режимах, так и при срыве тока плазмы. Должна была быть обеспечена электрическая прочность изоляции элементов СОТТ при защитном выводе энергии. Недостаток знаний при работе с многожильными термообработанными проводниками, на основе хрупкого соединения Nb_3Sn ,

отсутствие опыта создания сверхпроводящих магнитных систем по технологии «намотка-отжиг» в 70 - 80-х годах прошлого века, как у нас в стране, так и в мире, привело к безальтернативному решению по применению метода «отжиг-намотка» и отказу от создания наиболее перспективной конструкции катушек СОТП D - образной формы.

СОТП установки Т-15 [39,81] состоит из 24 круглых блоков средним диаметром 2.5 м, равномерно расположенных по окружности тора с диаметром по осям блоков 5 м (рисунок 1.3). Блок состоит из 2 катушек, размещенных в общем корпусе из нержавеющей стали. Каждая из катушек собрана из 3-х двухслойных секций галетного типа, имеющих общую корпусную изоляцию.

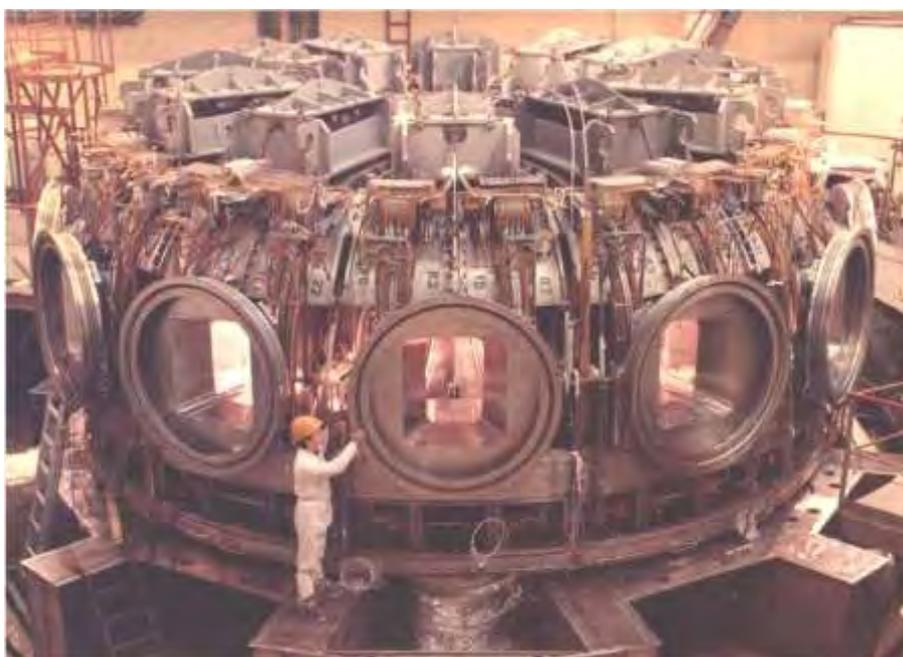


Рисунок 1.3 - Сверхпроводящая обмотка тороидального поля

Двухслойная секция изготовлена из 2-х кусков сверхпроводящего токнесущего элемента (СТНЭ)-2к, сечением 18 мм x 6.5 мм и длиной 340 мм каждый, намотанных спирально в 2 слоя по 38 витков в каждом. Число витков в катушке – 456. Электрический контакт между кусками СТНЭ выполнен пайкой на внутреннем радиусе. Электрически куски СТНЭ соединены последовательно. Каналы охлаждения имеют отводы с каждого конца куска и соединены

параллельно. Витковая изоляция выполнена двумя слоями стеклолаковой тканью ЛСТЛ-25 толщиной 0.12 мм, намотанными в пол - нахлеста.

Катушка комплектовалась из 3-х секций. Электрически секции соединялись между собой последовательно, пайкой на наружном диаметре катушки. Корпусная изоляция была выполнена восемью слоями стеклолакоткани ЛСНЛ-эк толщиной 0.12 мм, намотанными в пол - нахлеста, с суммарной толщиной корпусной электрической изоляции $2 \div 2.5$ мм. Катушка после наложения корпусной электрической изоляции опрессовывалась в технологическом приспособлении и запекалась в нем при температуре 160°C в течение 40 часов. После изготовления электрическая прочность витковой изоляции испытывалась напряжением 5 В на виток с частотой $f = 8$ кГц в течение 5 мин., корпусной изоляции - 6 кВ в течение 1 мин.

Блок СОТП (рисунок 1.4) состоял из силового корпуса, коробчатого сечения, изготовленного из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и 2-х катушек.

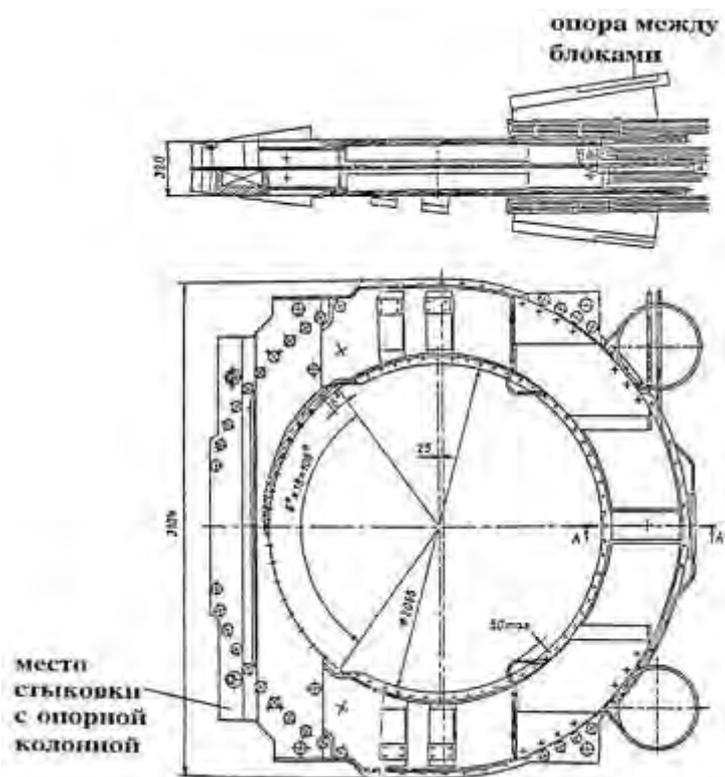


Рисунок 1.4 - Блок СОТП

Каждая катушка монтировалась в полукорпусе, расклинивалась по внешней и внутренней окружности относительно стенок корпуса клиньями из нержавеющей стали и закрывалась технологической крышкой. Затем весь объем полу-корпуса вакуумировался, после чего внутрь подавался криогенностойкий компаунд под давлением 0.5 МПа, который заполнял все пустоты. Процесс полимеризации длился при 100°C - 12 часов. Два полу-корпуса с расположенными в них катушками соединялись друг с другом через фланцы коническими штифтами. В стыке между полу - блоками дополнительно устанавливалась пластина из нержавеющей стали 12X18Н10Т толщиной 10 мм для увеличения жесткости блока.

Два блока СОТП были конструктивно связаны между собой в монтажный блок (рисунок 1.5), на котором была выполнена вся токовая и криогенная обвязка. Параллельные каналы охлаждения катушек, выходящие из корпуса через специальные пазы, подключались с помощью изоляторов к входным и выходным коллекторам. С их помощью сверхпроводящие катушки изолировались от внешней криогенной системы. Все изоляторные развязки на монтажном блоке подняты на верхнюю часть блока и сгруппированы в зоне, где на собранной установке к ним был обеспечен доступ сквозь люки в криостате и наружном азотном экране для обеспечения возможности их ремонта в случае появления течей.

Вместе с обвязкой монтажный блок проходил гидравлические, вакуумные, криогенные и токовые испытания. Затем в нем на специальном стапеле монтировалась секция разрядной камеры с внутренним азотным экраном и двумя катушками ОВУП. Так образовывался один из двенадцати сборочных модулей, которые затем передавались в монтаж на штатное место (рисунок 1.6).

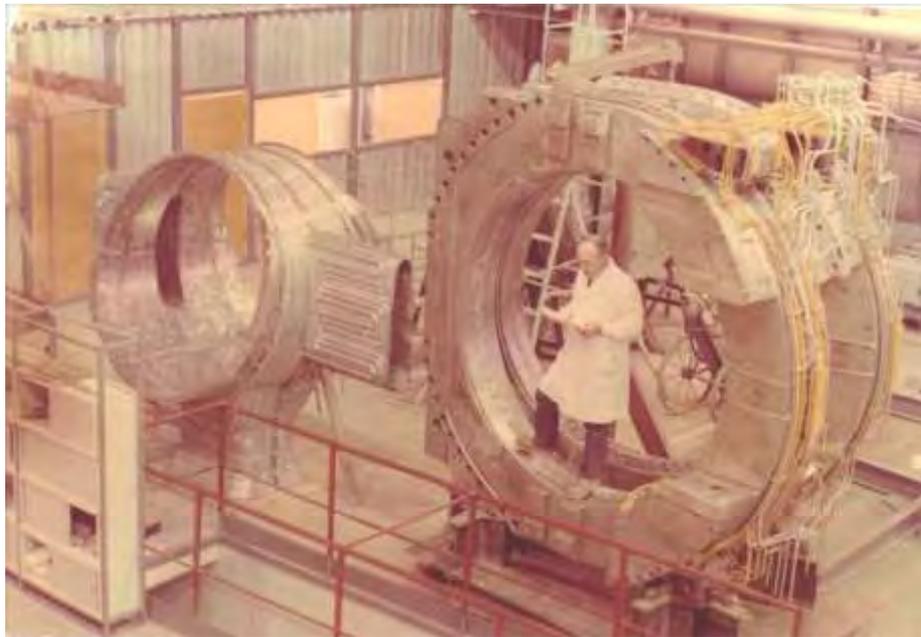


Рисунок 1.5 - Монтажный блок и 1/12 секция внутреннего азотного экрана

Дополнительно к монтажным блокам СОТП включала в себя общую криогенную и токовую обвязки, в том числе кольцевые коллекторы, токовые переключки, соединяющие блоки, и 4 пары шинопроводов длиной от 7 до 22 м, связывающих квадранты СОТП с 4 парами токовводов, размещенных в выносном блоке. Разбиение обмотки на 4 квадранта было связано с необходимостью уменьшения напряжения при защитном выводе энергии и предотвращения пробоя в случае ухудшения вакуума в криостате. Шинопроводы были выполнены из спаянных между собой двух шин, одна из которых шина с ниобий - оловянным сверхпроводником МКНО-2к сечением 18мм x 6.5мм и шины такой же конструкции, но со скруткой из медных проволок с жилами из NbTi.



Рисунок 1.6 - Сборочные модули и опорная колонна на штатном месте

Силовая структура СОТП обеспечивала восприятие электромагнитных сил взаимодействия тока тороидальных катушек с тороидальным и полоидальным магнитными полями.

В состав силовой структуры входили:

- а) опорная колонна;
- б) корпуса блоков и межблочные соединения;
- в) механическая опора для передачи веса охлаждаемой конструкции на теплые узлы.

24 блока СОТП располагались вокруг центральной опорной колонны (рисунок 1.6), которая воспринимала пондеромоторные усилия, направленные к центру установки (1200 т на блок в форсированном режиме), а также часть (примерно половину) опрокидывающих блоки моментов, возникающих при действии боковых пондеромоторных усилий от взаимодействия полоидального магнитного поля с током в тороидальных катушках. Другая часть опрокидывающих моментов (260 тм на блок) воспринималась верхним и нижним внешними кольцевыми блоками и связывающими их опорными башмаками.

Основные параметры СОПТ Т-15 приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Основные параметры СОПТ Т-15

Параметр	Величина, ном./форс. режим
Число блоков	24
Число витков в блоке	456
Диаметр тора по осям блоков, м	5
Внутренний диаметр блока, м	2.24
Индукция магнитного поля на радиусе $R=2.43$ м, Т	3.5/4.5
Максимальная индукция на обмотке, Т	6.5/8.4-9.3
Запасенная энергия, МДж	390/640-800
Рабочий ток, кА	3.9/4.5-5.6
Индуктивность обмотки, Гн	52
Время защитного вывода энергии, с	104
Напряжение вывода относительно земли, В	± 250
Рабочая температура, К	4.5
Ток срыва короткого образца (в поле 8 Т при $T=4.2$ К), кА	10
Гофрировка на внешней границе плазменного шнура, %	0.7
Охлаждение	циркуляционное

1.2.2. Опорная колонна

Опорная колонна (рисунок 1.7) выполнена из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т. Для уменьшения деформации сверхпроводящей обмотки опорная колонна имела стенку переменной толщины с утолщением на концах. Верхняя утолщенная часть выполнена съемной для обеспечения монтажа блоков обмотки поля с модулями разрядной камеры вертикальным способом. Внешняя поверхность опорной колонны имела электроизоляционное покрытие из компаундированной стеклоткани. Опорная колонна имела два электроизоляционных разъема вдоль образующей цилиндра, которые

фиксируются от продольного сдвига при закручивании от опрокидывающих моментов электроизолированными штифтами. На внутренней поверхности опорной колонны уложены 4 ветви змеевика из трубок нержавеющей стали, припаянные припоем ПОС-30.

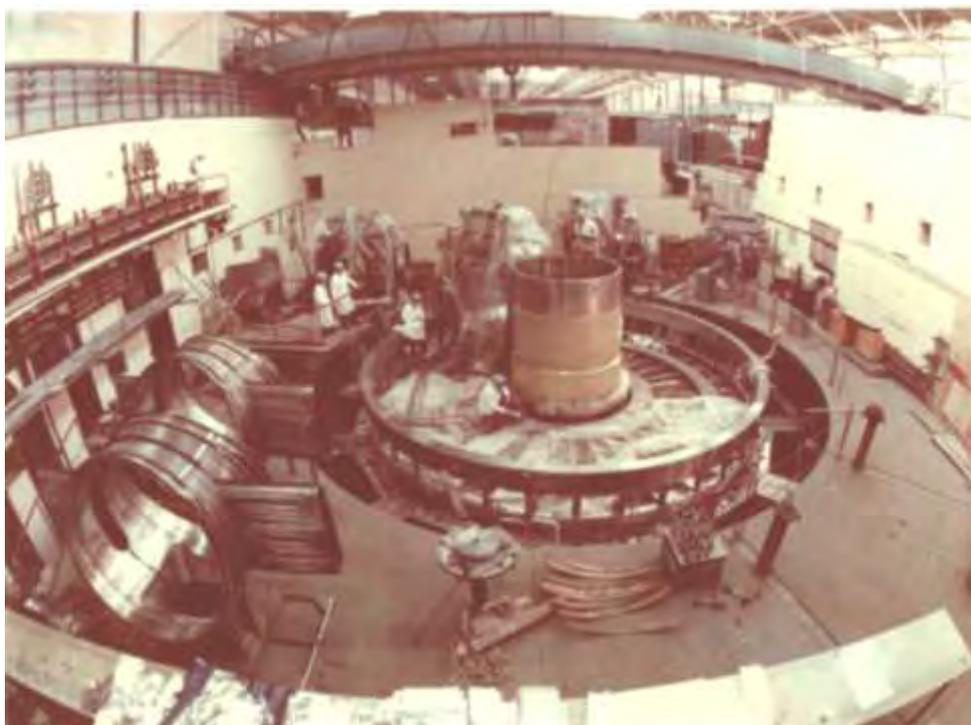


Рисунок 1.7 - Опорная колонна и катушки управления на штатном месте

1.2.3. Механическая опора

Опора, несущая весовую нагрузку СОТП, располагалась на площадке, образованной 12 - лучевой звездой нижних балок магнитопровода, покрытой стеклотекстолитовой плитой, установленной для увеличения теплоизоляции опоры от «теплых» конструкций. С целью фиксации вертикальной оси нижний фланец силовой опоры центрировался на малый центральный сердечник магнитопровода. Силовая опора сварена из листовой стали марки 12Х18Н10Т толщиной 4 мм. Для снижения теплопритока силовая опора имела радиационный экран, охлаждаемый жидким азотом. Для компенсации температурных

деформаций на нижнем конце силовой опоры имелся подпятник, состоящий из верхней и нижней обойм, в радиальных пазах которых были расположены цилиндрические ролики.

1.2.4. Блок криогенных и токовых вводов

Криогенные и токовые вводы (8 шт.) располагались в блоке криогенных и токовых вводов (БКГТВ), который располагался под установкой. Для охлаждения токовводов использовалась общая гелиевая ванна. Между токовводами и гелиевой ванной были введены изоляционные развязки.

Теплообменная часть токоввода с развитой поверхностью охлаждения представляла собой пучок из 110 медных трубок ($\varnothing 3.0$ мм, толщина стенки 0.5 мм) длиной 1015 мм. Погружаемая в гелиевую ванну нижняя часть токоввода представляла собой медную трубу диаметром 40 мм с толщиной стенки 6 мм, шунтированную сверхпроводником. Она соединялась с верхней частью токоввода посредством сварки, а ее нижний конец в виде полого стакана, заполненного жидким гелием, выходил из гелиевой ванны в вакуумное пространство блока криогенных и токовых коммуникаций для соединения с шинопроводом, идущим от СОТП. Испытания 12 токовводов показали, что максимальный теплоприток на единицу вводимого тока в диапазоне токов $5 \div 6$ кА составлял 2.5 Вт/кА.

Сбор газообразного гелия, выходящего из токоввода, осуществлялся с помощью гибких металлических шлангов, соединенных с верхними частями токовводов через изоляционные развязки. В верхней части токоввода имелось уплотнение для предотвращения утечки газообразного гелия из гелиевой ванны. Токовводы соединялись с гелиевой ванной через изоляторные блоки.

Блок токовводов имел независимо от установки теплоизоляционный вакуум. Шинопроводы и гелиевые коллектора, соединяющие блок токовводов с установкой, были пропущены через охлаждаемую жидким азотом разделительную диафрагму с помощью специальных электро- и теплоизолирующих узлов, состоящих из тонкостенных сильфонов и

керамических проходных изоляторов. Раздельный вакуум был предусмотрен для повышения надежности установки и обеспечения возможности ремонта и замены тоководов и собранной в блоке многочисленной гелиевой арматуры, обеспечивающей разные режимы охлаждения СОТП, а также наиболее ответственной технологической диагностики (входные параметры хладагента и главные потенциальные концы системы обнаружения нормальной фазы для защиты СОТП).

1.2.5. Полоидальная магнитная система

Полоидальная магнитная система обеспечивала начальную стадию формирования разряда, подъем и поддержание тока плазмы на заданном уровне, равновесие плазменного шнура в течение импульса, спад тока.

Полоидальная магнитная система включала обмотку индуктора, обмотки управления равновесием плазменного шнура (ОУ1, ОУ2, ОУ3), обмотку горизонтального управляющего поля (ОГУП), быстродействующую обмотку вертикального управляющего поля (ОВУП) и железный 12-ти яремный магнитопровод. Все элементы полоидальной магнитной системы расположены внутри криостата, в котором, в зависимости от технологического режима, поддерживалось давление на уровне $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па.

1.2.5.1. Индуктор

Обмотка индуктора для снижения рассеянных магнитных полей в области формирования плазмы разбита на три группы катушек – центральную, имеющую 46 витков, и две концевые, имеющие по четыре витка каждая. В качестве проводника использовалась алюминиевая шина с отверстием для циркуляции жидкого азота.

Центральная катушка выполнена в виде двухслойного соленоида. Соленоид намотан на жесткий цилиндрический каркас из алюминиевого сплава с двумя электрическими разъемами. Для усиления механической прочности соленоид

имел бандаж из стеклоленты. Обмотка индуктора располагалась в кольцевом зазоре между центральным сердечником и опорным цилиндром СОТП с температурами 300 К и 4.5 К. Поэтому, между ними были предусмотрены зазоры, выбранные с учетом тепловых деформаций конструкции при захолаживании и отогреве ЭМС.

Индуктор запитывался четырьмя тиристорными преобразователями.

Основные параметры индуктора приведены в Таблице 1.3. Монтаж индуктора на штатное место показан на рисунке 1.8.

Таблица 1.3 - Основные параметры индуктора

Параметр	ОИ1	ОИ2
Число катушек	1	2
Число витков в катушке	46	4
Максимальный ток, кА	80	80
Рабочее напряжение, кВ	1	
Размеры алюминиевого проводника, мм	2 (35x54 Ø26)	
Площадь поперечного сечения проводника, мм ²	2 x 1345 = 2690	
Омическое сопротивление обмотки при 80К, Ом	5.2·10 ⁻⁴	
Энергия, запасенная в магнитном поле при перемагничивании магнитопровода, МДж	18	
Перегрев обмотки, К	5	
Напряжение на обходе плазменного шнура, В	18	
Изменение магнитного потока при изменении тока в индукторе -80 кА+40 кА, В·с	14.8	
Масса алюминия, т	4	

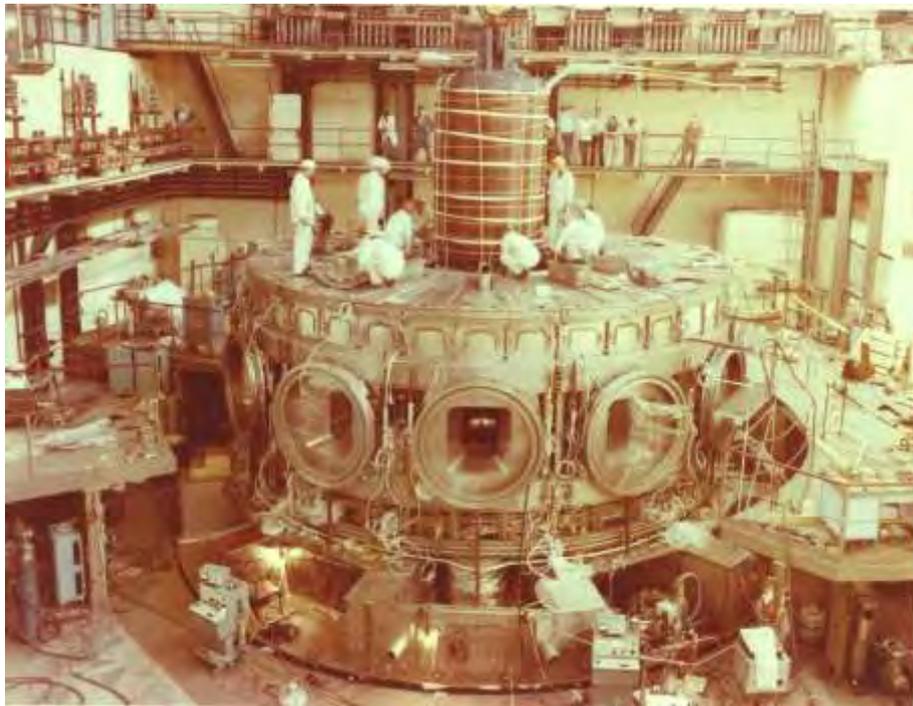


Рисунок 1.8 - Монтаж индуктора на штатное место

1.2.5.2. Полоидальные обмотки

1.2.5.2.1. Обмотки управления

Обмотки управления (ОУ) обеспечивали равновесие и форму поперечного сечения плазменного шнура в течение всего импульса. Они состояли из трех пар круговых катушек (ОУ1, ОУ2, ОУ3), изготовленных из алюминиевой шины с отверстием для циркуляции жидкого азота. Изменение токов в ОУ осуществлялось по программе и корректировалось системой с обратными связями.

Каждая из трех обмоток управления состояла из двух катушек, расположенных симметрично экваториальной плоскости установки. Витковая изоляция катушек – 4 слоя ленты ЛСНЛ вполнахлеста, с суммарной толщиной на сторону – 1мм. Корпусная изоляция катушек – 15 слоев ленты ЛСНЛ вполнахлеста, с суммарной толщиной на сторону – 3.5 мм. Все обмотки были уложены в каркасы из нержавеющей стали, являющиеся частями наружного

азотного экрана (НАЭ). Катушки соединялись по току последовательно, по хладагенту – параллельно. Жидкий азот подводился к обмоткам от блока азотных вводов. Токовводы обмоток располагались на верхней крышке криостата и соединялись с токоподводящими кабелями от системы питания через изоляционные узлы. Основные параметры ОУ приведены в Таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Основные параметры ОУ

Параметр	ОУ1	ОУ2	ОУ3
Число катушек в обмотке	2	2	2
Число витков в каждой катушке	22	16	18
Максимальный ток, кА	7	14	18
Испытательное напряжение, кВ	10	10	10
Рабочее напряжение, кВ	1	1	1
Размеры алюминиевого проводника, мм	(26x26 Ø12.5)	2(26x26 Ø12.5)	2(34x34. 5 Ø20)
Площадь поперечного сечения проводника, мм ²	548	1098	1700
Омическое сопротивление обмотки при 80К, мОм	3.2	2.2	2.1
Число параллельных ветвей по азоту	2	2	2
Вес обмотки, т	0.96	2.35	5.2

1.2.5.2.2. Обмотка вертикального управляющего поля

Обмотка вертикального управляющего поля (ОВУП) предназначена для подавления быстрых возмущений равновесного положения и формы с помощью системы обратных связей. ОВУП размещалась внутри СОТП между блоками и внутренним экраном. ОВУП состояла из двенадцати пар секций, установленных на секциях внутреннего азотного экрана (ВАЭ), сверху и снизу медианной плоскости. Секция ОВУП представляла собой однослойную пяти витковую

бескаркасную катушку, сделанную из медной шины сечением 13 мм x 30 мм с отверстием Ø 6 мм для циркуляции жидкого азота. Основные параметры ОВУП приведены в Таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Основные параметры ОВУП

Параметр	ОВУП
Число секций в обмотке	24
Число витков в секции	5
Максимальный ток, кА	7.2
Рабочее напряжение, кВ	5
Площадь поперечного сечения медного проводника, мм ²	358
Омическое сопротивление обмотки при 80 К, Ом	$5 \cdot 10^{-3}$
Число параллельных ветвей охлаждения	12
Вес обмотки, т	24 x 0.105

1.2.5.2.3. Обмотки горизонтального поля

Обмотки горизонтального поля (ОГУП) предназначены для коррекции горизонтальной компоненты магнитного поля. Каждая из двух обмоток ОГУП состояла из двух катушек, расположенных выше и ниже СОТП симметрично экваториальной плоскости установки. Катушки ОГУП намотаны алюминиевым полым проводником размером 26 x 26 мм² и отверстием для циркуляции хладагента Ø12.5 мм. Витковая и корпусная изоляция были выполнены лентой ЛСНЛ.

Все четыре катушки ОГУП соединялись по току последовательно, по хладагенту – параллельно. Концы обмоток посредством токовводов выводились через изоляторные узлы, расположенные на верхней крышке криостата. Основные параметры ОГУП приведены в Таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Основные параметры ОГУП

Параметр	ОГУП 1,2
Число секций в обмотке	4
Число витков в секции	20
Максимальный ток, кА	2.0
Рабочее напряжение, кВ	1.0
Площадь поперечного сечения медного проводника, мм ²	548
Омическое сопротивление обмотки при 80 К, мОм	8.3
Число параллельных ветвей охлаждения	1
Вес обмотки, т	0.86/1.44

1.2.5.2.4. Обмотка индукционного нагрева

Обмотка индукционного нагрева (ОИН) предназначена для индукционного прогрева сильфонов вакуумной камеры до $400 \div 450$ °С. ОИН состоит из двух катушек верхней и нижней, которые располагались на верхнем и нижнем сердечниках магнитопровода (рисунок 1.2, поз.6). Катушки ОИН намотаны алюминиевым полым проводником размером 34×34.5 мм² и отверстием для циркуляции воды $\varnothing 20$ мм. Соединение катушек по току и воде – последовательное. Частота питающего напряжения – 50 Гц. Основные параметры ОИН приведены в Таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Основные параметры ОИН

Параметр	ОИН
Число катушек в обмотке	2
Число витков в катушке	4
Размеры алюминиевого проводника, мм	(34x34.5 $\varnothing 20$)
Сопротивление обмотки при 300 К, мОм	22
Расход воды при $\Delta P = 1$ атм, м ³ /час	1.8
Масса катушки, кг	90

1.2.6. Магнитопровод

Магнитопровод предназначен для усиления индуктивной связи между индуктором и плазменным витком. Магнитопровод располагался внутри криостата и охватывал всю электромагнитную систему и вакуумную камеру. Конструктивно магнитопровод служил механической опорой для стенок криостата, нагруженных атмосферным давлением.

Магнитопровод состоял из следующих составных частей:

- центрального сердечника;
- верхнего и нижнего сердечников;
- 12-ти ярем, каждое из которых содержало верхнюю и нижнюю балки и стойку.

Центральный сердечник, балки и стойки магнитопровода склеены из листов электротехнической стали 3414 толщиной 0.5 мм эпоксидными лаками.

Технические данные магнитопровода приведены в Таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Технические данные магнитопровода

Параметр	Величина
Число ярем магнитопровода	12
Наружный диаметр центрального сердечника, м	1.72
Суммарная высота сердечников, м	3.82
Высота магнитопровода, м	5.77
Длина ярма магнитопровода, м	13.4
Размеры сечения ярма, м ²	0.56 x 0.99
Площадь сечения стали каждого ярма, м ²	0.45
Площадь сечения стали центрального сердечника, м ²	1.9
Масса магнитопровода, т	730

Монтаж магнитопровода на штатном месте показан на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 - Монтаж 12-ти яремного магнитопровода

1.2.7. Тепловые экраны

Тепловые экраны предназначены для уменьшения теплопритоков на СОТП как со стороны криостата, так и со стороны вакуумной камеры, для того, чтобы существенным образом понизить требуемую производительность криогенного оборудования, работающего на температурном уровне жидкого гелия.

1.2.7.1. Наружный азотный экран (НАЭ)

НАЭ (рисунок 1.8) предназначен для уменьшения теплопритока на СОТП со стороны магнитопровода и криостата. При захолаживании и отогреве ЭМС НАЭ охлаждался газообразным гелием, при криостатировании – жидким азотом.

Нижняя и верхняя части НАЭ образованы каркасами полоидальных обмоток ОУ1 и ОУ2, боковая поверхность - каркасами обмотки ОУ3. В каркасы

устанавливались листы (закрытия) из стали 12Х18Н10Т толщиной 3 мм на которых приварены трубки охлаждения. Листы крепились к кронштейнам каркасов болтовыми соединениями. Со стороны СОТП, для уменьшения теплопритоков, на закрытия была уложена многослойная экранно-вакуумная изоляция, обладающая низкой теплопроводностью. Во избежание ее возгорания при проведении сварочных работ, она закрывалась фольгой из нержавеющей стали. Вся поверхность НАЭ была разбита на шесть секторов, электрически развязанных между собой. Технические данные НАЭ приведены в Таблице 1.9.

Таблица 1.9 - Технические данные НАЭ

Параметр	Величина
Толщина закрытий, мм	3
Число секций экрана	6
Число параллельных ветвей хладагента	6
Масса (12Х18Н10Т), т	52.7

1.2.7.2. Внутренний азотный экран

Внутренний азотный экран (ВАЭ) предназначен для создания теплового барьера между вакуумной камерой и блоками СОТП при прогреве камеры как на «теплой» установке перед началом захолаживания, так и при прогреве на захолаженной ЭМС. При прогреве на «теплой» установке на ВАЭ поступала тепловая мощность порядка 300 кВт, которая отводилась циркулирующей по трубкам охлаждения водой. При прогреве на захолаженной установке, мощность, порядка 130 кВт (впоследствии 75 кВт), отводилась жидким азотом, циркулирующим по специально предназначенных для азота (газообразного гелия) трубкам, которые были проложены параллельно водяным трубкам.

ВАЭ, разделенный на 12 механически и электрически не связанных между собой секций, повторял конфигурацию вакуумной камеры (рисунок 1.5). Каждая секция экрана подвешивалась к блокам СОТП на 4-х кронштейнах (рисунок 1.6).

Основные параметры ВАЭ приведены в Таблице 1.10.

Таблица 1.10 - Основные параметры ВАЭ

Параметр	Величина
Толщина экрана, мм	2÷4
Число секций экрана	12
Число параллельных ветвей по воде	24
Число параллельных ветвей по азоту	48
Расход охлаждающей воды, м ³ /час	11

1.2.8. Вакуумная камера

Вакуумная камера (рисунок 1.10) являлась одним из основных узлов установки токамак Т-15 и предназначена для получения вакуумных условий, необходимых для получения, формирования и удержания плазмы с параметрами, приближающимися к термоядерным. Вакуумная камера вместе с электромагнитной системой размещена в вакуумном кожухе установки и выполняла следующие функции: обеспечивала условия для поддержания в рабочем объеме фонового давления $\sim 10^{-7}$ Торр; обеспечивала прямой доступ к плазме для осуществления ее нагрева и диагностики; обеспечивала доступ для контроля и ремонта размещенных в ней узлов и систем.

Вакуумная камера выполнена в традиционном для установок токамак решении, основанном на использовании 12-ти идентичных модулей, каждый из которых содержал силовую секцию и примыкающие к ней сифонные секции. Модули соединены между собой вакуумно-плотной сваркой в местах соединения сифонов. Силовые секции являются основными несущими элементами, которые воспринимают механические, температурные и электромагнитные нагрузки, действующие на камеру. Сифонные секции, входящие в состав модуля, обеспечивали требуемое электрическое сопротивление разрядной камеры, компенсировали осевые деформации при нагреве и улучшали условия ввода в рабочий объем быстрых управляемых магнитных полей.

Силовые секции камеры снабжены патрубками - двумя вертикальными и одним горизонтальным, к которым присоединялись внешние системы. Эти же патрубки использовались для крепления камеры к вакуумному кожуху (криостату) установки. Вертикальные патрубки крепились с помощью сварных овальных пластинчатых сильфонов, горизонтальный - с помощью формованного круглого сильфона.

Сильфоны воспринимали весовую и атмосферную нагрузки и электромагнитные силы, действующие на модуль камеры, компенсировали тепловые расширения при нагреве. Являясь тепловым сопротивлением, эти сильфоны способствовали более равномерному нагреву силовых секций камеры и позволяли применять эластомерные уплотнения для фланцевых соединений камеры с вакуумным кожухом. Продолжением горизонтальных патрубков силовых секций с внешней стороны вакуумного кожуха являлись навесные патрубки, на которых размещалось технологическое и диагностическое оборудование и через которые производилась откачка камеры высоковакуумными турбомолекулярными насосами.

Внутренняя поверхность сильфонных секций камеры защищена экранами из нержавеющей стали (432 шт.), закрепленными на охлаждаемых водой фланцах силовых секций модулей. Экраны предохраняли сильфоны от воздействия плазмы.

Для локализации взаимодействия плазмы со стенкой в четырех сечениях камеры установлены подвижные ограничительные диафрагмы с пределами регулирования радиуса плазменного шнура $480 \div 700$ мм. Рабочими элементами диафрагм являлись графитовые элементы, которые имели профилированную поверхность, обращенную к плазме, и закреплялись на поверхности из нержавеющей стали охлаждаемой водой. Для выравнивания распределения энергии по площади пластин предусмотрена возможность изменения угла наклона их по отношению к экваториальной плоскости камеры.

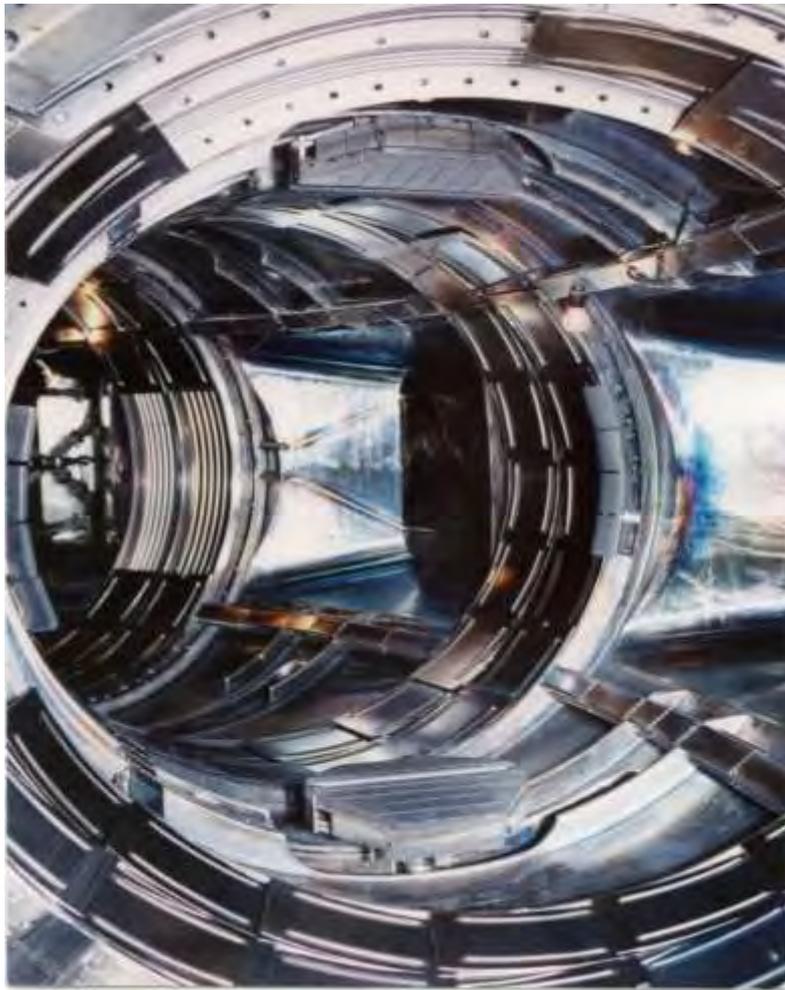


Рисунок 1.10 - Вакуумная камера – вид изнутри

Дополнительной защитой стенки камеры от пучков ускоренных электронов и выброса плазмы являлись кольцевые неподвижные графитовые диафрагмы. Диафрагмы размещались в двух противоположных сечениях камеры, каждая из которых состояла из 32 одинаковых элементов, образующих кольцо с радиусом 700 мм. Отвод тепла от неподвижных диафрагм осуществлялся теплопроводностью к охлаждаемому водой фланцу.

Контроль температуры экранов, подвижных и неподвижных диафрагм осуществлялся термопарами.

Внутри вакуумной камеры размещались датчики электромагнитной диагностики, входящие в систему управления положения плазменного шнура и

стабилизации тока плазмы. Основные параметры вакуумной камеры приведены в Таблице 1.11.

Таблица 1.11 - Основные параметры вакуумной камеры

Параметр	Величина
Большой радиус, м	2.43
Малый радиус, м: по стенке модуля камеры	0.825
по внутренним гофрам сильфона	0.8
по экранам	0.755
по неподвижным диафрагмам	0.7
Объем разрядной камеры, м ³	65
Площадь поверхности, обращенной в рабочий объем камеры, м ²	200
Толщина стенки модуля разрядной камеры, мм:	
тороидальной части и горизонтальных патрубков	10
вертикальных патрубков	20
стенки сильфона	1.2
Масса разрядной камеры (вместе с навесными патрубками), т	45
Материал разрядной камеры	сталь 12X18H10T

1.2.9. Криостат

Криостат предназначен для создания теплоизоляционного вакуумного объема, внутри которого размещены электромагнитная система, вакуумная камера и тепловые экраны, находящиеся при различных температурах (от 4К до 500К).

Конструкция криостата состояла из дна, 12-ти нижних и 12-ти верхних секторов, 12 стенок и крышки. Нижние сектора сваривались друг с другом и с дном с помощью двойных швов, выполненных аргоно - дуговой сваркой. Крышка криостата и верхние сектора сваривались между собой усиковыми швами, что давало возможность, в случае необходимости легко демонтировать их.

Для предотвращения разрушения криостата избыточным внутренним давлением, при разрыве криогенных коммуникаций, были установлены предохранительные мембраны с порогом срабатывания 0.2 ати и дополнительно предохранительный клапан с уровнем срабатывания 0.1 ати. Кроме того, все усиковые швы были усилены специальными скобами. Во всех секторах и стенках имелись люки для доступа персонала к элементам ЭМС. В четырех верхних секторах размещались отверстия для размещения токовводов. Технические данные криостата приведены в Таблице 1.12.

Таблица 1.12 - Технические данные криостата

Параметр	Величина
Наружный диаметр, м	10.8
Высота, м	5.86
Внутренний объем, м ³	350
Материал	12X18H10T
Внутреннее рабочее давление, Торр	$10^{-5} \div 10^{-6}$
Допустимое максимальное внутреннее давление, ати	0.2
Масса, т	122

1.3. Результаты предмонтажных испытаний

С 1986 г. проводились испытания отдельных узлов Т-15 с последующими (в 1988 г.) испытаниями на полностью собранной установке. Эти испытания проводились в соответствии со специальными программами, совместно разработанными сотрудниками НИИЭФА и ИАЭ.

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.

В данном разделе приведены результаты испытаний основных элементов ЭМС и вакуумной камеры установки Т-15 [40,41,42,43].

1.3.1. Испытания блоков СОТП

Рабочий блок СОТП показан на Рисунке 1.5. Испытания рабочих блоков СОТП проводились на стенде СИМС, в состав которого входили рефрижератор - ожижитель суммарной производительностью 1.5 кВт на уровне 4.5К; универсальный испытательный криостат диаметром 4 м и высотой 12 м; система вакуумного обеспечения; система электропитания и защиты; система автоматического сбора и обработки информации. Результаты испытаний рабочих блоков подробно изложены в [42, 81].

В процессе испытаний в диапазоне температур 300 К ÷ 4.5 К проверялись:

- гидравлические характеристики блоков;
- герметичность криогенных коммуникаций;
- электрическая прочность изоляции;
- работоспособность штатной диагностики, установленной на блоках и подводящих коммуникациях;
- токонесущая способность сверхпроводящих катушек при $T = 4.5 \div 5$ К.

Кроме того, были проведены измерения внешних теплопритоков, внутренних тепловыделений при запитке блоков током. Изучено поведение блоков при защитном выводе энергии.

Были испытаны 26 блоков. Ни в одном из них не было обнаружено отклонений по гидравлическому сопротивлению, электрической прочности и вакуумной плотности. При токовых испытаниях каждый рабочий блок запитывался по отдельности, а испытательный ток был ограничен величиной 6.9 кА. При таком значении тока по параметру ($I \times V$) достигались условия, превосходящие условия номинального режима работы установки ($I_{\text{ном}} = 3.9$ кА; $V_{\text{Тном}} = 6.4$ Тл; $I \times V_{\text{T}} = 25$ кА х Тл) в 1.3 раза, как в центральных, так и в крайних галетах блока; имитировались соответствующие форсированному режиму работы ($I = 5.9$ кА, $V_{\text{T}} = 9$ Тл) условия тепловыделений в спаях и других местах с нарушенной сверхпроводимостью по параметру $I^2 \cdot \rho(T, V) / S_c$, а максимальная удельная механическая нагрузка, отрывающая блок от корпуса, не превышала предела текучести обмотки ($\rho(T, V)$ - удельная электропроводность, S_c - площадь сечения сверхпроводника).

В 22 блоках значение тока 6.9 кА без перевода в нормальное состояние было достигнуто при первых испытаниях. В двух блоках номинальный испытательный ток был достигнут при повторных испытаниях, после замены обнаруженных дефектных катушек.

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 (рисунок 1.11). Такое поведение блоков, изготовленных по методике «отжиг – намотка» было связано, по всей вероятности, дефектами проводника, возникшими в процессе его изготовления и намотки.

Проведенные на основе экспериментальных данных оценки показали, что дополнительное суммарное тепловыделение в блоках СОТП, связанное с резистивностью, может составить в номинальном режиме работы установки от 200 Вт до 400 Вт. Стационарный теплоприток на СОТП, измеренный в режиме криостатирования, в пересчете на всю систему, составлял 1100 Вт при давлении $1.0 \cdot 10^{-5}$ Торр, что примерно в 2 раза превышало расчетную величину.

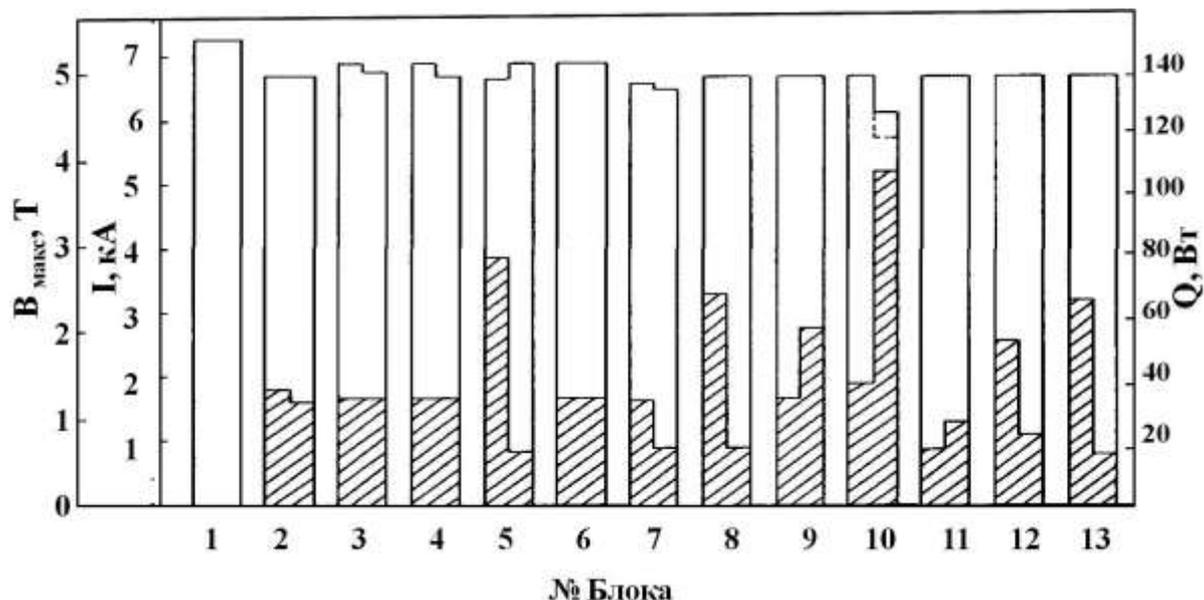


Рисунок 1.11 - Результаты испытаний рабочих блоков СОТП [42]: I – ток, заведенный в блок; Q – мощность джоулевого тепловыделения в каждом из 26 блоков (показана штриховкой).

Каждый из рабочих блоков в процессе испытаний, для проверки его поведения при защитном выводе энергии, разряжался с постоянной времени $\tau = 15 \div 17$ с. При защитном выводе энергии, с одновременной потерей вакуума, имели место случаи электрического пробоя и загорания дуги между подводящими коммуникациями, находящимися под напряжением, и заземленными элементами конструкции. Во всех таких случаях (нарушения нормального режима испытаний) блоки были ремонтоспособны, так как происходило частичное разрушение и выгорание лишь наружных коммуникаций.

1.3.2. Испытания опорной колонны

Испытания опорной колонны [40] проводились в специальной барокамере объемом 120 м^3 , в которой можно было моделировать условия токамака Т-15: давление в криостате $1.0 \cdot 10^{-6}$ Торр и температура хладагента 80 К. Целями испытаний являлись проверка механической прочности и вакуумной

герметичности змеевиков охлаждения в «теплом» и захлажденном состоянии, а также определение расходных характеристик и степени деформации опорной колонны в захлажденном состоянии.

Вакуумная герметичность змеевиков контролировалась двумя методами: методом обдувания гелием поверхности трубок охлаждения и методом избыточного давления, т.е. когда в трубки охлаждения напускался гелий под давлением 32 атм. В первом случае проводилась откачка трубок охлаждения, во втором — откачка барокамеры до давления ниже $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

В процессе испытаний не было выявлено вакуумных негерметичностей (течей) в трубках охлаждения.

Термоциклирование опорной колонны (ОК) проводилось с опорным цилиндром (ОЦ), который сверху одевался на ОК. При испытаниях на термоциклирование змеевики охлаждения были только на ОК, а на ОЦ они отсутствовали. Механическая связь между ОК и ОЦ при их совместном захлаживании обеспечивалась затянутыми шпильками. Процесс термоциклирования представлял собой трехкратное захлаживание до температуры жидкого азота (80 К) и отогрев до комнатной температуры (300 К). Охлаждение и отогрев производились газообразным гелием. Контроль режимов захлаживания и отогрева проводился с помощью термодатчиков, расположенных на поверхности ОК. Имелось также два термодатчика, расположенных на входном и выходном коллекторах системы охлаждения.

Целью испытаний, наряду с проверкой прочности, герметичности каналов охлаждения и электрической прочности изоляции разъема ОК в «теплом» и «холодном» состоянии, было измерение распределения температур по поверхности ОК и ОЦ в режиме захлаживания с заданным градиентом температур между входом и выходом хладагента из каналов охлаждения. Кроме того, в процессе испытаний проводилось измерение изменения радиального зазора между имитатором обмотки индуктора и внутренней стенкой ОК.

Захлаживание проводилось с контролем допустимой разности температур потока гелия на входе и выходе его из объекта $T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}} \leq 50$ К. Скорость

понижения температуры гелия на входе в ОЦ в процессе захолаживания не должна была превышать $2.5 \div 3$ К/ч при расходе гелия до 28 г/с (100 кг/ч). При появившейся возможности увеличения расхода до 60 г/с скорость понижения температуры гелия в процессе испытаний была увеличена.

Измерения изменения радиального зазора между имитатором индуктора и внутренней стенкой ОК проводились с помощью 12 датчиков дискретного типа (восемь из них имели разрешающую способность 0.5 мм, а четыре - 1.0 мм).

Режим захолаживания считался законченным при достижении температуры на выходе потока гелия из каналов охлаждения ОЦ $90\text{К} \div 100\text{К}$.

Режим отогрева ОК и ОЦ осуществлялся без циркуляции газообразного гелия по каналам охлаждения ОК путем напуска сухого азота в объем барокамеры.

При достижении стационарного температурного состояния, когда показания датчиков температур практически не изменялись, при расходе гелия ~ 60 г/с перепад температур гелия на входе в охлаждающий канал и выходе из него составил ~ 7 К. Это соответствовало величине теплопритока от барокамеры к поверхности ОК около 2.2 кВт.

По результатам испытаний ОК в сборке и ОЦ были сделаны следующие выводы:

1. Общее время захолаживания ОК (при расходе гелия ~ 200 кг/ч) составило ~ 60 ч; режим захолаживания считался законченным при достижении температуры на выходе потока гелия из змеевиков охлаждения $T_{\text{вых}} = 90\text{К} \div 100\text{К}$. Распределение температуры по поверхности ОК после окончания процесса захолаживания было в пределах $T_{\text{ОК}} = 105 \pm 10\text{К}$, а по поверхности ОЦ в пределах $T_{\text{ОЦ}} = 250 \pm 10\text{К}$.
2. Максимальное изменение радиального зазора между имитатором и внутренней стенкой ОК составило 3.5 мм.
3. Максимальный перепад температур охлаждаемой ОК относительно входной температуры $T_{\text{вх}}$ охлаждающего гелия составлял 60К; минимальный перепад температур охлаждаемой ОК относительно $T_{\text{вх}}$ равнялся 45 К.

4. Максимальный поперечный перепад температур по толщине стенки ОК составлял ~ 30 К, минимальный - 21.5 К.

После завершения предмонтажных испытаний для снижения температуры на верхнюю торцевую поверхность ОЦ был приварен змеевик охлаждения. Результаты испытаний были признаны удовлетворительными и ОК в сборке с ОЦ была передана в монтаж.

1.3.3. Испытания обмотки индуктора

Методика проведения вакуумных испытаний обмотки индуктора (ОИ) была аналогична той, что и при испытаниях опорной колонны. В процессе испытаний не было обнаружено вакуумных негерметичностей. «Холодные» испытания 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, что предусматривала программа испытаний, 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. На рисунке 1.12 показано стационарное распределение температуры по поверхности индуктора после окончания охлаждения. Сильная неравномерность распределения на наружной поверхности, по-видимому, была связана с немонолитностью изоляции и банджа. С точки зрения теплообмена это допустимо, так как обмотка индуктора устанавливается внутри опорной колонны, имеющей температуру жидкого гелия, и в штатном режиме после захолаживания неравномерность должна уменьшиться.

Электрические испытания ОИ проводились как в «теплом», так и в захолаженном состоянии. Витковая изоляция испытывалась методом колебательного контура с напряжением 250 В на виток.

Минимальное остаточное давление в барокамере составляло $P = 8 \cdot 10^{-6}$ Торр (при температуре ОИ в конце процесса захлаживания $T_{\text{ОИ}} = 100$ К) и $2 \cdot 10^{-4}$ Торр (при температуре ОИ $T_{\text{ОИ}} \approx 290$ К).

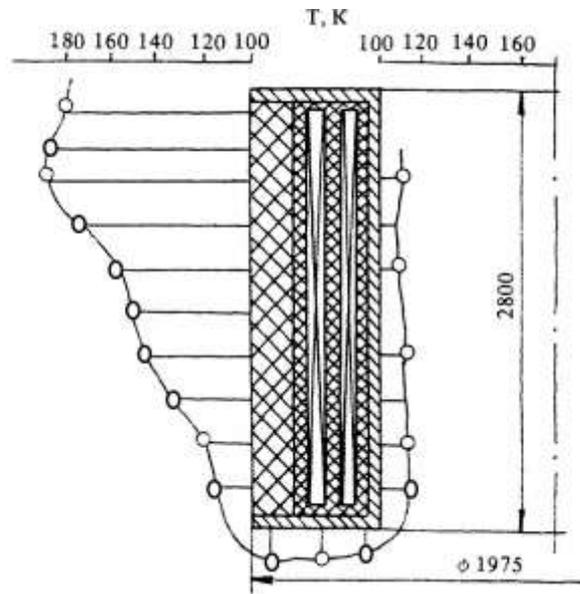


Рисунок 1.12 - Распределение температуры по поверхности ОИ после окончания процесса захлаживания

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.

Во время испытаний при атмосферном давлении в барокамере не было обнаружено нарушения электрической прочности изоляции ($U_{\text{исп.}} = 23$ кВ), причем на выводной конец обмотки подавалась как положительная, так и отрицательная полярность.

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, состава остаточного газа (атмосферного воздуха или гелия) и от полярности напряжения (рисунок 1.13). Визуализация пробоя осуществлялась через смотровые окна в стенках барокамеры. Величина вакуума в барокамере, как отмечалось, зависела от температуры обмотки индуктора. Испытания в гелии проводились с целью приближения к штатному режиму работы установки Т-15, так как при температуре объектов $5\text{K} \div 20\text{K}$ вакуум в криостате Т-15 определяется в основном именно количеством гелия в нем.

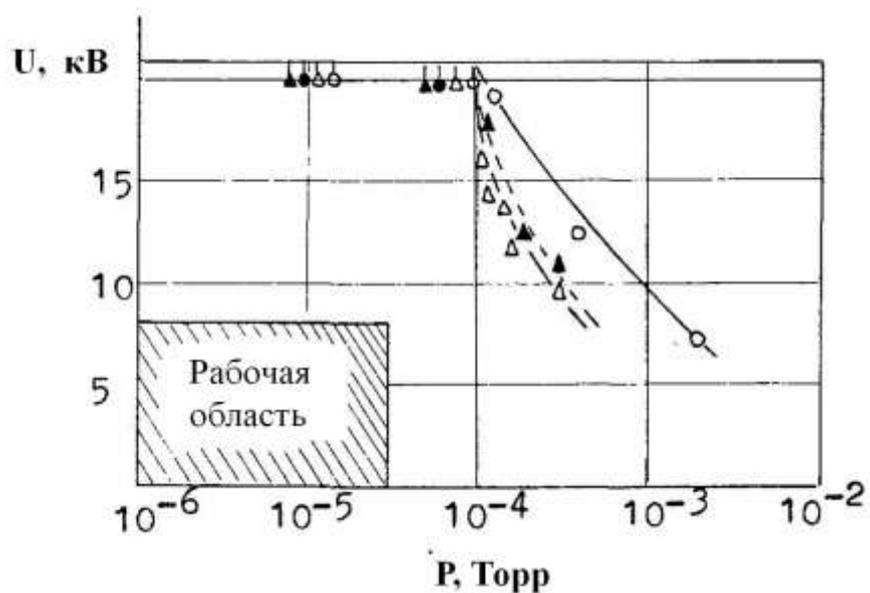


Рисунок 1.13 – Зависимость величины пробивного напряжения изоляции от давления в барокамере [40]: о, Δ – воздух; ●, ▲ – гелий; Δ, ▲ – положительная полярность; о, ● – отрицательная полярность; символами со стрелочкой ↑ даны значения напряжений, при которых электрической пробой отсутствовал

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 (немонолитной) корпусной изоляции выводных шин обмотки индуктора не превышала $U_{\text{макс}} \approx 8$ кВ.

Кроме того, необходимо заметить, что даже в нормальных условиях (т.е. при $P \leq 2 \cdot 10^{-5}$ Торр), величина пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ может быть еще ниже из-за влияния магнитного поля тока, протекающего по тоководам. При наличии этого магнитного поля эффективная длина пути электронов от одного электрода к другому может быть больше геометрического расстояния между электродами, что и может привести к снижению $U_{\text{пр}}$. Для объяснения наблюдающихся закономерностей зависимости U (P), в частности существенного влияния полярности напряжения на величину $U_{\text{пр}}$, можно было сделать предположения, а именно: влияние полярности на величину $U_{\text{пр}}$ 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. Это обстоятельство и могло способствовать развитию пробоя.

Из результатов электрических испытаний корпусной изоляции ОИ позволили сформулировать следующие конкретные требования к эксплуатации обмоток ОИ и обмоток ОУ1, ОУ2, ОУ3:

- рабочее напряжение, подаваемое на ОИ, ОУ1- ОУ3 и на ОВУП, не должно превышать $U_{\text{раб. макс.}} \leq 4$ кВ ;

- необходимо ввести в систему управления блокировку по давлению в криостате, т.е. запрет на подачу рабочих напряжений на обмотки, если величина давления в криостате превосходит максимальное допустимое значение $P_{\text{макс.}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Торр;

- в результате последующих дополнительных исследований вакуумной прочности корпусной изоляции (в условиях, имитирующих условия в криостате Т-15 по давлению, массовому составу остаточного газа, температуре, конфигурации и величине магнитных полей и т.д.) необходимо выдать

обоснованные рекомендации по разработке и созданию надежной изоляции выводных шин токовводов полоидальных обмоток, обеспечивающих работу в номинальном режиме (рабочее напряжение < 8 кВ; испытательное напряжение $U_{\text{исп}} < \pm 19$ кВ).

Обоснованность в необходимости создания надежной изоляции в конструкциях сверхпроводящих магнитных систем с принудительным охлаждением доказали испытания и эксплуатация последующего поколения токамаков, в которых электрические пробои имели место: HT-7, EAST (КНР), KSTAR (Корея), SST-1 (Индия) [44, 45, 46, 47].

Одним из возможных путей снижения вероятности пробоя при ухудшении вакуума является приближение нулевого потенциала (потенциала земли) к изолированным токоведущим частям, т.е. уменьшению расстояния и, как следствие, к повышению величины пробивного напряжения согласно левой ветви кривой Пашена. Такой подход был реализован сначала на установке T-15 путем обмотки фольгой поверхности изолированных шинопроводов СОТП, а затем на токамаке EAST [45].

1.3.4. Испытания секций внутреннего азотного экрана с катушками вертикального управляющего поля

Были испытаны 12 секций внутреннего азотного экрана (ВАЭ). На каждой секции были смонтированы по две секции обмотки вертикального управляющего ноля (ОВУП), Кроме этих 24 секций ОВУП дополнительно было испытано еще шесть секций ОВУП.

При вакуумных испытаниях змеевиков охлаждения всех 12 секций ВАЭ было обнаружено лишь шесть течей - в районах крепления скобками трубок охлаждения к корпусам ВАЭ. Причинами течей являлись дефекты, возникшие, по-видимому, в результате прожогов при сварке. После замены выявленных дефектных участков трубок других вакуумных негерметичностей не было обнаружено.

«Холодные» испытания предусматривали трехкратное термоциклирование секций ВАЭ совместно с секциями ОВУП газообразным гелием. Температура поверхности каждой секции ВАЭ контролировалась шестью термодатчиками, а температура катушек ОВУП - термодатчиками, установленными на входе и выходе хладагента.

Время захлаживания секции ВАЭ (т.е. установления минимальной температуры) составляло $12 \div 15$ ч при расходе гелия $70 \div 60$ кг/ч. При входной температуре гелия 90 К температура поверхности ВАЭ составляла $100 \div 120$ К.

Термоциклирование прошли 12 секций ВАЭ и 30 катушек ОВУП. После проведения «холодных» испытаний проверялась электрическая прочность изоляции катушек ОВУП: с помощью колебательного контура - витковая изоляция, 125 В /виток; корпусная изоляция - напряжением 8 кВ, которое подавалось на один из концов катушки относительно корпуса ВАЭ. После всех испытаний секции ВАЭ и катушки ОВУП были признаны годными для монтажа на установке.

1.3.5. Испытания секций наружного азотного экрана

Испытания секций наружного азотного экрана (НАЭ) предусматривали вакуумные испытания трубок охлаждения секций НАЭ, а также исследование распределения температур по их поверхности в захлажденном 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. Для выяснения причин возникновения течей были привлечены из нескольких организаций высококвалифицированные металловеды и специалисты в области сварки и пайки.

Проведенный во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара металловедческий анализ показал следующие причины возникновения вакуумной негерметичности трубок

охлаждения:

- в сравнительно малом числе случаев (10 ÷ 15% общего количества обнаруженных течей) это дефекты сварки и прожоги;

- в большинстве случаев это трещины, распространяющиеся с поверхности трубок вглубь и имеющие по своему виду межкристаллитный характер и пористую структуру; аналогичные дефекты наблюдались и в трубках охлаждения корпусов блоков СОТШ.

Указанные трещины наблюдались только со стороны пайки. К числу вероятных причин образования трещин, связанных с межкристаллитной коррозией, были отнесены следующие:

- растрескивание в контакте с расплавленным припоем;
- коррозия под действием механических напряжений; водородная хрупкость.

Характер дефектов означал, что имелась большая вероятность образования с течением времени в охлаждаемых трубках новых течей. Это в конечном итоге могло привести к неработоспособности установки.

Для обеспечения надежной работы установки было принято решение об изменении технологии крепления всех трубок охлаждения на секциях НАЭ и использовании вместо пайки сварного соединения. Такое решение было принято в результате предположения, что основной причиной возникновения трещин являются дефекты, связанные именно с пайкой и ее технологией (действие расплавленного припоя; коррозия под действием веществ, используемых при очистке и травлении припаиваемых поверхностей, и т.п.).

После замены трубок и изменения технологии крепления их к секциям НАЭ (сварное соединение вместо паяного) 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 захолаживания. Процесс захолаживания считался законченным после того, как на выходе из

змеевика охлаждения температура гелия достигала некоторого установившегося минимального уровня. В данных экспериментах варьировались:

- конструктивно различные типы секций НАЭ;
- виды присоединения змеевика охлаждения к поверхности секции НАЭ (пайка сплошным по длине швом или сварка прерывистым, «шахматным» швом);
- расход хладагента: от 15 кг/ч до 200 кг/ч;
- моделировались окружающие условия для секций НАЭ применительно к штатным условиям работы Т-15 путем установки в барокамере соответствующих дополнительных экранов, окружающих НАЭ.

Пример распределения температур по поверхности секции НАЭ представлен на рисунке 1.14.

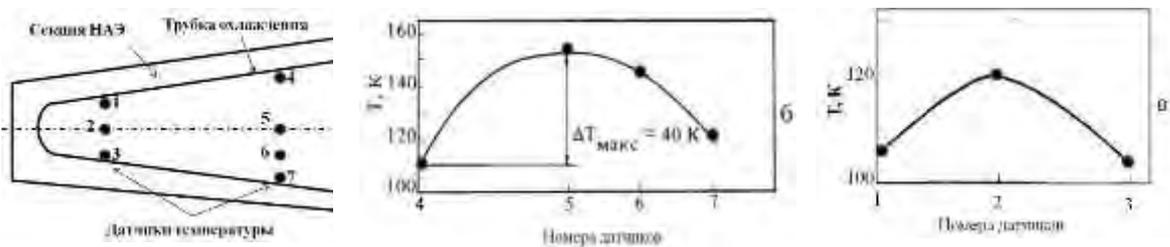


Рисунок 1.14 - Секция НАЭ с расположением температурных датчиков 1-7 (а);
распределение температур по поверхности секции НАЭ (б,в)

Из проведенных экспериментов следовало [43]:

- установившееся после захолаживания в барокамере распределение температуры по поверхностям секций НАЭ является неравномерным; степень неравномерности $\eta = (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}) / T_{\text{мин}}$ зависело от многих факторов (геометрические размеры секций, величина расхода хладагента, наличие или отсутствие в барокамере дополнительного экранирования секций НАЭ и т.п.) и в условиях данных экспериментов варьировалась в пределах $\eta_{\text{мин}} \sim 20\%$ (рисунок 1.14.в) до $\eta_{\text{макс}} \sim 110\%$ (рисунок 1.14.б);
- вид присоединения змеевика к поверхности секции НАЭ (пайка или

сварка) не влиял существенным образом на величину и распределение установившихся температур.

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. Со стороны нижнего блока обмоток была положена изоляция, состоящая из 20 слоев рифленых алюминированных пленок с прокладками из стекловуали, со стороны среднего пояса наружного азотного экрана и верхнего блока обмоток - из 10-слойной гладкой односторонне алюминированной лавсановой пленки с прокладками из стекловуали. Для уменьшения вероятности возгорания в процессе монтажа установки изоляция дополнительно закрывалась нержавеющей фольгой.

1.3.6. Испытания подставки опорной колонны

Подставка опорной колонны установки Т-15 является важной частью электромагнитной системы (ЭМС), основная функция которой - теплоизоляция опорной колонны. Опора подвижная в азимутальном направлении, принимающая на себя полный вес ЭМС ($P = 300$ т) установки Т-15.

Целью испытаний подставки было:

- определение напряженно-деформированного состояния под нагрузкой;
- испытание механической прочности и вакуумной герметичности змеевиков охлаждения.

Определение напряженно-деформированного состояния подставки под нагрузкой было проведено в НИИЭФА. Для определения напряжений, на внутренней и наружной поверхностях подставки устанавливались 66 тензорезисторов типа КФ-4 на клее циакрин ЭО.

Нагрузка создавалась поочередно на каждом полукольце подставки с помощью 12 струбцин, стянутых шпильками. Струбцины устанавливались в

местах расположения радиальных ребер. Величина нагрузки контролировалась тензорезисторами, установленными на шпильках, и задавалась ступенями 35 т, 188 т. На каждой ступени нагружения фиксировались показания тензорезисторов на подставке. В качестве измерительной аппаратуры использовалась тензометрическая станция СИИТ-3.

В результате испытаний полуколец максимальной нагрузкой 188 т полученные максимальные напряжения на наружной и внутренней поверхностях подставки в зонах приложения сосредоточенных сил не превышали 1080 кг/см^2 и 800 кг/см^2 соответственно. Напряжения в среднем сечении не превышали 550 кг/см^2 на наружной и 750 кг/см^2 на внутренней поверхности.

Испытания показали, что подставка работоспособна, напряжения не превышали допустимых значений. Потеря устойчивости элементов подставки под нагрузкой не наблюдалась.

Испытания на механическую прочность и вакуумную негерметичность трубок охлаждения подставки проводились в барокамере ИАЭ. Было проведено трехкратное термоциклирование подставки. Захолаживание проводилось при постоянном расходе гелия $G \sim 200 \text{ кг/ч}$. Длительность процесса захолаживания составила 15 ч; минимальная установившаяся температура («температура насыщения») подставки при этом была $T \sim 140 \text{ К}$ (дополнительные экраны в барокамере не использовались) при температуре гелия на входе $T = 85 \text{ К}$ и на выходе $T_{\text{вых}} = 120 \text{ К}$. Вакуумных негерметичностей не было обнаружено в течение всего процесса испытаний.

Электрические испытания сопротивления изоляции изолирующих разъемов подставки в трех режимах (до захолаживания, после захолаживания и после отогрева) подтвердили, что изолирующие разъемы соответствовали предъявляемым техническим требованиям (сопротивление изоляции конструктивных разъемов должно превышать 1 МОм при измерении мегомметром напряжением 500 В).

1.3.7. Испытания обмоток управления

Габаритные размеры обмоток управления (ОГУП и ОУ) достаточно велики, например, диаметр обмотки ОУЗ составлял 8.5 м. Поэтому провести «холодные» испытания ОГУП и ОУ в барокамере (ее внутренний диаметр 4.9 м) было невозможно.

Вне барокамеры, при «нормальных» условиях (при комнатной температуре $T \sim 290$ К и атмосферном давлении) были проведены гидравлические, электрические и вакуумные испытания.

В процессе электрических испытаний проверялись витковая изоляция обмоток методом колебательного контура и корпусная изоляция. При испытаниях витковой изоляции испытательные напряжения составляли для: ОУ1 - 400 В/виток, ОУ2 - 250 В/виток, ОУЗ - 250 В/виток, ОГУП 1, 2 – 250 В/виток. При испытаниях корпусной изоляции испытательное напряжение составляло для ОУ1÷3 - ± 19 кВ.

Вакуумные испытания проводились путем откачки каналов охлаждения шин с внешним обдувом поверхностей обмоток гелием.

Гидравлические испытания включали определение расходов газообразного азота по каналам охлаждения. Результаты гидравлических испытаний ОУ приведены в Таблице 1.14.

Таблица 1.14 - Результаты гидравлических испытаний ОУ

Параметр	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОГУП1	ОГУП2
Количество катушек в обмотке	2	2	2	2	2
Количество параллельных ветвей охлаждения в катушке	1	2	2	1	1
Диаметр охлаждающего канала, мм	12.5	12.5	20	12.5	12.5
Длина параллельной ветви охлаждения в катушке, м	225	320	465	200	400
Перепад давления азота, атм	0.81	0.75	0.68	0.6	0.82
Измеренная величина расхода азота, м ³ /ч	4.7	5.65	6.9	5.6	5.7

1.3.8. Испытания модулей вакуумной камеры

На специальном стенде термоциклирования были проведены вакуумные испытания 14 модулей вакуумной камеры (МВК). Целью испытаний была проверка вакуумной герметичности сильфонов и стенок МВК при термическом нагружении. 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: нагрев стенок МВК до $T = 400^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением до $T = 80^{\circ}\text{C}$. Расчетная мощность, которая требовалась для нагрева 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) изоляционного материала (керамических втулок), отделяющего нагреватель от поверхности МВК. Химический анализ показал наличие никеля и хрома на поверхности изолятора (результат испарения нихрома при высокой температуре $T = 800^{\circ}\text{C}$). В связи с этим было принято решение об уменьшении мощности нагрева ($I_{\text{нагр}} = 45$ А), в результате чего максимальная температура на поверхности МВК достигала уровня 345°C (Рисунок 1.15а). Температура поверхности МВК контролировалась одиннадцатью термопарами. Суммарное время трехкратного термоциклирования одного МВК достигало 4 суток (рисунок 1.15 б). Подъем мощности нагрева осуществлялся ступенчато. Возможность увеличения мощности нагрева и соответственно увеличения температуры МВК определялась величиной остаточного давления в камере термоциклирования: чтобы не происходило окисления поверхности МВК, величина давления не должна была превышать $1 \cdot 10^{-4}$ Торр.

В результате термоциклирования 14 (12 основных и 2 запасных) модулей вакуумной камеры не было выявлено вакуумных негерметичностей в сильфонах и стенках модулей (натекание составляло $5 \cdot 10^{-8}$ л·Торр/с).

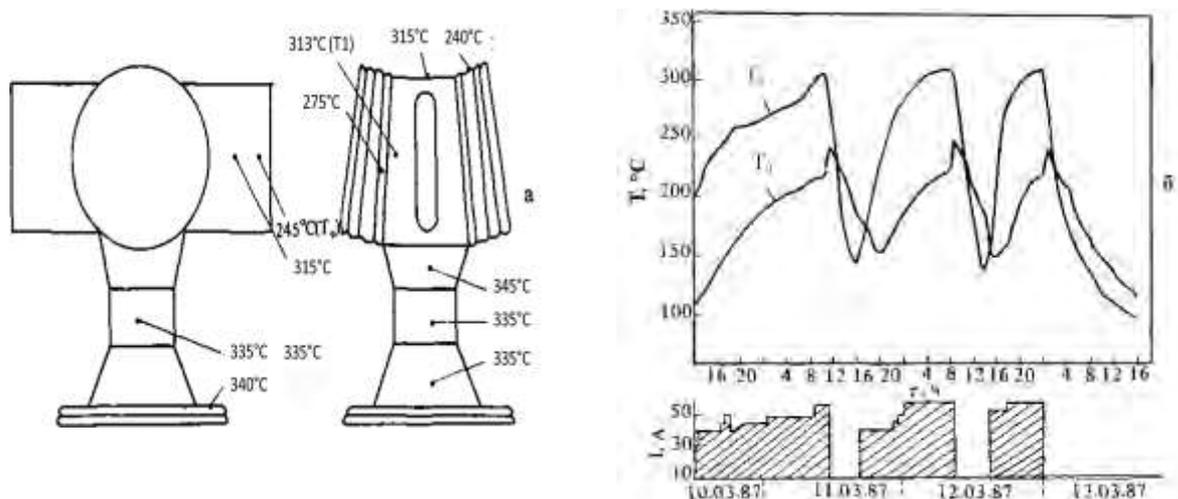


Рисунок 1.15 - Распределение температуры по поверхности модуля вакуумной камеры при термоциклировании (а) и временной ход температур двух участков модуля вакуумной камеры (в районе расположения термопар T_1 и T_9) при трехкратном термоциклировании. Ток в нагревателях $I = 55$ А.

1.4. Выводы к Главе 1

1. Стационарный теплоприток на СОТП, измеренный в режиме криостатирования, в пересчете на всю систему составлял 1100 Вт при давлении $1.0 \cdot 10^{-5}$ Торр, что примерно в 2 раза превышало проектную величину.
2. Проведенные на основе экспериментальных данных оценки показали, что дополнительное суммарное тепловыделение в блоках СОТП, связанное с резистивностью, может составить в номинальном режиме работы установки до 400 Вт.
3. По результатам испытаний полоидальных обмоток были введены ограничения на вакуумные условия в криостате Т-15 и величину прикладываемого напряжения во избежание электрических пробоев при проведении экспериментов, обращено внимание на разработку и создание надежной изоляции выводных шин токовводов полоидальных обмоток.
4. По результатам вакуумных испытаний закрытий НАЭ были заменены

охлаждающие трубки на всех закрытиях и изменена технология их крепления – пайка заменена на сварку. Для уменьшения величины теплопритоков на СОТП было принято решение о прокладке со стороны наружного азотного экрана многослойной экранно-вакуумной изоляции.

5. Термоциклирование модулей вакуумной камеры показало, что при токах в нагревателях величиной 55 А начиналось распыление нихромовых проволок нагревателей и, как следствие, уменьшение величины сопротивления нагревателей относительно корпуса модуля камеры. По результатам термоциклирования максимальный ток в нагревателях был ограничен величиной 45 А.

6. В соответствии со специально разработанными программами были подготовлены и проведены разносторонние предмонтажные испытания, а также испытания и наладка элементов и узлов конструкций электромагнитной системы установки Т-15 в процессе монтажа.

Главным результатом этих работ явилось успешное осуществление физического пуска установки Т-15 [9].

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ, КРИОСТАТИРОВАНИЯ И ОТОГРЕВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ Т-15

2.1. Система криогенного обеспечения Т-15

Система криогенного обеспечения установки Т-15 (СКО Т-15) предназначена для криогенного обеспечения объектов установки Т-15 в условиях подготовки и проведения длительного физического эксперимента [48].

СКО Т-15 обеспечивает захлаживание, криостатирование при низких температурах и отогрев следующих объектов:

- объекты, входящие в электромагнитную систему (ЭМС) Т-15;
- объекты системы инжекционного нагрева плазмы (СИН);
- объекты системы высокочастотного нагрева плазмы (СВЧ).

СКО Т-15 (рисунок 2.1.) по функциональному назначению состоит из:

- системы обеспечения газообразным гелием, включающей три винтовых компрессорных агрегата «ВКА» (рисунок 2.2.);
- системы хранения и термостатирования гелия, состоящей из двух блоков масло и влагоочистки МО-800 кг/час, двух блоков низкотемпературной очистки НО-800 кг/час, двух ожижителей гелия ОГ-800 л/час (рисунок 2.3.), циркуляционного криогенного коллектора раздачи жидкого гелия, хранилища жидкого гелия объемом в 40 м³ (РЦВГ-40);
- системы криостатирования обмоток тороидального поля (СОТП), включая пассивный гелиевый рефрижератор РГ-2000 Вт, блока азотных вводов (БАВ), блока криогенных гелиевых и токовых вводов (БКГТВ);
- системы криостатирования криостатов СВЧ, включающей два резервуара и 24 криостата;
- системы криостатирования инжекторов, включающей рефрижератор РГ-700 Вт/3.5 К;

- системы термостатирования азота (СТА), базирующейся на установке обратной конденсации (УОК). СТА обеспечивает криостатирование объектов жидким азотом.

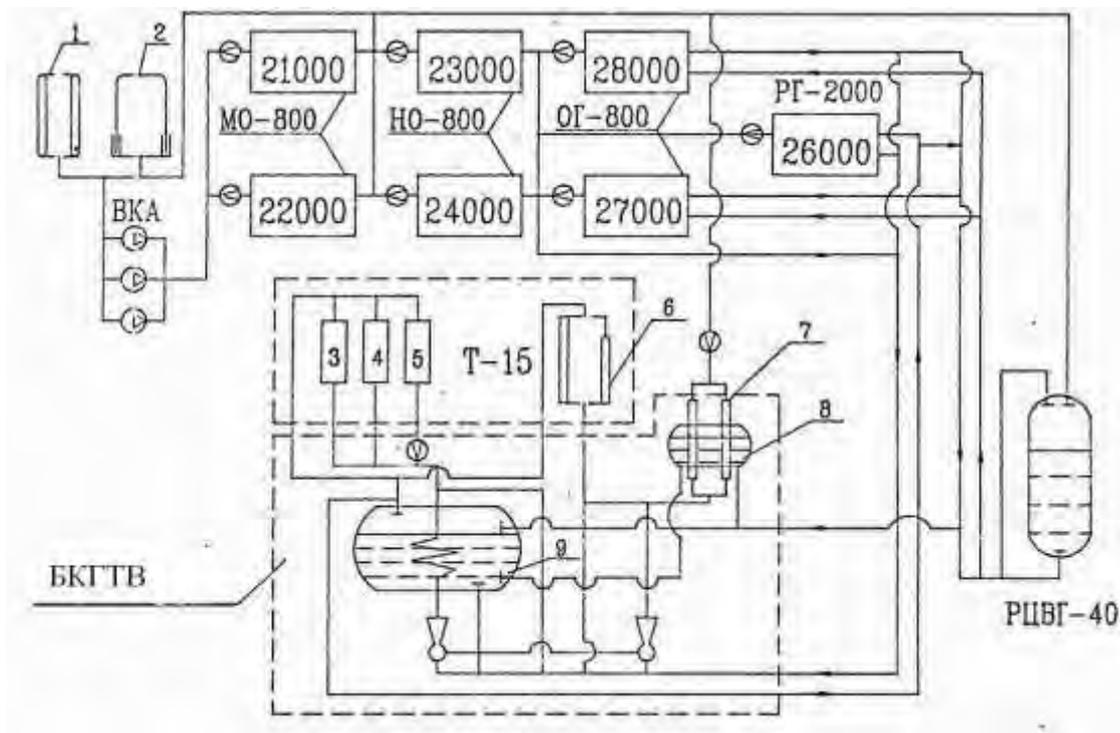


Рисунок 2.1 - СКО Т-15: 1-рессиверы, 2-газгольдер, 3- опорная колонна, 4- корпуса тороидальных катушек, 5- сверхпроводниковая обмотка, 6- шинопроводы, 7- токовводы, 8- ванна с жидким гелием для охлаждения токовводов, 9- ванна с жидким гелием для охлаждения СОТП, ВКА - винтовые криогенные агрегаты (компрессора), МО - блоки маслоочистки, НО - блоки низкотемпературной очистки, ОГ - гелиевый ожижитель, РЦВГ - хранилище жидкого гелия с объемом 40 м^3



Рисунок 2.2 - Винтовой компрессорный агрегат



Рисунок 2.3 - Гелиевые ожижители

2.2. Процесс захолаживания и криостатирования электромагнитной системы

При охлаждении электромагнитной системы (ЭМС) должны быть выполнены два противоречивых требования. С одной стороны, для повышения коэффициента использования установки в режиме физического эксперимента время захолаживания не должно быть слишком большим. С другой стороны, при больших скоростях охлаждения и неравномерности температурных полей между элементами ЭМС возможно возникновение термомеханических напряжений, приводящих к нарушению прочности установки. Наиболее напряженными конструкциями с точки зрения термомеханики в период захолаживания являются обмотка тороидального поля и опорная колонна. На этапе проектирования и предварительных испытаний опытных блоков СОТП [49, 50] были выполнены расчетные и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния обмотки при охлаждении, которые показали, что максимальные напряжения в корпусе блока СОТП возникают при $T \sim 200 \text{ K}$ и достигают 180 МПа при перепаде температур на блоке $60\text{K} \div 65\text{K}$.

На основе этих результатов были сформулированы требования к ведению режима охлаждения, по которым в диапазоне от 300K до 100K максимальная разность температур между любыми точками охлаждаемых объектов не должна превышать 50K при темпе охлаждения не более 5 K/ч . Для облегчения выполнения этих условий захолаживание всех элементов в интервале от 300K до 100K осуществлялось газообразным гелием. Поскольку электромагнитная система с точки зрения гидравлической схемы представляла собой совокупность большого количества параллельных ветвей разного диаметра и длины, то в схеме СКО были предусмотрены возможность распределения расхода хладагента по ветвям в соответствии с массой, тепловой нагрузкой и пропускной способностью каждой ветви.

Временной ход температурных кривых охлаждения тороидальной системы, азотных экранов и обмоток управления во время физического пуска установки показан на рисунке 2.4 (а) [50]. Захолаживание велось с использованием гелиевых

компрессоров, блоков маслоочистки и системы низкотемпературной очистки СКО [51,52]. Корпуса и обмотки СОТП по потоку гелия были соединены последовательно, поэтому темп охлаждения корпусов несколько превышал темп охлаждения обмоток и тем самым не создавались предпосылки для отслаивания витков обмотки от стенок корпуса. Темп захолаживания обмоток СОТП составлял в среднем $0.5 \text{ К/ч} \div 0.7 \text{ К/ч}$ и мало менялся в процессе охлаждения. Для менее массивных и обладающих большой теплообменной поверхностью азотных экранов наблюдалось сильное изменение скорости охлаждения вплоть до смены знака производной, что требовало постоянного регулирования расходов хладагента. Наибольшая разность между температурой входа хладагента и температурой поверхности составила для СОТП около 60К , для внутреннего экрана $70\text{К} \div 80\text{К}$, для наружного экрана, в отдельных точках, $120\text{К} \div 150 \text{ К}$. Это было связано с малой величиной расхода хладагента и недостаточной плотностью циркуляционных труб на охлаждаемой поверхности.

Во время захолаживания наблюдалась довольно высокая равномерность распределения температуры по СОТП. Наибольшая разница температур на поверхности блоков СОТП составляла $20\text{К} \div 25\text{К}$ на различных температурных уровнях. При захолаживании двумя ВКА темп охлаждения СОТП составлял до $1.5 \div 2.0 \text{ К/ч}$ при общем расходе 1500 кг/ч .

В ходе охлаждения ЭМС продолжалось улучшение вакуума в криостате (рисунок 2.4 б), что связано в первую очередь со снижением газоотделения и конденсацией паров воды. На рисунке 2.5 показана зависимость парциального давления в криостате гелия, воды, азота и кислорода при изменении входной температуры гелия в СОТП. Величина абсолютного парциального давления рассчитана с учетом относительной чувствительности ионизационного манометра и масс-спектрометра МХ - 7304 к различным газам.

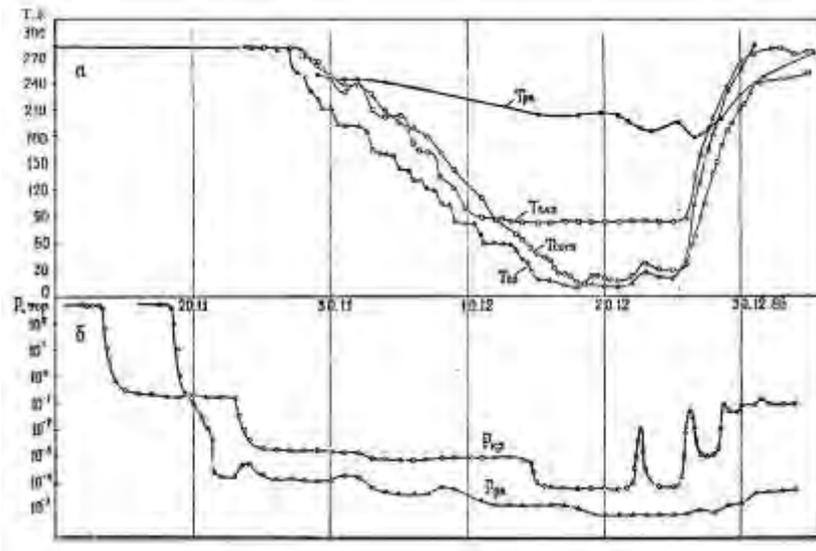


Рисунок 2.4 - Временные зависимости: а) – входной температуры гелия в ЭМС, корпусов СОТП, внутреннего азотного экрана (ВАЭ), разрядной камеры (РК); б) - давления в криостате $P_{кр}$ и в камере $P_{р.к.}$.

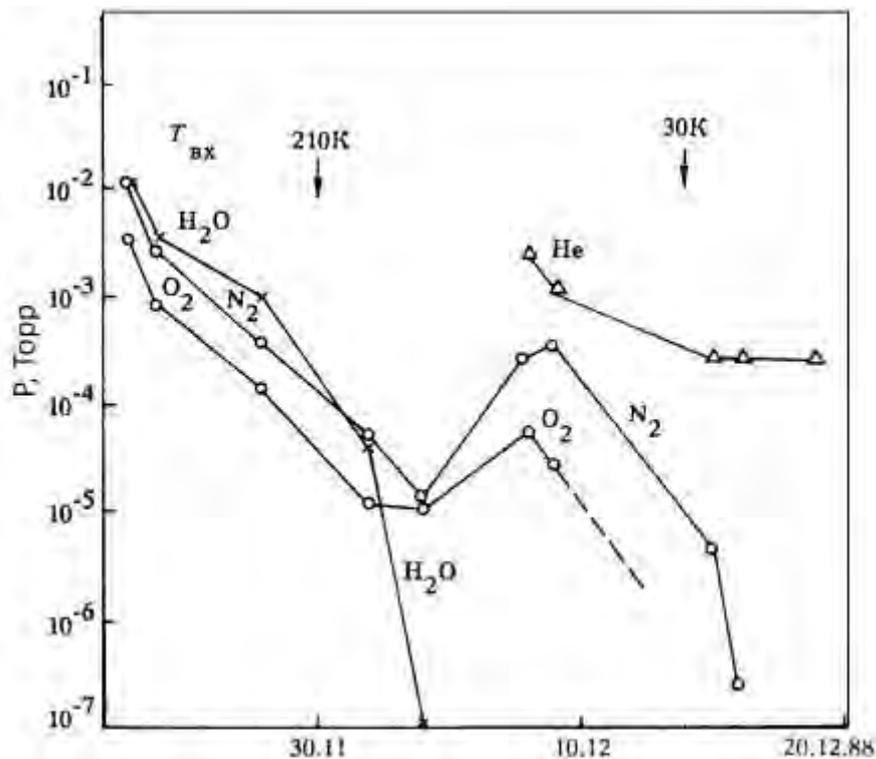


Рисунок 2.5 - Зависимость парциального давления в криостате гелия, воды, азота и кислорода при изменении входной температуры гелия в СОТП

В начальный период охлаждения с целью снижения парциального давления паров воды был реализован стационарный режим криостатирования наружного

азотного экрана (НАЭ) со следующими параметрами: температура гелия на входе в экран 243К, на выходе - 263К, расход гелия - 420 кг/ч. Средняя температура НАЭ при этом составила 263 К, температура стенок криостата – 288 К, давление в криостате $2 \cdot 10^{-1}$ Торр.

Из уравнения баланса потоков тепла, поступающего со стенок криостата и СОТП на НАЭ и отводимого потоком гелия, можно было определить приведенный коэффициент черноты $\langle \varepsilon \rangle$ системы. Полученное интегральное значение составило $\langle \varepsilon \rangle \approx 0.24$. Столь высокое значение, по сравнению с проектной величиной равной 0.1, объяснялось нагартовкой и загрязнением поверхностей в процессе обработки, а также ячеисто-ребристой структурой поверхностей ЭМС.

При достижении температуры на выходе из азотных объектов $\sim 100\text{К}$ осуществлялся переход на криостатирование их жидким азотом. Средний суммарный расход жидкого азота при криостатировании составлял $25 \div 28$ тонн/час, при этом средняя температура внутреннего азотного экрана была на уровне $90\text{К} \div 95\text{К}$, наружного азотного экрана - $110\text{К} \div 120\text{К}$. 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 ~ 200 К), 35 кВт - циркуляционный контур.

Расчетная зависимость нагрузки на СКО на азотном температурном уровне от давления в криостате и приведенных коэффициентов черноты $\langle \varepsilon \rangle_{\text{пр}}$ показана на рисунке 2.6. Из сравнения расчетных и экспериментальных данных можно было получить значение $\langle \varepsilon \rangle_{\text{пр}} = 0.27$, величина которого хорошо согласовалась с $\langle \varepsilon \rangle_{\text{пр}}$ на начальном этапе охлаждения [9, 50].

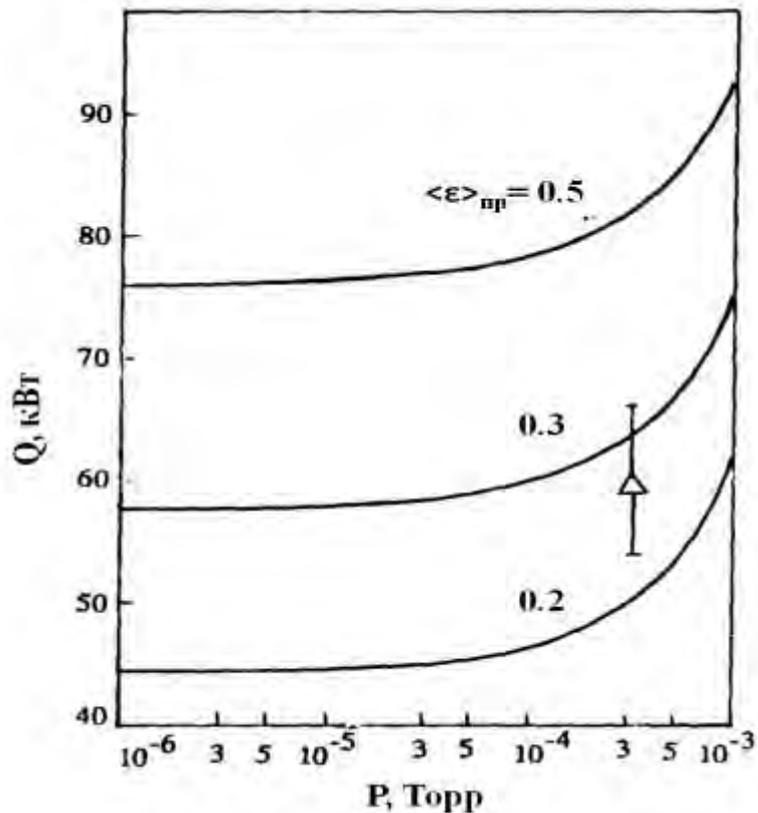


Рисунок 2.6 - Зависимость нагрузки на СКО на азотном температурном уровне от давления в криостате и приведенных коэффициентов черноты $\langle \epsilon \rangle_{пр}$.

Время достижения температуры 100К составило примерно 300 час и определялось скоростью охлаждения обмотки тороидального поля.

Дальнейшее охлаждение сверхпроводящей обмотки проводилось с помощью двух ожижителей ОГ-800, работающих параллельно в рефрижераторном режиме. При температуре ниже 20К один из блоков ОГ-800 переводился в ожижительный режим с выдачей гелия в ванны блока токовводов, 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.

После достижения температуры 30К в работу вводился пассивный рефрижератор РГ-2000. Захлаживание от 30К до 5К с использованием РГ-2000 занимало около 35 часов. Состояние сверхпроводимости СОТП было зафиксировано при входной температуре гелия ~ 12 К и выходной ~ 14 К.

На темп захлаживания от 80К до 5К существенное значение оказывал теплоприток к гелиевым объектам. Теплоприток зависел, в основном, от вакуума в криостате Т-15. На уровне температуры СОТП ~ 30К происходило улучшение, примерно на порядок, вакуума в криостате за счет сорбции молекул азота на криогенных поверхностях (рисунок 2.5).

При вакууме в криостате $P \sim 5 \cdot 10^{-5}$ Тор стационарная тепловая нагрузка на СОТП составляла ~ 1 кВт. Время выхода на режим криостатирования с 100К до 5К занимало $120 \div 130$ часов. Общее время выхода на температурный уровень 5К ~ $420 \div 430$ часов (с учетом кратковременных остановок 20 - 25 часов). На рисунке 2.7 показан временной график температуры выхода на режим криостатирования в кампанию 1992 г.[52].

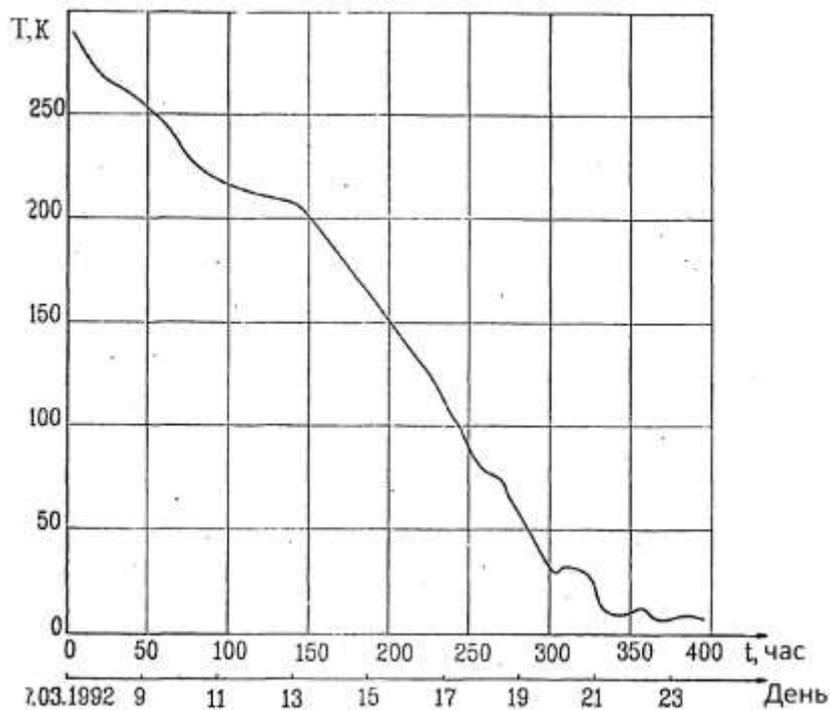


Рисунок 2.7 - Временной график температуры выхода на режим криостатирования в кампании 1992 г.

2.3. Отогрев электромагнитной системы

Требования по проведению режима отогрева соответствовали режиму захлаживания и заключались в ограничении скорости отогрева значением 5 К/ч и максимального градиента температур 50 К в диапазоне от 100К до 300К. 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. В процессе отогрева удавалось обеспечивать близкий темп изменения температуры параллельно соединенных объектов. Максимальный разброс температур на поверхности ЭМС достигал 60К, а механические напряжения в корпусах блоков не превышали 50 МПа. График изменения температур при отогреве в кампании 1992 г. показан на рисунке 2.8 [52]. Индексом 1 отмечена температура выхода гелия из Т-15, индексом 2 - температура входа в Т-15. Общее время отогрева Т-15 от 100 К до 300 К занимало около 140 часов. Некоторые опасения вызывала возможность резкого повышения давления в криостате при достижении температуры поверхности СОТП ~ 30 К и 250 К за счет активной десорбции молекул азота, кислорода и водяных паров, поступавших в криостат из-за имевшихся негерметичностей его уплотнений и наличия течей из внутренних гидравлических коммуникаций. Поскольку производительность системы откачки в диапазоне $10^{-1} \div 10^{-3}$ Торр была ограничена, резкое увеличение теплопритока по остаточному газу могло привести к увеличению сверх допустимой скорости отогрева и обмерзанию наружных стенок криостата с разгерметизацией витонových уплотнений. Применение в системе откачки дополнительных бустерных паромасляных насосов позволила сгладить пики повышения давления. 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 не наблюдалось, и темп отогрева не превышал допустимый.

В ходе отогрева ЭМС механические напряжения в корпусах блоков СОТП не превышали 50 МПа.

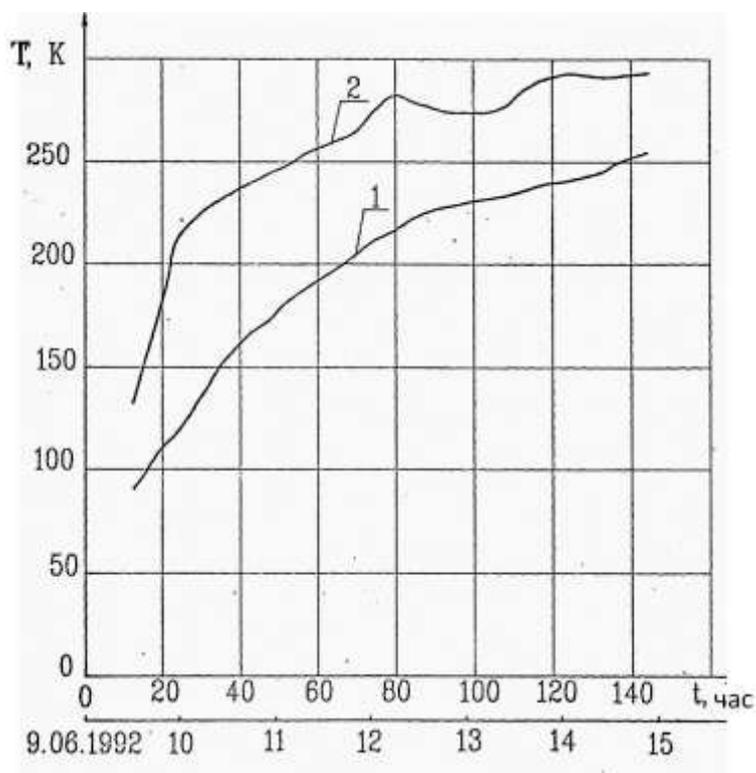


Рисунок 2.8 - График изменения температур при отогреве в кампании 1992 г.:
1-выходная температура гелия, 2-входная температура гелия.

2.4. Экспериментальные и расчетные определения величин теплопритоков к элементам ЭМС

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, отводимых циркулирующим гелием и расходуемых на понижение температуры ЭМС при известной скорости охлаждения $dT/dt = \text{const}$. При этом

рассчитывались составляющие стационарного теплопритока, связанные с механизмами теплопроводности по опорам, излучением и теплопроводностью по остаточному газу. Основные результаты приведены в Таблице 2.1 [9].

Таблица 2.1 - Результаты расчетов теплопритоков и скорости охлаждения СОТП во время физического пуска в 1988 г.

Дата	Теплоприток, кВт				Тепло, отводимое гелием, кВт	Средняя скорость охлаждения СОТП, град/ч	
	по остат очно му газу	излуч ением	по опорам	суммар ный		Расчет	Эксперимент
08.12.88	1.6	17.36	0.24	19.2	50	0.75	0.5 ÷ 0.8
14.12.88	0.37	0.23	0.2	0.8	6.36	0.9	0.8 ÷ 0.9
18.12.88	0.92	0.38	0.28	1.58	1.3 ÷ 1.7	0	0 ÷ 0.1
20.12.88	0.44	0.38	0.28	1.1	1.3	0.6	0.5

Таким образом, 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.

На рисунке 2.9 приведены расчетные и экспериментальные данные по теплопритоку к СОТП на гелиевом температурном уровне [50]. Полученные значения лежали в диапазоне $0.6 \div 1.4$ кВт при изменении давления в криостате от $1.0 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ Торр.

Наблюдалось хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями стационарной составляющей теплопритока. Следует отметить возможность снижения теплопритоков в исследованных режимах за счет уменьшения давления гелия в криостате до $P < 10^{-5}$ Торр. На том же рисунке с учетом результатов испытаний рабочих блоков СОТП [9] приведена полная нагрузка на СКО, включающая кроме стационарной составляющей

тепловыделения, возникающие в СОТП под воздействием переменных полоидальных полей и джоулевых потерь из-за наличия резистивности обмотки.

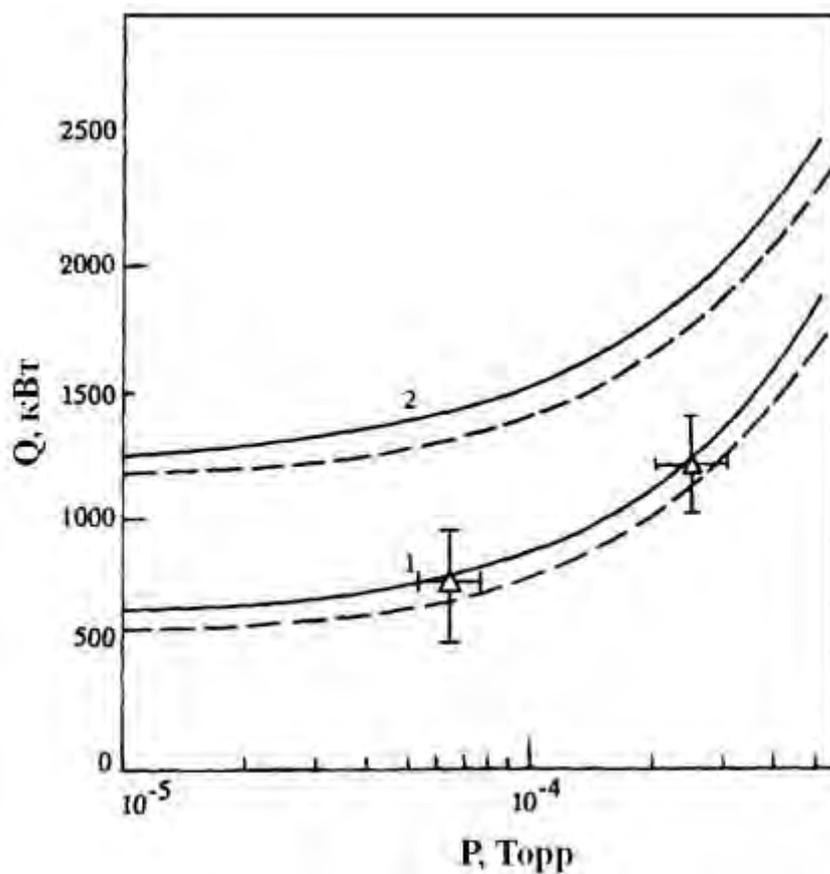


Рисунок 2.9 - Расчетные зависимости тепловой нагрузки Q на СКО на гелиевом температурном уровне ($T=4.5$ К) от давления гелия в криостате при $T_{\text{ваз}}=85$ К.

1 - стационарная нагрузка, 2- полная нагрузка с учетом резистивных потерь ($T_{\text{наэ}}=110$ К, --- $T_{\text{наэ}}=100$ К); Δ - экспериментальные значения Q (без резистивных тепловыделений).

2.5. Выводы к Главе 2

1. Проведен анализ процессов охлаждения, криостатирования и отогрева электромагнитной системы установки Т-15. Получены экспериментальные данные по требуемой скорости захлаживания и отогрева элементов

установки на различных температурных уровнях при которой термомеханические напряжения не превышали допустимые.

2. Расчетным и экспериментальным путем определены тепловые нагрузки на элементы электромагнитной системы. Суммарный стационарный теплоприток на азотном уровне в режиме криостатирования азотных объектов составил ~ 60 кВт: собственно установка ~ 25 кВт, циркуляционный контур ~ 35 кВт. Теплоприток на гелиевом уровне при отсутствии резистивных тепловыделений в СОТП составил в зависимости от величины давления в криостате $0.6 \div 1.5$ кВт.
3. Измеренные величины теплопритоков совпадали с расчетными значениями при приведенной степени черноты $0.24 \div 0.27$. Столь высокие значения, по сравнению с проектной величиной ($\varepsilon=0.1$), были связаны с загрязнением поверхностей в процессе их обработки и эксплуатации, а также с их ячеисто-ребристой структурой конструкции ЭМС.
4. Минимизация тепловой нагрузки на азотный и гелиевый температурные уровни в сверхпроводящих магнитных системах за счет улучшения качества поверхностей элементов СМС (например, за счет их электрополировки) и снижения давления в криостате менее $P < 1.0 \cdot 10^{-5}$ Торр, позволит уменьшить необходимую холодопроизводительность системы криогенного обеспечения, а следовательно, ее стоимость.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

3.1. Методы вакуумной подготовки (кондиционирования) камеры в установках токамак

Кондиционирование обращенных к плазме поверхностей вакуумной камеры в установках токамак, важная задача, целью которой, является уменьшение потока примесей и водородосодержащих элементов со стенок камеры в плазменный разряд. Эффективное кондиционирование поверхностей является важным аспектом для достижения максимальных параметров плазмы и минимизации количества срывов разряда [53].

Излучение примесей в разряде может существенным образом снизить время удержания энергии плазмы, повысить порог или даже полностью уменьшить вероятность зажигания термоядерной реакции в будущем реакторе.

В частности, кондиционирование стенок камеры позволяет уменьшить поступление, находящегося в различных соединениях, кислорода в разряд. Наличие кислорода может негативным образом повлиять на развитие разряда на начальной стадии, так как частично ионизованные атомы кислорода являются сильным источником излучения в области температур ~ 100 эВ. Кислород присутствует в разрядной камере при наличии воздушных атмосферных течей, в виде воды как на поверхностях камеры и внутрикамерных элементов, так и в межкристаллитной структуре стали, в виде окислов элементов и в виде газообразных соединений (CO , CO_2).

На современных токамаках для кондиционирования стенок разрядной камеры и внутрикамерных элементов, главным образом, применяются омический и индукционный прогрев, тлеющий, индукционный (Тэйлоровский) разряды, неустойчивые плазменные разряды при пониженном тороидальном поле, а также СВЧ - разряды.

3.1.1. Прогрев камеры

Для удаления воды с поверхности, десорбции водорода и дейтерия из углеродосодержащих конструкций в установках токамак применяется прогрев камеры до температур $150^{\circ}\text{C} \div 400^{\circ}\text{C}$. Прогрев камеры осуществляется либо омическим способом, путем пропускания по ней электрического тока, либо нагревателями, установленными на поверхность камеры, либо теплоносителями (вода, газ), имеющими требуемую температуру. Так, в частности, прогрев камеры установки ИТЭР осуществляется водой, нагретой до 220°C и давлением 4 МПа [53].

3.1.2. Плазменный разряд с переменным током (Тэйлоровский разряд)

Применение Тэйлоровского разряда в водороде (дейтерии) [54] очень эффективно для удаления монослоев атомов кислорода с поверхности камеры. При низких температурах плазмы, порядка нескольких электрон-вольт, происходит химическая реакция водорода (дейтерия) с кислородом с образованием воды, которая затем легко откачивается турбомолекулярными насосами. Как правило, для получения этого типа разряда требуется переменное напряжение 50 Гц, тороидальное магнитное поле $2 \div 5$ кГс и разрядная камера с высоким омическим сопротивлением. Мощность, вкладываемая в разряд, составляет $10 \div 30$ кВт.

К сожалению, этот метод кондиционирования стенок камеры, на ряде работающих установках и вновь вводимых в эксплуатацию, не может быть применен из-за того, что разрядная камера имеет толстые металлические стенки (низкое омическое сопротивление).

3.1.3. Тлеющий разряд

Этот тип разряда широко применяется на установках токамак, в силу относительной технической простоты реализации и своей эффективности. В основе этого метода лежит разряд с тлеющим катодом. Электрод (анод) вводится внутрь разрядной камеры, на который подается высокое положительное относительно камеры напряжение.

При напряжении $3 \div 5$ кВ в зависимости от чистоты стенок и давления рабочего газа ($P \sim 10^{-3} \div 10^{-4}$ Торр) происходит пробой газа, с последующим горением разряда при напряжении $300 \div 500$ В и токе в несколько ампер. Ионы рабочего газа, ускоряясь в области катодного падения напряжения, бомбардируют стенки камеры, удаляя, таким образом, требуемые элементы.

В зависимости от поставленной цели, тлеющий разряд проводится в водороде (дейтерии), гелии или инертных газах. Для удаления кислорода, накопившегося на стенках камеры в процессе проведения экспериментов, применяется тлеющий разряд в водороде. Для последующего удаления водорода со стенок камеры, а также из углеродосодержащих внутрикамерных элементов, являющихся хорошим сорбентом водорода, применяется тлеющий разряд в гелии. Как правило, тлеющий разряд в среде тяжелых инертных газов - ксеноне или аргоне применяется для удаления с поверхности карбидных пленок.

3.1.4. СВЧ - разряд

Для кондиционирования стенок установки ИТЭР, на сегодняшний день: приняты прогрев, с помощью воды нагретой до 220 °С, тлеющий и СВЧ разряды. Поверхность первой стенки (бланкет с защитным покрытием), обращенной к плазме, не является однородной, и состоит из отдельных сегментов с образованием зон («карманов») между ними. Применение тлеющего разряда является эффективным способом очистки поверхности, обращенной к плазме. Но, как показали эксперименты на установке TEXTOR [55], тлеющий разряд не столь

эффективен для очистки поверхностей в узких зазорах (в частности, между камерой и лайнером). Эффективным, с этой точки зрения, является СВЧ разряд.

СВЧ разряд, в качестве способа кондиционирования стенок разрядной камеры, применялся ранее на установках JFT-2 [56], JPP-II [57], TEXTOR [55]. Вводимая СВЧ мощность на частоте 2.45 ГГц составляла: на установках JFT-2 и TEXTOR - 2 кВт, на установке JPP-II - 800 Вт. Типичными параметрами плазмы в этих разрядах были: электронная плотность $n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $T_e \leq 10 \text{ эВ}$.

В экспериментах на этих установках, по кондиционированию стенок с помощью СВЧ разряда, было показано:

- эффективность очистки стенок в СВЧ разряде и индукционном (Тейлоровском) разряде, при равной вкладываемой мощности, примерно одна и та же (JFT-2);

- не было обнаружено существенной разницы в конечном результате процедуры очистки между тлеющим и СВЧ разрядами на установке TEXTOR (в обоих случаях эффективный ионный заряд плазмы $Z_{\text{эф}}$ был уменьшен с 3 до 2);

- применение только СВЧ разряда на установке JPP-2 позволило получить $Z_{\text{эф}} = 1$.

К достоинствам этого метода следует отнести отсутствие необходимости размещения в разрядной камере систем ввода-вывода подвижных электродов, возможность проведения разряда при низких давлениях, что уменьшает расход рабочего газа и увеличивает скорость откачки продуктов очистки.

3.2. Омический и индукционный прогрев вакуумной камеры

Для обезгаживания поверхности камеры установки Токамак-15 применялся омический и индукционный прогрев. Первым способом нагревались массивные силовые секции и внешние патрубки камеры, вторым - тонкостенные сильфоны. Для прогрева силовых секций, в первоначальном варианте (до 1993 г.), использовались омические нагреватели, расположенные на наружной

поверхности камеры со стороны внутреннего азотного экрана (рисунок 3.1). На каждом модуле имелось по 8 нагревателей из проволоки Х20Н80 диаметром 3 мм, которые закреплялись к поверхности камеры с помощью керамических изоляторов. Концы нагревателей были приварены к вакуумно-плотным тоководам, расположенным в коробках выводов на поверхности криостата. Запитка нагревателей осуществлялась от вторичных обмоток однофазных трансформаторов. Для предотвращения испарения материала нагревателя и снижения вследствие этого сопротивления изоляции между нагревателями и поверхностью камеры (металлизация керамических изоляторов) максимальный ток в нагревателях после предмонтажных испытаний силовых секций был принят 45 А [58]. При этом, суммарная мощность нагревателей всех 12 модулей достигала ≈ 300 кВт.

Управление мощностью нагревателей осуществлялось при помощи тиристорного ключа с фазовым регулированием.

Прогрев навесных патрубков производился нагревателями, выполненными из кабеля КНМСС и имеющими независимую систему питания и регулирования подводимой мощности. Суммарная мощность, вкладываемая в нагреватели навесных патрубков, составляла 110 кВт.

Нагрев сильфонных секций осуществлялся электрическим током, индуцированным вихревым электрическим полем. Для этого на верхней и нижней расширенных частях магнитопровода установлены обмотки индукционного нагрева (ОИН). Катушки ОИН были по току соединены последовательно и запитывались от индукционного регулятора мощностью 1 МВА, обеспечивающего переменное напряжение с частотой 50 Гц в диапазоне $0 \div 380$ В. Связь ОИН с магнитопроводом и вакуумной камерой характеризовалось эквивалентным сопротивлением z , экспериментально определенная величина которого, составила 0.28 Ом (при $I_{\text{ОИН}} = 500$ А, $U_{\text{ОИН}} = 140$ В). Столь высокое значение z по сравнению с проектно-расчетной величиной, равной 0.14 Ом, определялось реальной индуктивностью рассеяния ОИН, которая не учитывалась при проектировании. Поэтому максимальная мощность индукционного прогрева

составляла $250 \div 260$ кВт.

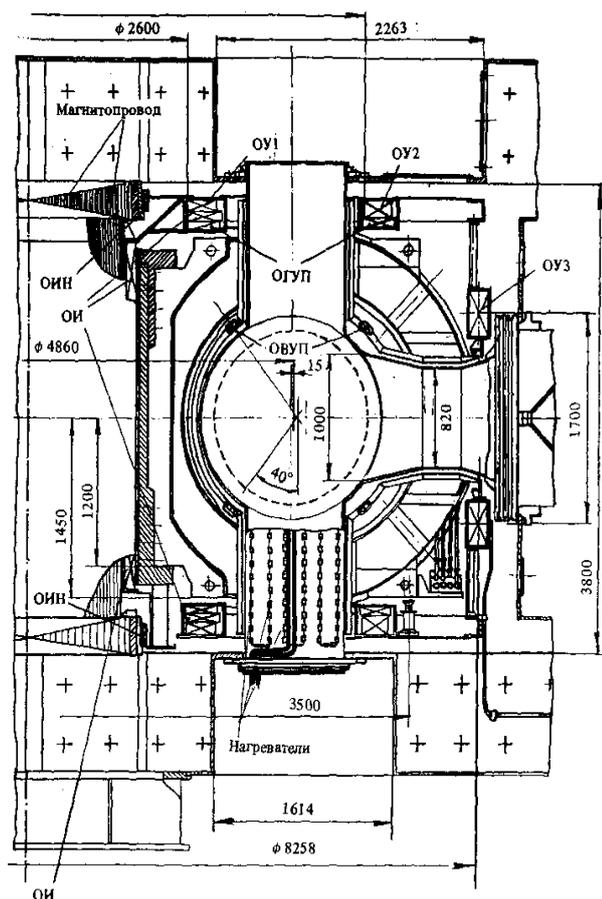


Рисунок 3.1 - Поперечное сечение установки Т-15

Режим прогрева контролировался системой технологической диагностики, которая регистрировала следующие параметры:

- температуру поверхности силовых секций и сильфонных вставок вакуумной камеры и поверхности внутреннего азотного экрана (ВАЭ) при помощи хромель-копелевых термопар (всего 236) и платиновых термометров сопротивления (24 датчика);
- механические деформации силовых секций вакуумной камеры при помощи тензорезисторов (7 датчиков);
- наличие протока и температуру охлаждающей воды в ветвях ВАЭ и ОИН;
- наличие электрических замыканий между элементами установки (всего 36 элементов), которые могли привести к образованию замкнутых контуров вокруг

сердечника магнитопровода;

- давление и спектр остаточных газов в криостате и вакуумной камере;
- токи и напряжения в цепях питания нагревателей секций вакуумной камеры и ОИН.

На рисунке 3.2 показано расположение на силовой секции и сифонной вставке термопар, термометров сопротивления и тензорезисторов.

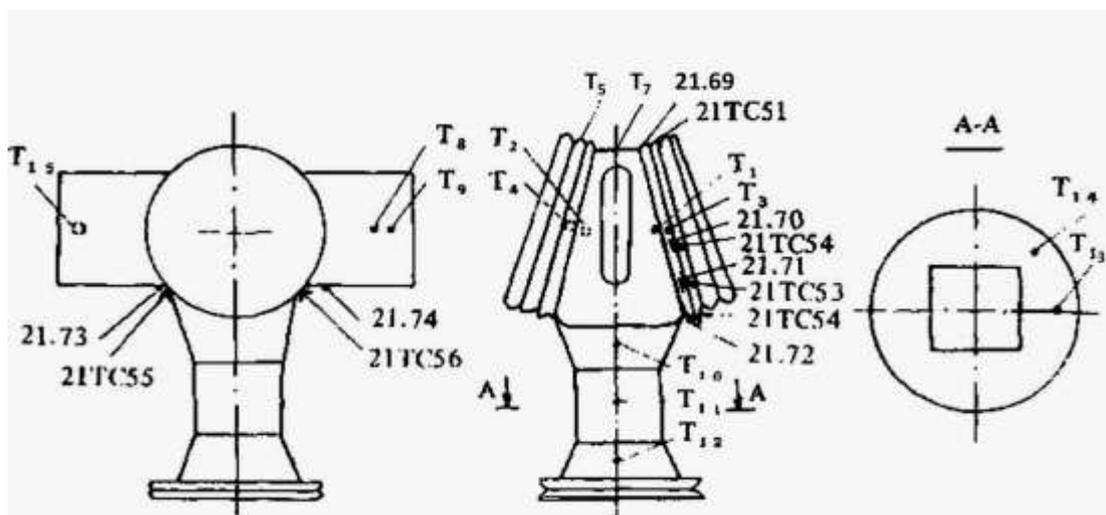


Рисунок 3.2 - Расположение на силовой секции и сифонной вставке в 21-м сечении установки: • термопар (Т); V- термометров сопротивления (ТС); I - тензорезисторов (21.70-74)

Первоначально при проведении прогрева на параметры режима накладывались следующие ограничения. Для снижения возможных термомеханических напряжений максимальная скорость нагрева и охлаждения элементов камеры не должна была превышать 5 град/ч, разность температур в различных точках силовой секции не должна превышать 150°C, а разность температур между силовой секцией и сифонной вставкой в районе шва - 25°C. Максимальная температура камеры для первого прогрева была установлена 300°C вместо 400°C (проектная величина). Это было сделано для снижения тепловой нагрузки на ВАЭ с тем, чтобы его температура, которая определялась передачей тепла от нагревателей и нагретой поверхности камеры и отводом тепла протекающей по трубкам охлаждения водой, не превышала 70 ÷ 80 °C.

Такое требование по температуре ВАЭ определялось его механической прочностью в связи с тем, что экран жестко, посредством кронштейнов, закреплялся на силовых блоках обмоток тороидального поля, имеющих комнатную температуру. По условиям механической прочности максимальный перепад температур между любыми жестко связанными элементами установки не должен был превышать 50 градусов.

Так как ОИН и полоидальные обмотки расположены в вакуумном объеме криостата, то при подаче (или индуцировании) на них напряжения существовала возможность электрического пробоя по остаточному газу. Как показали предмонтажные испытания обмотки индуктора [41,43] и блоков сверхпроводящей обмотки тороидального поля (СОТП) [42], резкое снижение пробивных напряжений происходило в диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$ Торр [43]. Исходя из этих результатов и учитывая характерные расстояния между токоведущими частями в криостате, были приняты ограничения по рабочим и испытательным напряжениям на всех обмотках в зависимости от давления в криостате (см. Таблицу 3.1).

Таблица 3.1 - Величина испытательного напряжения в зависимости от величины давления в криостате

$P_{кр}$, Торр	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$U_{раб}$, кВ	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$U_{исп.}$, кВ	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0

3.2.1. Режим прогрева

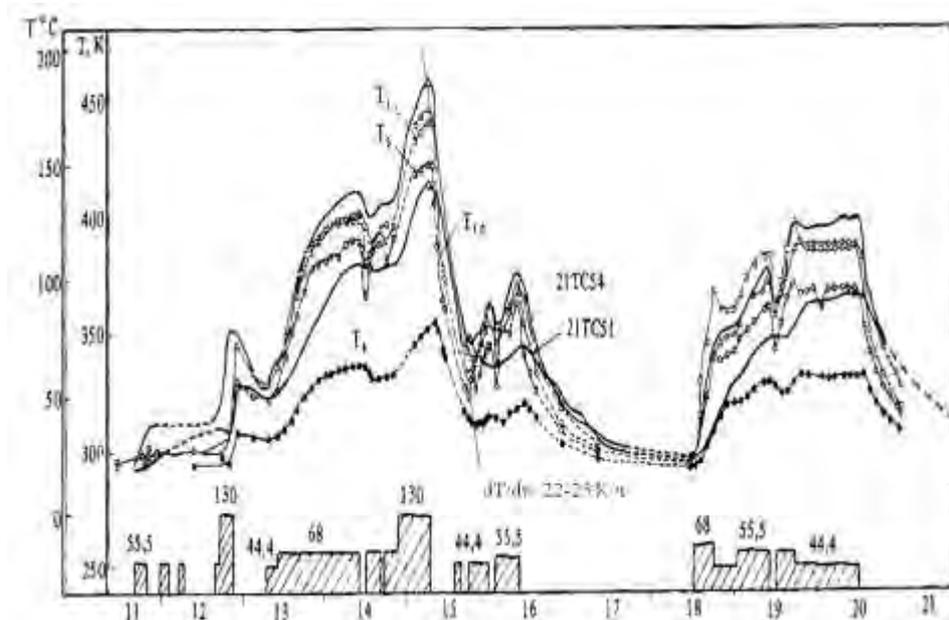
Откачка вакуумной камеры и криостата осуществлялась с атмосферы - механическими форвакуумными насосами, а начиная с давления $P \approx 2 \cdot 10^{-2}$ Торр диффузионными и турбомолекулярными насосами. Масс-спектры остаточного газа в камере и криостате до начала прогрева, полученные с помощью масс-анализатора, при вакууме в камере $1 \cdot 10^{-5}$ Торр и в криостате $1 \cdot 10^{-3}$ Торр показали,

что основными компонентами газового состава являлись массы 18 (вода), 28, 32, 44.

На рисунке 3.3 и рисунке 3.4 показан временной ход температуры различных участков модуля вакуумной камеры при прогреве в мае-июне 1989 г. Штриховкой показаны гистограммы суммарной мощности, вкладываемой в нагреватели [58]. Контроль температуры осуществлялся хромель-копелевыми термопарами и платиновыми термометрами сопротивления. Сигналы с термопар поступали в систему автоматизации эксперимента вакуумно-технологического комплекса, где проходили обработку, т.е. переводились в реальные температуры. Температура различных участков модулей вакуумной камеры отображалась на экране монитора, на пульте оператора в виде таблиц, графиков и гистограмм. Опрос всех термопар проводился раз в 30 с. Архивизация данных осуществлялась выдачей распечаток значений температур и давлений раз в 30 минут.

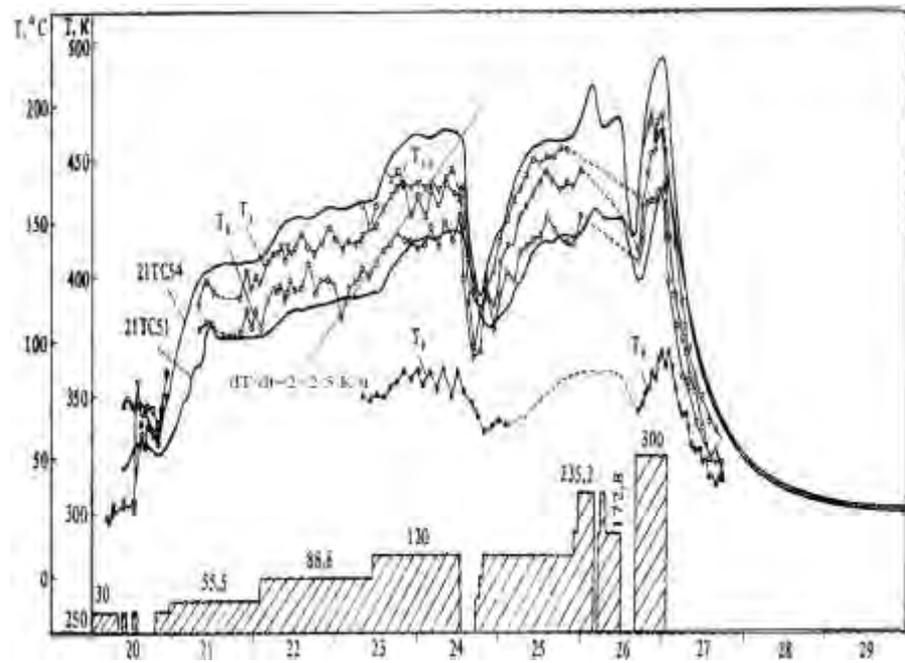
Температура поверхности силовых секций и сильфонных вставок определялась мощностью, вкладываемой в нагреватели. Обмотка индукционного нагрева, предназначенная в основном для нагрева сильфонных вставок, включалась эпизодически в силу ограничений по допускаемому давлению в криостате. Мощность нагрева сильфонных вставок, не превышала в эти периоды нескольких киловатт (< 5 кВт). Увеличение мощности в нагревателях происходило ступенчато. Критерием увеличения мощности служил выход температуры поверхности на плато ($dT/dt = 0$) на каждом новом температурном уровне. Время выхода на максимальную мощность омического нагрева составило примерно одну неделю. Поведение температуры поверхности камеры во времени в различных ее местах (см. рисунок 3.3 и рисунок 3.4) зависело от динамики прогрева. Временной ход давления в криостате и камере, а также газового потока в вакуумную камеру, связанного с гажением поверхностей и внешним натеканием, показаны на рисунке 3.5 (а-в). Увеличение давления и суммарного потока в вакуумной камере во время прогрева связано с обезвоживанием и обезгаживанием ее поверхности. Типичные спектры остаточных газов в камере и криостате во время прогрева, показаны на рисунке 3.6.

Появление в спектре остаточных газов камеры масс с $M > 50$ а.е.м., по-видимому, связано с разложением углеводородов. Анализируя данные, приведенные на рисунках 3.3-3.5 можно отметить, что более интенсивный процесс обезвоживания камеры начинался при температуре ее стенок $150\text{ }^{\circ}\text{C} \div 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при мощности в нагревателях 130 кВт).



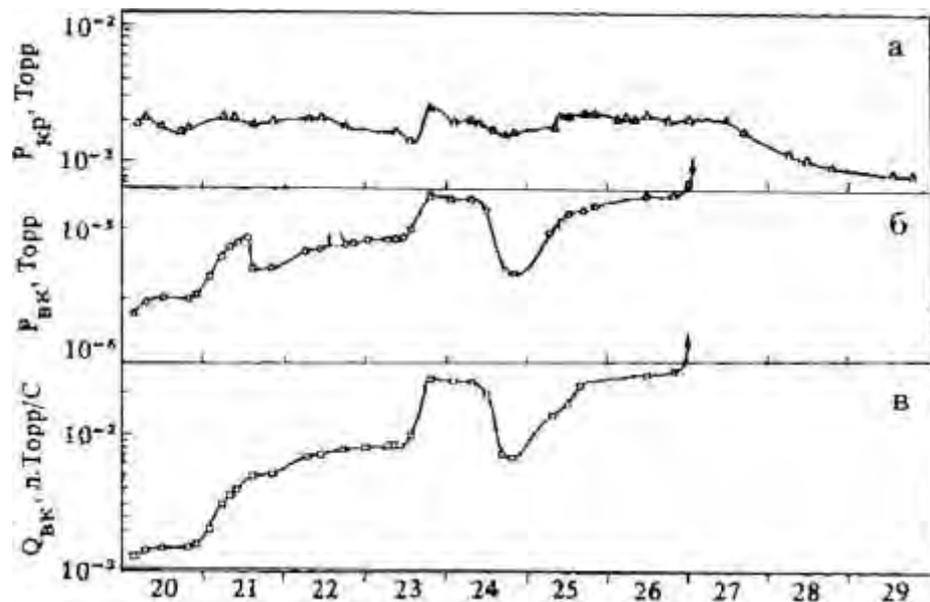
Май 1989 г.

Рисунок 3.3 - Временные зависимости температуры различных участков модуля вакуумной камеры в режиме прогрева. Штриховкой показана гистограмма вкладываемой в нагреватели мощности, кВт.



Июнь 1989 г.

Рисунок 3.4 - Временные зависимости температуры различных участков модуля вакуумной камеры в режиме прогрева. Штриховкой показана гистограмма вкладываемой в нагреватели мощности, кВт



Июнь 1989 г.

Рисунок 3.5 - Временной ход в режиме прогрева: а — давления в криостате; б — давления в камере; в - величины газового потока в камеру [58]

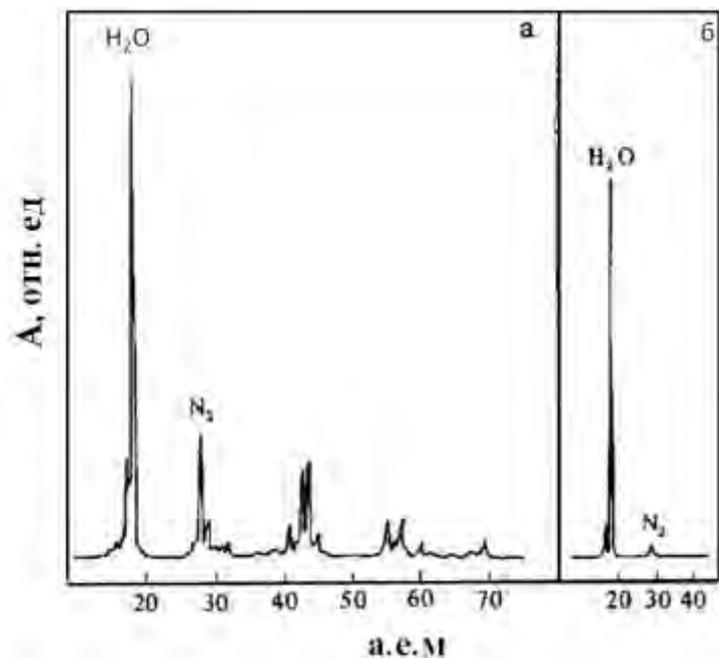


Рисунок 3.6 - Типичные спектры остаточных газов в камере и криостате в режиме прогрева камеры: а - камера; б - криостат

В процессе прогрева исследовалась динамика электрических замыканий между элементами установки. С ростом температуры камеры появлялись новые замыкания (исчезновение имеющихся замыканий, замечено не было). Среди них надо отметить образование цепей, переключающих камеру по большому обходу соседними элементами конструкции. Образование замкнутых контуров может привести к протеканию по ним токов при возникновении индуцированного напряжения и, как следствие к повреждению элементов при протекании по ним токов.

Сопротивление этих цепей уменьшалось с увеличением температуры камеры и достигало величин, сравнимых с величиной сопротивления не переключенного участка камеры ($R \sim 2 \cdot 10^{-4}$ Ом). Для этих замыканий характерно то, что в процессе охлаждения камеры происходило увеличение их сопротивления в соответствии с темпом ее охлаждения и их полное исчезновение при достижении камерой комнатной температуры. При температуре прогрева $T_k > 200^\circ\text{C}$ карта замыканий, определенная гальваническим способом, показала

перекоротку практически всех элементов конструкции (исключение составили половинки каркаса индуктора). После охлаждения камеры до комнатной температуры и напуска атмосферы в камеру и криостат карта замыканий осталась без изменений. Для этого случая на рисунке 3.7 показана картина электрических связей непосредственно между элементами конструкции установки. На рисунке указаны также величины сопротивлений замыканий. Диапазон величин сопротивлений составлял $0.01 \div 1$ Ом. По окончании прогрева большая часть замыканий была ликвидирована путем отжига, т.е. пропусканием электрического тока в несколько десятков ампер ($I < 50$ А) между двумя соседними закороченными элементами. После проведения отжига не было выявлено замкнутых контуров внутри установки.

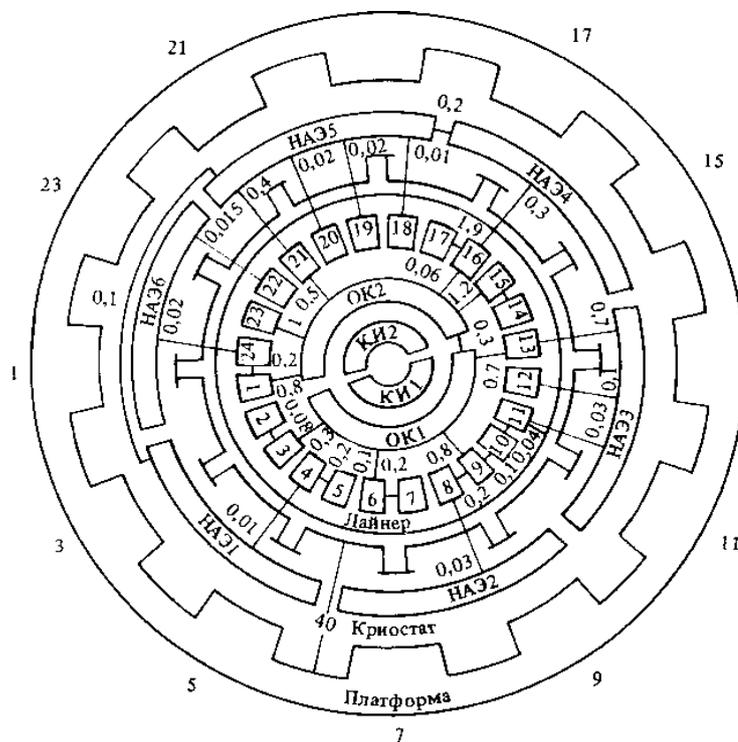


Рисунок 3.7 - Карта электрических связей и их сопротивлений между элементами установки после окончания прогрева при атмосферном давлении в камере и криостате

3.2.2. Тепловой баланс при прогреве вакуумной камеры

Мощность от нагревателей к вакуумной камере передавалась, преимущественно, за счет излучения, а от ОИН к сильфонным секциям - за счет омического нагрева индуцированным током.

Запитка нагревателей производилась от вторичных обмоток однофазных трансформаторов, обеспечивающих ток в нагревателях до 50А при напряжении ~ 100 В. Управление мощностью нагревателей осуществлялось при помощи тиристорного ключа с фазовым регулированием.

Уравнение теплового баланса при прогреве вакуумной камеры имеет вид:

$$Q = c \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} + Q_{\text{пот}} , \quad (3.1)$$

где Q - мощность, идущая на нагрев камеры; c - теплоемкость стали 12Х18Н10Т; m - масса камеры, равная $32 \cdot 10^3$ кг (без навесных патрубков); dT/dt - скорость изменения температуры поверхности камеры; $Q_{\text{пот}}$ - мощность, теряемая камерой за счет излучения, теплопроводности по вертикальным и горизонтальным патрубкам, теплопроводности остаточного газа.

Анализ тепловых потерь показал, что мощность, теряемая за счет теплопроводности по вертикальным и горизонтальным патрубкам и теплопроводности по остаточному газу, не превышала 10% от мощности, вкладываемой в нагреватели. Так, при мощности, вкладываемой в нагреватели 130 кВт (Рисунок 3.4), примерно 8 кВт тратилось на изменение теплосодержания камеры ($dT/dt \approx 2$ К/ч), за счет теплопроводности по вертикальным патрубкам терялось 10 кВт, через горизонтальные патрубки - 1 кВт, 1.5 кВт терялось за счет теплопроводности остаточного газа. Относительно низкая величина потерь по горизонтальным патрубкам объяснялась большим термическим сопротивлением сильфонов, посредством которых камера соединяются с криостатом. Мощность, переизлучаемая камерой, составляла примерно 54 кВт. Таким образом, суммарная

мощность, которая шла на нагрев камеры составляла примерно 75 кВт. Такой же результат можно получить при анализе теплового баланса при отключении прогрева, по скорости охлаждения камеры. При отключении прогрева мощностью 130 кВт, скорость охлаждения камеры составляла $dT/dt \approx -22 \div -25$ К/ч (рисунок 3.3). Таким образом, эффективность прогрева составляла, не более 60 %.

Для удобства анализа интересно было знать среднюю излучательную температуру камеры (T_{σ}), которую можно вычислить по формуле:

$$Q_{\sigma} = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot S \cdot (T_{\sigma}^4 - T_{\text{ВАЗ}}^4) \quad (3.2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент черноты, по результатам физического пуска Т-15 [9] равный ~ 0.25 в целом по всей установке при теплообмене между двумя ее элементами; $S = 200 \text{ м}^2$ - поверхность камеры, обращенная к внутреннему азотному экрану.

Пренебрегая потерями мощности за счет теплопроводности, можно считать Q_{σ} равной вкладываемой мощности на стационарной стадии нагрева ($dT/dt = 0$).

В Таблице 3.2 приведены максимальная и средняя излучательная температуры камеры в зависимости от мощности, вкладываемой в нагреватели.

Таблица 3.2 - Максимальная и средняя излучательная температуры камеры в зависимости от мощности, вкладываемой в нагреватели

Т, К	Q, кВт			
	56	89	130	300
$T_{\text{макс}}$	405	430	460	530
T_{σ}	370	400	430	510

Как видно из Таблицы 3.2, при больших мощностях прогрева средняя излучательная температура T_{σ} приближается к максимальной температуре камеры из-за возрастающего вклада областей, имеющих максимальную температуру, в полную излучаемую мощность (в силу зависимости $Q \sim T^4$).

Мощность, вкладываемая в нагреватели, передавалась излучением на внутренний азотный экран (ВАЭ), который охлаждался либо водой, либо жидким азотом при криостатировании электромагнитной системы.

Оценим максимальную температуру поверхности ВАЭ в последний день прогрева (27 июня 1989 г.) при мощности, вкладываемой в нагреватели, 300 кВт.

В силу тороидальной формы ВАЭ водяные трубки охлаждения на его поверхности расположены с различной плотностью. Очевидно, что максимальная температура поверхности ВАЭ будет находиться в местах расположения охлаждающих трубок с наименьшей плотностью. В реальной конструкции это в местах, где ВАЭ охватывает горизонтальные патрубки вакуумной камеры: здесь расстояние между охлаждающими трубками равно 0.15 м.

Максимальную температуру поверхности ВАЭ оценим по формуле:

$$T_{\text{ВАЭ}}^{\text{max}} = T_{\text{хл}} + \frac{\Delta q \cdot l^2}{8} \quad (3.3)$$

где $T_{\text{хл}}$ - температура поверхности ВАЭ в непосредственной близости от трубки охлаждения и приблизительно равная температуре хладагента; Δq - удельный тепловой поток, идущий на нагрев ВАЭ, равный разности потоков приходящего от вакуумной камеры и передающегося на СОТП; l - расстояние между трубками охлаждения; $\lambda = 16 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ - коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н10Т при температуре 300К; $\delta = 4 \text{ мм}$ - толщина стенки ВАЭ. Из мощности, вкладываемой в нагреватели (300 кВт), примерно 12 кВт шло на изменение теплосодержания камеры, 13 кВт терялось за счет теплопроводности вертикальных и горизонтальных патрубков, и остаточного газа, 35 кВт уходило в результате теплообмена ВАЭ с блоками СОТП и криостатом. Таким образом, на нагрев ВАЭ приходилось примерно 240 кВт мощности, и следовательно: $\Delta q = 1200 \text{ Вт/м}^2$ и $T_{\text{max}} = T_{\text{хл}} + 52^\circ\text{C}$. При перепаде напора $\Delta P = 0.55 \text{ МПа}$ вода должна нагреваться примерно на 30°C . В связи с тем, что мощность теплообменников системы водяного охлаждения использовалась не полностью, вода на входе в

ВАЭ имела температуру $T_{\text{вх}} = 30^\circ \text{C}$, на выходе $T_{\text{вых}} \approx 60^\circ \text{C}$. Температура поверхности экрана в местах наименьшей плотности трубок охлаждения могла колебаться от 82°C до 112°C . Платиновые термометры сопротивления показали температуру поверхности ВАЭ в диапазоне от 77°C до 97°C .

На рисунке 3.8 и рисунке 3.9 приведены расчетные кривые усредненной излучательной температуры камеры и максимальной температуры ВАЭ в зависимости от мощности, вкладываемой в нагреватели, при прогреве на «теплой» и захлажденной установке, а также приведены экспериментальные значения.

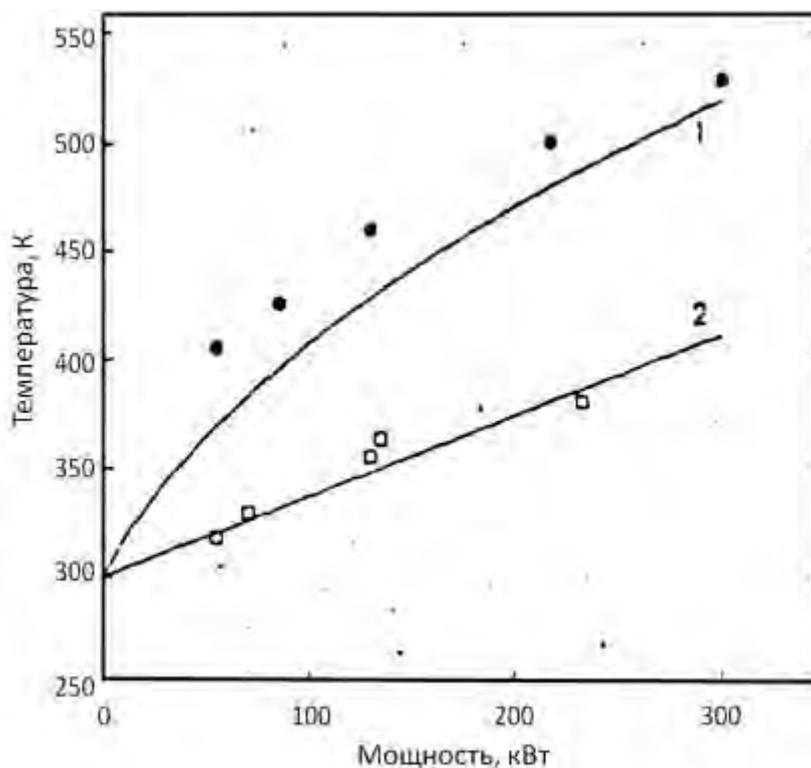


Рисунок 3.8 - Расчетные зависимости средней излучательной температуры камеры (кривая 1) и максимальной температуры поверхности ВАЭ (2) при прогреве на «теплой» установке. Символы ● (максимальная температура) и □ – экспериментальные значения [59]

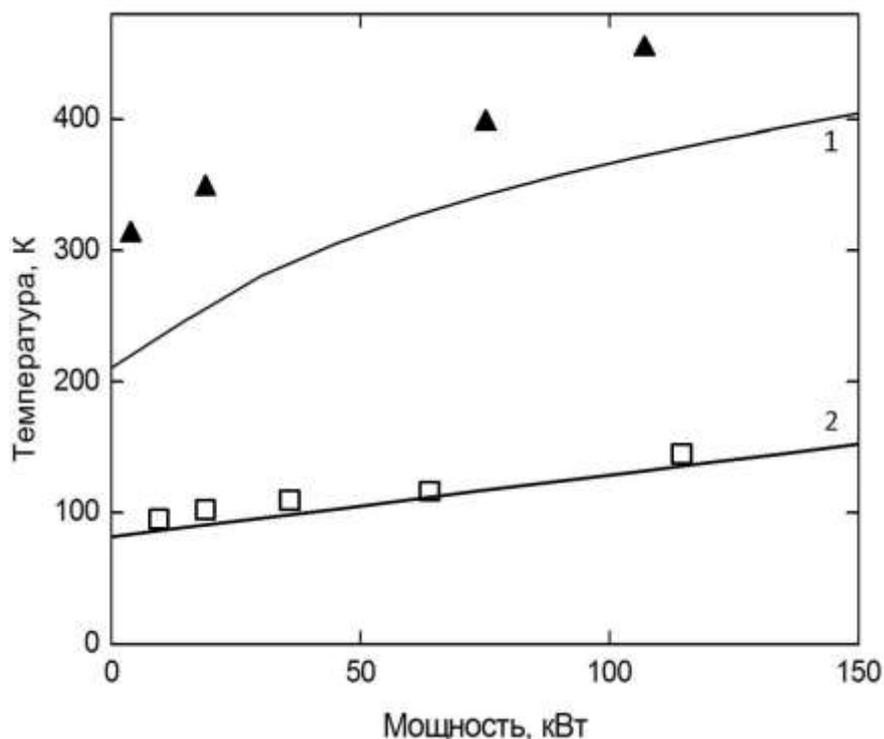


Рисунок 3.9 - Расчетные зависимости средней излучательной температуры камеры (кривая 1) и максимальной температуры поверхности ВАЭ (2) при прогреве на «холодной» установке. Символы ▲ (максимальные значения) и □ – экспериментальные значения [59]

3.3. Омический прогрев камеры нагревателями, проложенными на внутренней поверхности камеры

В процессе эксплуатации системы омического прогрева нагреватели, расположенные на внешней поверхности камеры, выходили из строя. Обрыв ветвей нагревателей был связан с недостаточной прочностью их крепления к поверхности камеры при воздействии циклических нагрузок, возникавших при взаимодействии переменного тока в нагревателях с тороидальным магнитным полем. Проведенный анализ величин сопротивлений показал, что замыкания произошли, в основном, примерно на середине длины нагревателей или в местах, недосягаемых из люков в криостате. Это обстоятельство сузило возможные способы ремонта нагревателей. Дальнейшая эксплуатация нагревателей могла привести к серьезному повреждению камеры и невозможности проведения

экспериментов с плазмой. Отсутствие системы омического прогрева делало также невозможным проведение процедуры подготовки камеры на «теплой» установке. Индукционный прогрев на «теплой» установке нельзя было проводить из-за высокого давления в криостате, а поддержание камеры на определенном температурном уровне во время экспериментов с плазмой - из-за трансформаторной связи полоидальных обмоток с обмоткой индукционного прогрева. Кроме того, проведение только индукционного прогрева не позволяло прогревать горизонтальные патрубки выше $\sim 100^{\circ}\text{C}$. В связи с этим, встал вопрос о способах дополнительного прогрева камеры, эффективных с точки зрения прогрева, удобных в монтаже и ремонте. После рассмотрения отдельных предложений было принято решение о постановке на внутреннюю поверхность камеры омических нагревателей на основе кирс-кабеля типа КНМС - нихромовая одножильная проволока внутри оболочки из стали 12Х18Н10Т, в качестве изоляции - порошок из окиси магния. В каждом из 12 сечений были проложены по 4 ветви нагревателей. Длина каждой ветви ~ 7 м.

Перед тем, как установить нагреватели на внутреннюю поверхность силовых модулей были проведены исследования образцов кирс - кабеля на специальном вакуумном стенде с целью выяснения термомеханических, вакуумных, теплофизических и электрических характеристик кирс-кабеля [60].

Процесс газовой выделенной образцов кирс – кабеля исследовался при температурах 440°C и 740°C . Нагрев образцов происходил за счет внесения их в нагреваемую нагревателями трубку, находящуюся внутри вакуумной камеры стенда. Временные зависимости давления в вакуумной камере стенда при прогреве образцов показаны на рисунке 3.10 (кривые 1 и 2).

При нагреве образцов до температуры $T = 440^{\circ}\text{C}$ все временные зависимости давления $P(t)$ имели ярко выраженный максимум, время становления которого для различных образцов, составляло 5 - 6 минут (кривая 1). Временные зависимости доминирующих в спектре масс приведены на рисунке 3.11. Массы с высокими номерами не наблюдались.

Из рассмотрения зависимостей на рисунке 3.10 видно, что кривые давления при нагреве образцов имеют два ярко выраженных пика. Появление первого пика связано с обезгаживанием внешней поверхности оболочки кабеля, а второго пика - с задержкой процесса обезгаживания изолятора из окиси магния и внутренней поверхности оболочки кабеля.

Целью исследования диффузии газа через кирс - кабель являлось получение ответа на вопрос, какое натекание в камеру из атмосферы будет при возможном нарушении целостности внешней оболочки кабеля, проложенного внутри разрядной камеры Т-15. Для определения диффузии газового потока через окись магния исследовались образцы длиной 10, 20, 100 и 200 см. Конец кирс-кабеля, выходящий в атмосферу, снаружи закрывался специальным колпаком, который откачивался и заполнялся гелием. Контроль потока гелия в вакуумный объем через окись магния производился при помощи масс - анализатора.

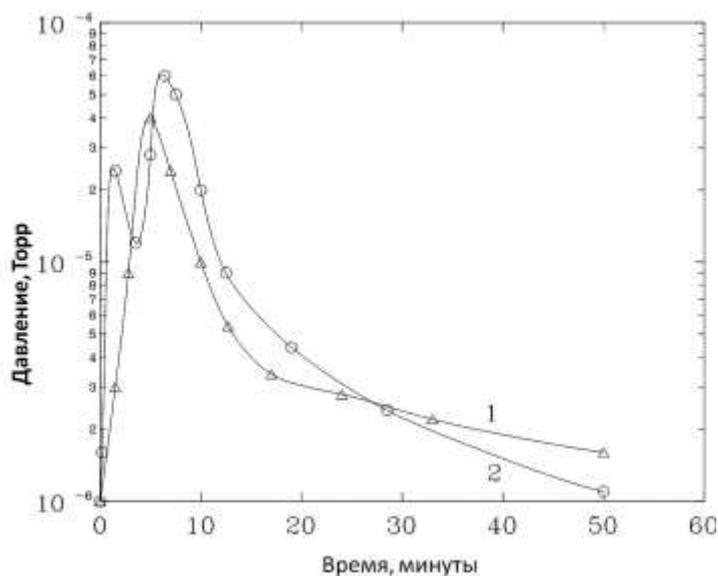


Рисунок 3.10 - Временные зависимости давления в камере при нагреве образцов кирс-кабеля до температур 440°C (кривая 1) и 740°C (кривая 2)

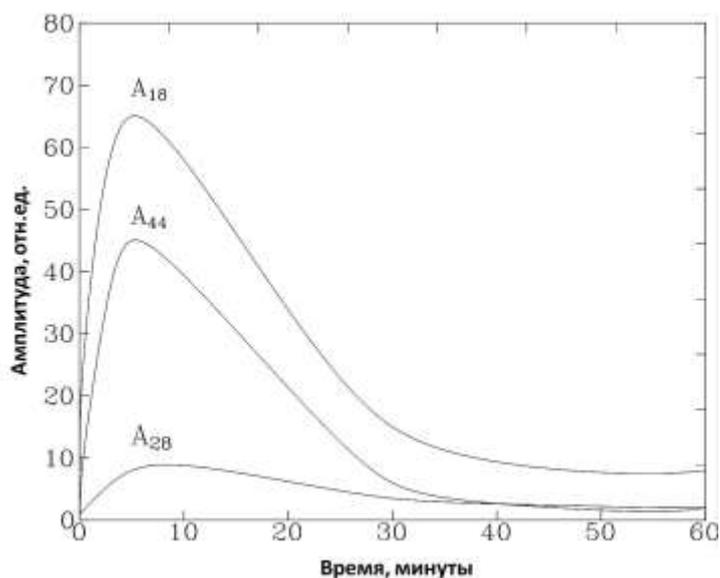


Рисунок 3.11 - Временные зависимости доминирующих масс спектра остаточного газа при нагреве образцов до температуры 440°C

После заполнения гелием колпака, примерно через два часа в вакуумном объеме появлялся гелиевый пик. Гелий проходил по кабелю длиной 10 см, находящегося при комнатной температуре. Величина натекания составляла $\sim 1.2 \cdot 10^{-7}$ л·Торр/с. При нагреве кабеля до температуры $\sim 700^\circ\text{C}$ натекание увеличивалось вдвое. Увеличение натекания при 5 - кратном термоциклировании не наблюдалось. Коэффициент диффузии гелия через окись магния, оцененный как $l^2/\Delta t$, равнялся $1.4 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Если предположить, что во всех 48 нагревателях, установленных в разрядной камере будет повреждена оболочка, суммарное натекание при температуре $\sim 600^\circ\text{C}$ составит $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ л·Торр/с. При повреждении оболочки кабеля, примерно на середине своей длины $L \sim 3.5$ м, время появления гелия в камере в процессе поиска течи, составило бы ~ 10 суток.

Одним из наиболее предпочтительных вариантов вывода кирс-кабеля из вакуумного объема являлся вывод, т.н. «холодных» концов - вывод вакуумноплотной оболочки кирс-кабеля. Естественно, что в этом случае, необходимо иметь температуру оболочки кирс-кабеля на уровне $30^\circ\text{C} \div 50^\circ\text{C}$ во избежание повреждения вакуумных уплотнений из-за термомеханических нагрузок. С этой целью было предложено приварить аргонодуговой сваркой

к оболочке кирс-кабеля $\varnothing 6$ мм нержавеющей трубку диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм, а к нихромовой проволоке $\varnothing 1.2$ мм приваривать медную проволоку диаметром 3 мм. Кроме того, в таком варианте вывода кирс-кабеля отсутствует вероятность электрических разрядов между нихромовой проволокой и элементами конструкции камеры.

Измерения температуры поверхности оболочки кабеля и приваренной к нему трубки проводились при давлении в камере $P \sim 1 \cdot 10^{-4}$ Торр хромель-копелевыми термопарами. На рисунке 3.12 приведены значения температур в различных точках кирс-кабеля в зависимости от протекающего тока. Температура поверхности кирс-кабеля на расстоянии 100 мм от герметизирующего фланца (Т1) при токе 30 А составляла $\sim 50^\circ\text{C}$. При токе 15 А температура Т1 не отличалась от температуры фланца и равнялась $\sim 20^\circ\text{C}$. Температура поверхности кирс-кабеля в измерительных точках 3 и 4 (вдали от выводов) составляла $\sim 560^\circ\text{C}$. Таким образом, выбранная конструкция выводов нагревателя удовлетворяла вышеназванным требованиям.

На рисунке 3.13 показана зависимость приведенной степени черноты ϵ системы нагреватель - стенка камеры от величины протекающего тока (I). Монотонное возрастание ϵ с ростом тока I, а также уменьшение парциального давления кислорода в камере свидетельствовало о протекании процесса окисления и «почернения» поверхности кабеля. При рабочем токе прогрева камеры Т-15 ожидаемая величина $\epsilon \sim 0.4$.

Сопротивление изоляции, измеренное с помощью 500В мегомметра, после процедур нагрева всех образцов кабеля не изменилось по сравнению с первоначальным, и составляло несколько МОм.

Расположение нагревателей на внутренней поверхности камеры показано на рисунке 3.14

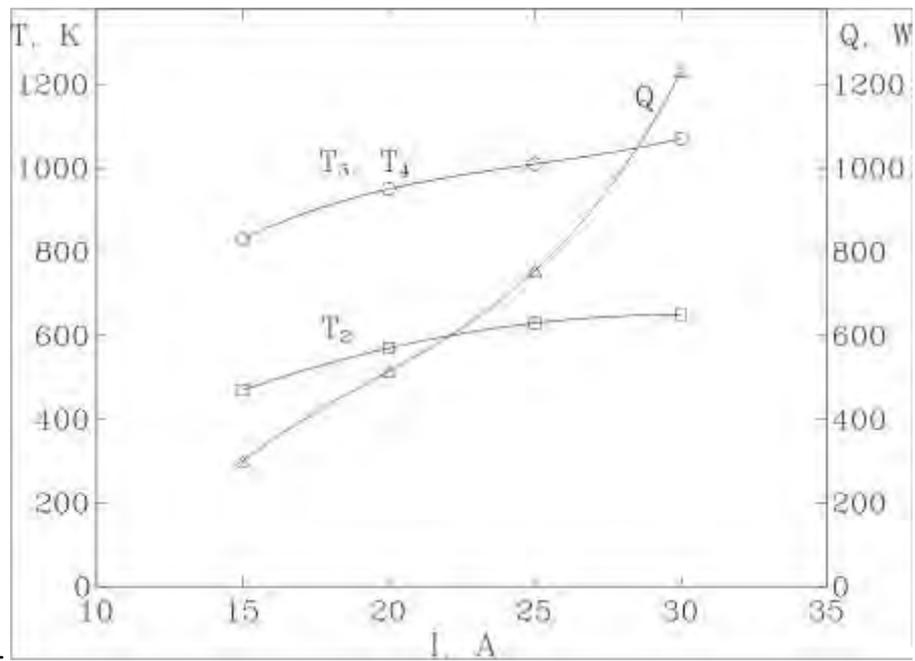


Рисунок 3.12 - Зависимость температуры кабеля в различных точках от протекающего тока. Q – Мощность нагрева

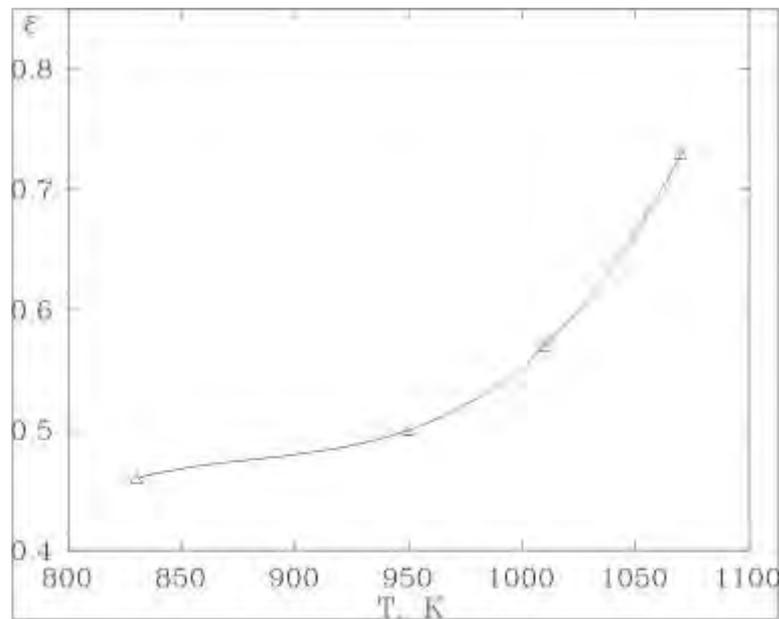


Рисунок 3.13 - Зависимость приведенного коэффициента черноты системы кабель – стенка в зависимости от температуры кабеля



Рисунок 3.14 - Расположение омических нагревателей из кирс-кабеля на внутренней поверхности камеры

Перед началом прогрева проводилась откачка криостата и разрядной камеры. Откачка осуществлялась: с атмосферы - механическими форвакуумными насосами, а начиная с давления $P \sim 2 \cdot 10^{-2}$ Торр - диффузионными и турбомолекулярными насосами. На рисунке 3.15 показан спектр остаточного газа в камере до начала прогрева, полученный с помощью масс-спектрометра МХ-7304, при вакууме в камере $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Торр. Основными компонентами газового состава являлись 18 масса - вода, а также - 28, 32 массы, что указывало на наличие, наряду с газовыделением стенок и внешнего натекания. Экспериментально определенная величина натекания в камеру составила $\sim 10^{-3}$ л·Торр/с.

Контроль температуры осуществлялся термопарами и платиновыми термометрами. Сигналы с термопар поступали в систему автоматизации эксперимента вакуумно-технологического комплекса, где проходили обработку, т.е. переводились в реальные температуры. Температура различных участков РК отображалась на экране монитора, на пульте оператора в виде таблиц, графиков и гистограмм.

Временной ход температур при прогреве силовых секций, защитных экранов и поверхности диафрагм в диапазоне мощностей прогрева $20 \div 75$ кВт показан на рисунке 3.16 [60].

В процессе прогрева, по мере роста температуры стенок камеры, существенно увеличивалась 18 масса, которая определяла общую величину давления в камере и, составляла $P = 1.5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Об эффективности процесса обезвоживания камеры при прогреве можно судить по изменению соотношения между парциальными давлениями 18 и 28 масс. В процессе прогрева, по мере роста температуры стенок камеры, существенно увеличивалась 18 масса, которая определяла общую величину давления в камере и, составляла $P = 1.5 \cdot 10^{-6}$ Торр.

Интенсивное газовыделение позволило снизить концентрацию водяных паров в камере после окончания прогрева и остывания ее до комнатных температур с $8 \cdot 10^{-7}$ Торр до $1 \cdot 10^{-7}$ Торр и уменьшить величину фонового давления с $P = 1 \cdot 10^{-6}$ Торр до $P = 1.5 \cdot 10^{-7}$ Торр.

На рисунках 3.17 - 3.19 показаны изменения во времени при мощности прогрева 75 кВт максимальной температуры камеры, давления в камере и отношения 18 к 28 массе (A_{18}/A_{28}), построенного по данным масс-спектрометрических измерений.

Система омического прогрева на базе кирс-кабеля позволила при меньшей мощности прогрева - 75 кВт, достичь той же температуры силовых секций 170°C , что и при прогреве камеры в проектном варианте, с уровнем вкладываемой в нагреватели мощности 130 кВт. Это позволило экономить до 18 тонн жидкого азота в сутки при прогреве камеры в режиме криостатирования азотных экранов.



Рисунок 3.15 - Спектр остаточного газа в разрядной камере до начала прогрева

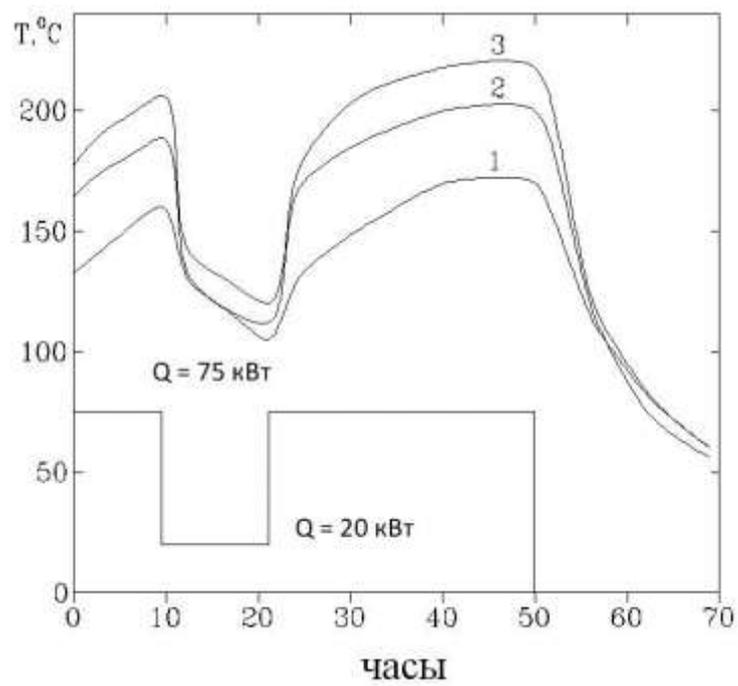


Рисунок 3.16 - Временной ход температур силовых секций (кривая 1), защитных экранов (кривая 2) и поверхности графитовой диафрагмы (кривая 3) при изменении мощности прогрева

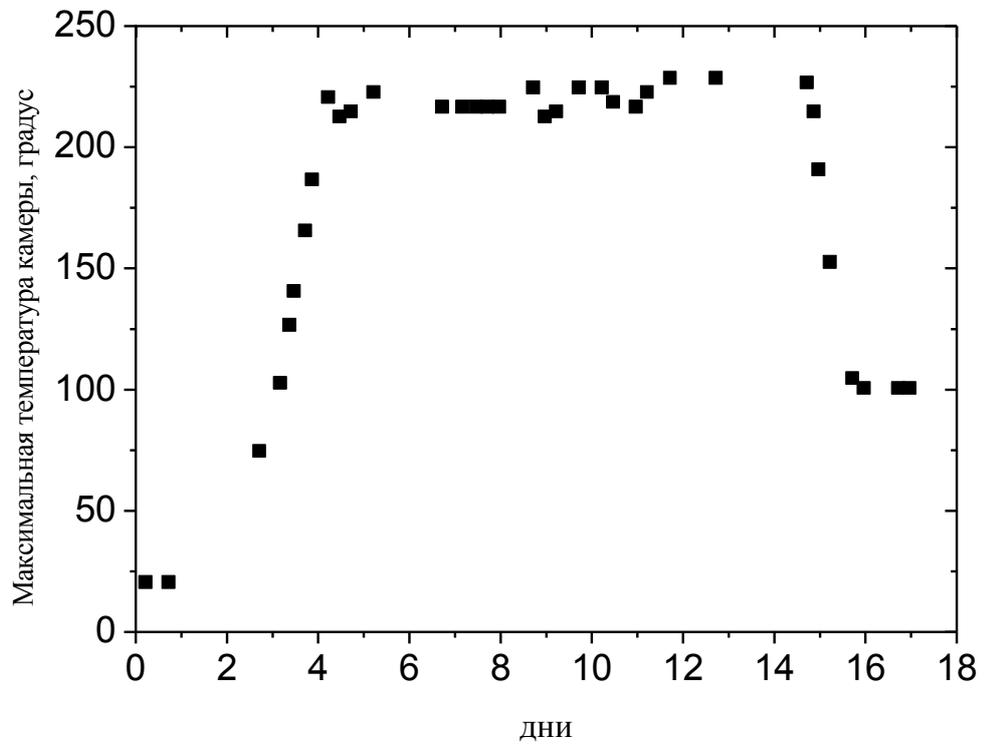


Рисунок 3.17 - Максимальная температура камеры во время прогрева

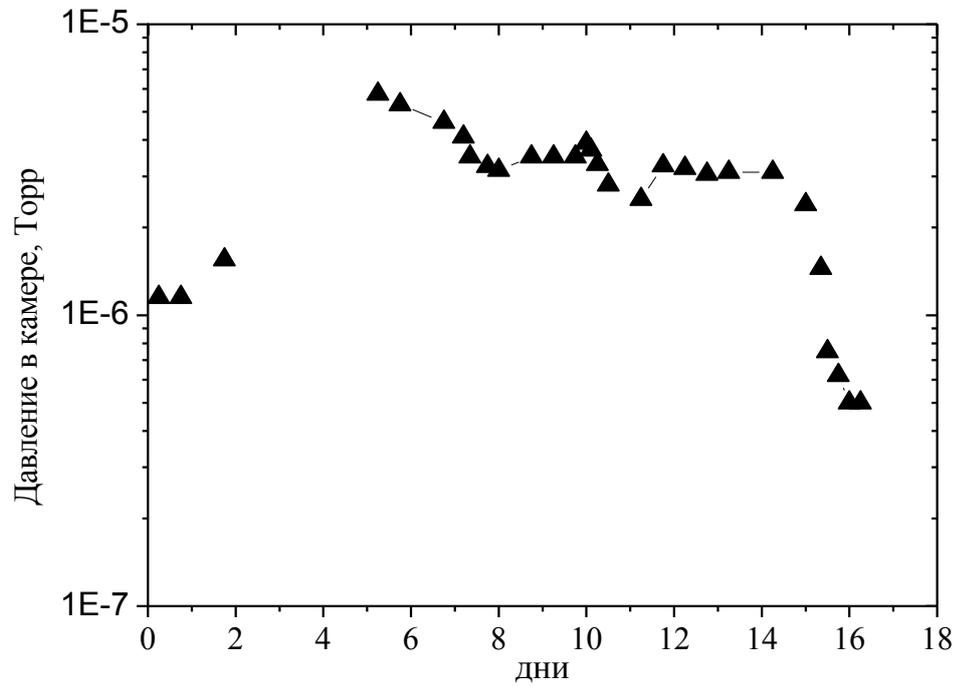


Рисунок 3.18 - Давление в камере во время прогрева

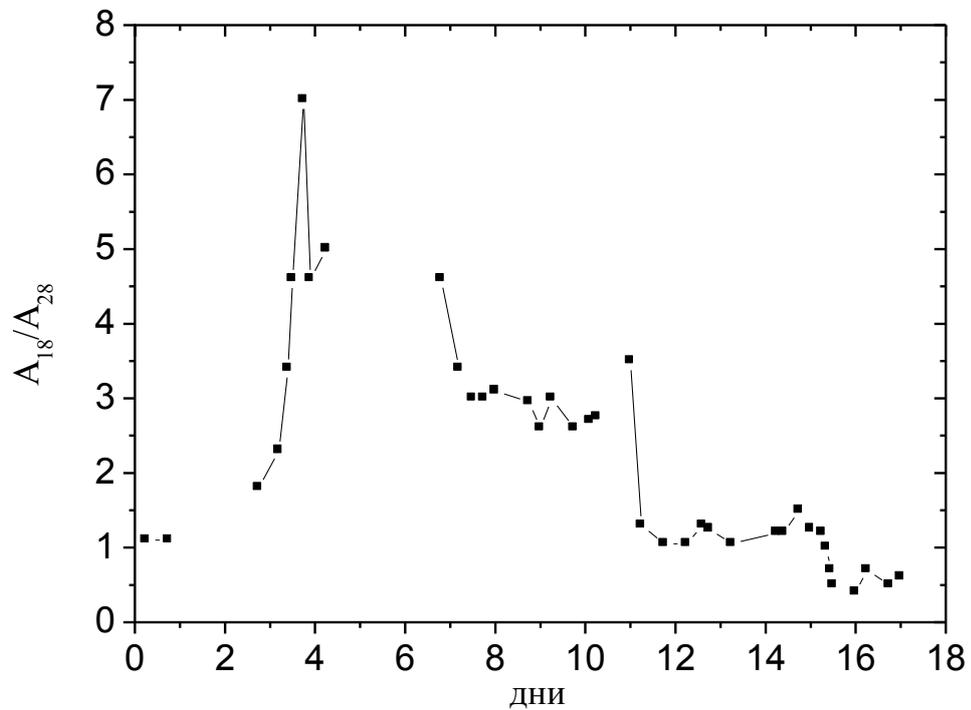


Рисунок 3.19 - Отношение масс A_{18}/A_{28} во время прогрева

3.4. Исследование кондиционирования стенок камеры в тлеющих разрядах

3.4.1. Методы и средства исследований

Для проведения режима тлеющего разряда на установке Т-15 имелись четыре подвижных штыря. Размещение штыря тлеющего разряда на установке Т-15 показано на рисунке 3.20. Каждый из 4 подвижных штырей через вакуумный затвор устанавливался на фланец верхнего вертикального патрубка токамака и обеспечивалось размещение электрода в произвольной точке от периферии до центра камеры токамака без нарушения вакуума в камере [61]. При необходимости, штыри могли быть удалены из камеры установки без нарушения вакуума.



Рисунок 3.20 - Штырь тлеющего разряда на установке

Система газонапуска, выполненная на основе пьезоклапанов, обеспечивала напуск различных газов: H_2 , He и их смесей с потоками в диапазоне 10^{-2} - 10^2 л·Торр/с. Парциальные давления газов измерялись с помощью 2-х монополярных спектрометров MX-7304, один из которых был оснащен системой дифференциальной откачки, позволяющей снимать спектр масс во время тлеющего разряда. Датчик другого спектрометра устанавливался непосредственно на камере и предназначался для снятия спектра между разрядами.

Горение разряда (рисунок 3.21 а,б) контролировалось визуально через кварцевые окна, расположенные в 3-х сечениях и позволяющие просматривать основную часть внутренней поверхности камеры.



Рисунок 3.21 а. Тлеющий разряд
в гелии



Рисунок 3.21 б. Тлеющий разряд
в аргоне

Для изучения взаимодействия плазмы тлеющего разряда 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. Коллекторный зонд находился во время экспозиции на радиусе $r = 0.75$ м и периодически (примерно раз в час) транспортировался в диагностическую камеру для анализа. В качестве материала зонда была выбрана нержавеющая сталь, являющаяся материалом поверхности камеры.

С целью оценки процессов адсорбции остаточного газа на поверхности и изучения явлений перепыления часть поверхности зонда закрывалась танталовой фольгой. Диагностируемые точки на окружности зонда устанавливались под Оже - анализатором и измерялся спектр Оже - электронов в области энергий $100 \div 900$ эВ, что позволяло идентифицировать такие элементы как С, Fe, Cr, Ni, O, Ta, S,

Cl, Ca, N, Ti. Из спектра Оже - электронов рассчитывалась относительная атомная концентрация элементов на глубине до 3-5 монослоев.

3.4.2. Параметры режимов тлеющего разряда

После окончания омического прогрева и остывания стенок камеры до температуры $80^{\circ}\text{C} \div 100^{\circ}\text{C}$ были проведены первые серии тлеющих разрядов. Основные параметры этих серий приведены в таблице 3.3. Основной целью этих серий являлось определение оптимальных параметров разряда: давления, скорости откачки, суммарного тока (4 штыврей), рода газа, температуры камеры - как на стадии пробоя, так и в фазе стабильного горения [59].

Таблица 3.3 - Параметры разрядов

Номер серии	Рабочий газ	Длительность горения, час	Температура камеры, $^{\circ}\text{C}$	Давление, мТорр	Суммарный ток разряда, А
1	H_2	5	90	$2 \div 4$	$8 \div 12$
2	H_2	6.5	100	4	10
3	H_2	7.5	115	4	10
4	H_2	10	20	3.2	$4 \div 8$
5	He	28	$140 \div 170$	$2.5 \div 3.5$	12
6	He	8	40	4	12

Пробой газа происходил при подаче напряжения на штыври $U = 4$ кВ и абсолютном давлении $P > 10 \div 15$ мТорр, и слабо зависел от рода газа. Стабильное горение разряда наблюдалось в диапазоне давлений и токов: $p = 2 \div 10$ мТорр, $I = 4 \div 16$ А. Напряжение разряда составляло $300 \text{ В} \div 400 \text{ В}$. Уменьшение давления при средних токах приводило к разогреву штыврей выше 500°C , а увеличение тока при средних давлениях сопровождалось дугообразованием и неустойчивым горением разряда. Наиболее оптимальным

условием с точки зрения максимального газоотделения со стенок являлись значения: $p = 4$ мТорр, $I = 12$ А. Изучение динамики 16 и 28 масс от скорости откачки камеры показало, что достаточной является скорость откачки ($2 \cdot 10^3$ л/с) соответствующая работе не менее 4 турбомолекулярных насосов.

3.4.3. Результаты измерений

Результаты измерений, полученные с помощью масс -анализатора и станции WASA можно разделить на несколько групп, отличающиеся родом газа (H_2 - и He - разряды) и диапазоном температур поверхности камеры. Эти разряды отличались, прежде всего, уровнем газоотделения и характерным временем спада интенсивности основных масс и концентраций элементов в течение разряда.

Спектры остаточных газов в разрядной камере указывали на существенное уменьшение давления основных масс, прежде всего водорода и сложных углеводородов, после окончания разряда. Давление в камере при этом определялось в основном 16 (CH_4), 18(H_2O) и 28 ($CO+C_2H_4$) а.е.м. На рисунке 3.22 показан временной ход интенсивности 28 а.е.м. в H_2 - и He - разрядах при различных температурах камеры [59]. Анализ полученных результатов показал, что разряды можно описать тремя основными параметрами: величиной парциального давления (P) в начале разряда и характерными временами t_1 и t_2 соответственно для начальной и стационарной фазы разряда. При этом следует отметить, что указанные параметры имели близкие значения как для 16 а.е.м., так и для 28 а.е.м.

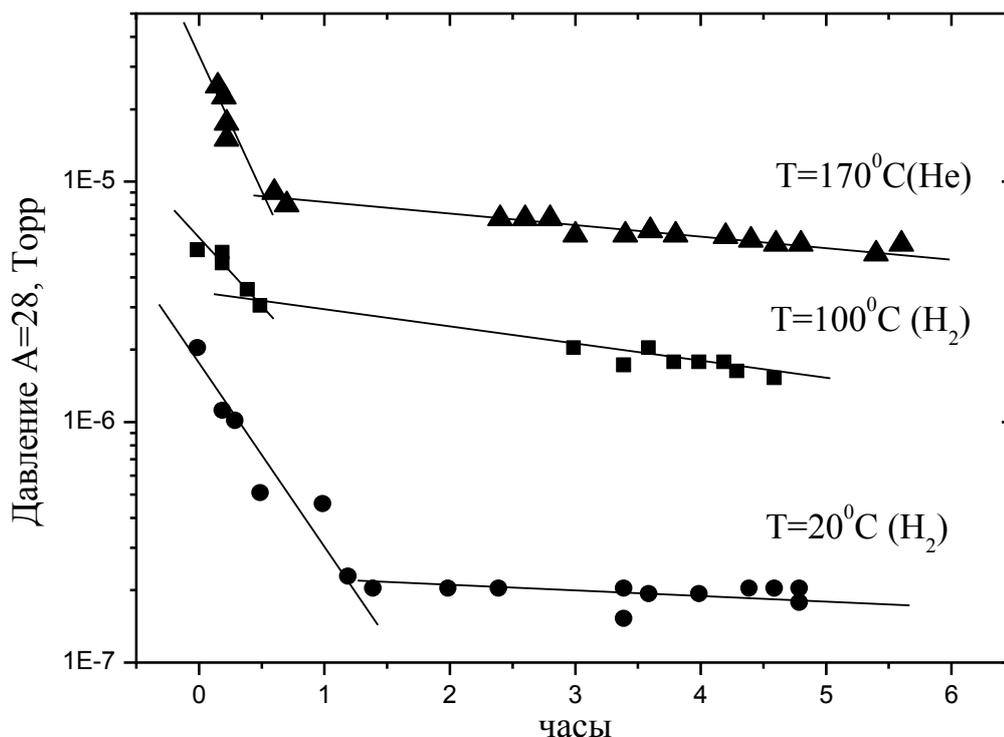


Рисунок 3.22 - Временной ход величины давления 28 а.е.м. в H_2 и He разрядах при различных температурах камеры

Величина парциального давления 28 массы в гелиевом разряде превышала аналогичную величину в водородном разряде при более низких температурах камеры, что можно было связать с преобладанием процессов физического распыления над химическим при низких температурах. В H_2 - разрядах при высоких температурах наблюдалось обратное соотношение этих процессов.

Величина t_1 , составляя 0.5 - 1 час, слабо зависела от рода газа и температуры камеры и определялась скоростью процесса удаления слабо связанных молекул углеводородов.

Величина t_2 , имея характерное значение 5 - 10 час при высоких температурах поверхности камеры, существенно увеличивалась в H_2 -разрядах по мере перехода в область низких температур и достигала значений $t > 30$ час. Время спада в He разрядах мало зависело от температуры, хотя было заметно некоторое увеличение t_2 по мере роста температуры камеры.

Параллельно с масс - спектрометрическими, велись измерения с помощью WASA станции (С.Н.Звонковым [59]). На поверхности коллекторного зонда были обнаружены следующие основные элементы: С, Fe, Cr, Ni, O, Ta, S, Cl.

Все проведенные разряды можно разделить подобно масс-спектрометрическим измерениям на три группы по временному ходу сигналов Fe и С. Во-первых, разряды в водороде при высоких температурах камеры, когда в течение первых 2-3 часов освобождаются адсорбированные камерой газы. После их откачки и следовательно уменьшении рециклинга углерода (С) сигнал Fe начинал расти, а С - падать, т.е. шел процесс очистки поверхности камеры от углеводородов (рисунок 3.23). Во-вторых, разряд в He при низких температурах, когда в течение первого часа легко освобождаемые газы откачивались и далее концентрации Fe и С почти не изменялись, т.е. процессы эрозии и осаждения уравнивались. И наконец, He- разряд, при котором существует характерное время спада С и роста Fe, не зависящее от температуры, т.к. происходил лишь процесс физического распыления поверхности камеры.

Таким образом, данные полученные с помощью масс - спектрометрии и WASA - станции согласовались между собой, указывая на одинаковую закономерность процессов, происходящих на поверхности и в объеме разрядной камеры во время тлеющих разрядов.

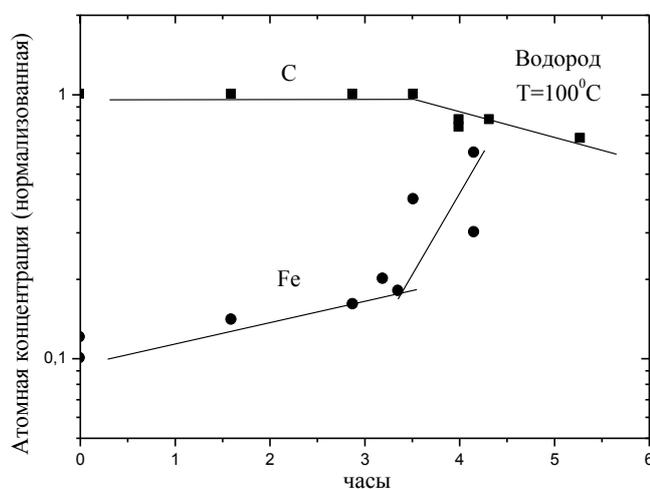


Рисунок 3.23 - Временной ход атомных концентраций (нормализованных) углерода и железа на поверхности коллекторного зонда

3.5. Выводы к главе 3

1. Эффективность штатной системы прогрева камеры нагревателями, расположенными на наружной поверхности камеры составляла менее 60%.

2. Создана система омического прогрева на базе нагревателей (кирс-кабеля), расположенных на внутренней поверхности камеры. Это позволило при меньшей мощности прогрева - 75 кВт, достичь такой же температуры силовых секций 170°C, что и при прогреве камеры в проектом варианте, с уровнем вкладываемой в нагреватели мощности 130 кВт и экономить до 18 тонн жидкого азота в сутки при прогреве камеры в режиме криостатирования азотных экранов.

3. В процессе прогрева камеры интенсивный процесс обезгаживания начинался при температурах 150°C ÷ 170°C. Интенсивное газоотделение позволило снизить концентрацию водяных паров в камере после прогрева и остывания ее до комнатных температур с давления $8 \cdot 10^{-7}$ Торр до давления $1 \cdot 10^{-7}$ Торр и уменьшить величину фонового давления с $P = 1 \cdot 10^{-6}$ Торр до $P = 1.5 \cdot 10^{-7}$ Торр.

4. Исследованы режимы тлеющего разряда в гелии и водороде и определены оптимальные условия их проведения ($P \sim 4$ мТорр, $I = 12$ А). На основе масс - спектрометрических и Оже - измерений можно заключить, что процесс очистки камеры наиболее эффективен в тлеющем H_2 - разряде при температурах поверхности камеры $T > 100^\circ C$.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКИ ТОРОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ

4.1. Общая характеристика и задачи исследования

Сверхпроводящая обмотка тороидального поля (СОТП) Т-15 является крупнейшей в мире сверхпроводящей магнитной системой (СМС) на основе ниобий - олова. Проектная величина запасенной энергии магнитного поля составляет 0.8 ГДж. К особенностям этой магнитной системы относится также применение циркуляционного охлаждения блоков обмотки и длинных (от 7 до 22 м) сверхпроводящих шинопроводов.

Создание такой СМС, позволяющей получать магнитные поля, необходимые для реактора, и демонстрация ее устойчивой работы в составе действующей термоядерной установки представительных размеров, являлось одной из главных целей сооружения установки Т-15. Альтернативный подход реализован в близкой по масштабам и параметрам установке TORE SUPRA [62], в которой используется погружная тороидальная магнитная система из ниобий-титанового проводника, охлаждаемого сверхтекучим гелием при температуре 1.8 К. Однако, этот вариант конструкции СМС в концептуальном проекте международного реактора ИТЭР был признан менее перспективным для создания реактора [63].

Исследования токонесущей способности СОТП Т-15 в собранном виде являлись завершающим этапом программы исследований, включавшей в себя исследования токонесущей способности коротких образцов, модельных обмоток различной конструкции, полномасштабных опытных и рабочих блоков [64,65,41]. Исследования СОТП в сборе означали совместную работу всех инженерных систем токамака и параллельное определение возможности обеспечения этими системами надежной работы СОТП в различных эксплуатационных режимах. Исследования СОТП должны были дать ответ о ее токонесущей способности на

том или ином температурном уровне, возможности нормальной работы в экспериментах с плазмой, определении условий ее безаварийной работы при нарушении сверхпроводимости.

4.2. Система питания СОТП

Система питания СОТП предназначена для ввода тока, поддержания его на заданном уровне, медленном и быстром выводе в случае возникновения нормальной фазы.

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 времени 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 τ равной 104 с, при этом максимальное напряжение на СОТП составляло ± 250 В.

В экспериментальных кампаниях 1988-1991 гг. при выводе энергии, обмотка разделялась на четыре симметричные секции, вывод тока в каждой из которых происходил на собственное разрядное сопротивление с заземленной средней точкой [66]. Наряду с достоинством этой схемы, когда параллельно секциям всегда присутствовало разрядное сопротивление, имелись и существенные недостатки. Во-первых, в связи с тем, что практически невозможно было осуществить одновременное разделение обмотки на четыре секции, в первый момент времени, на одной из секций обмотки возникало учетверенное максимальное напряжение вывода. Во-вторых, существовала опасность несимметричного вывода тока, что могло привести к большим некомпенсированным механическим усилиям на обмотку в целом.

Начиная с 1992 г., при защитном выводе энергии обмотка не разделялась на четыре секции, а разрядные сопротивления вводились между секциями, образуя вместе с преобразователем, который переводился в инверторный режим, так называемую "хороводную" схему, что обеспечивало одновременное одинаковое уменьшение тока во всех секциях (рисунок 4.1) [67].

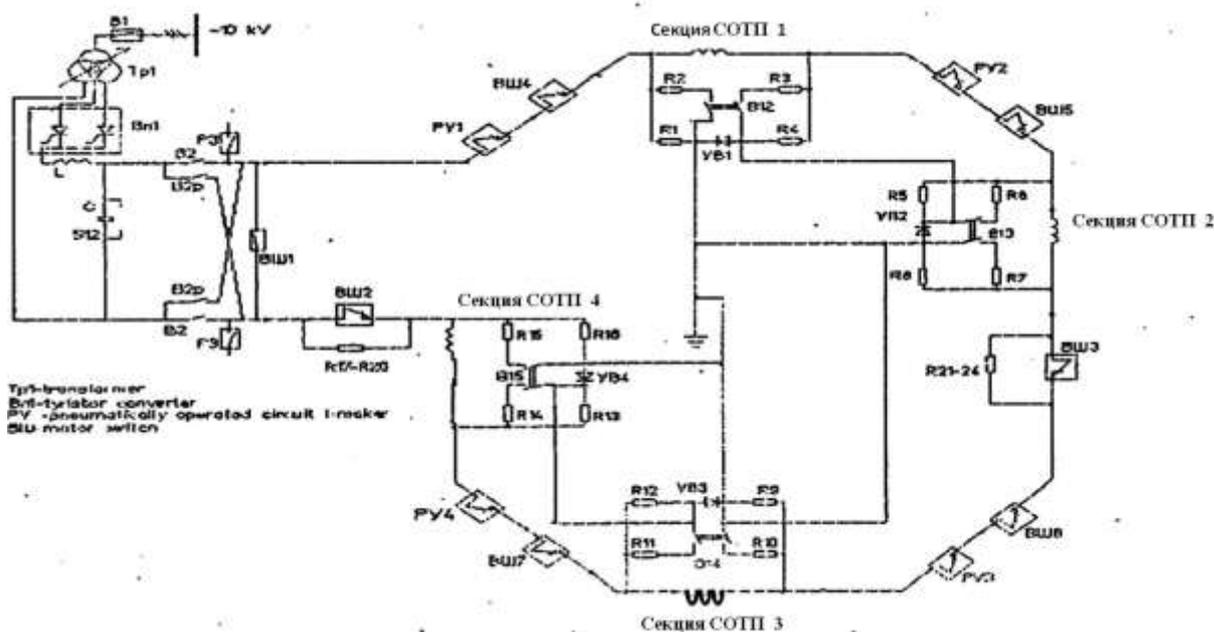


Рисунок 4.1 - Электрическая схема питания СОТТ

4.3. Система защиты СОТТ

4.3.1. Штатная система защиты СОТТ

В период 1988 ÷ 1991 гг. для защиты обмотки при возникновении нормальной фазы использовались схема и аппаратура, разработанные в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова [68]. Первоначально постоянная времени вывода энергии из обмотки τ была принята равной 26 сек. Однако, учитывая возможность электрических пробоев по газу в случае ухудшения вакуума при разгерметизации гелиевых коммуникаций во время защитного вывода тока (что имело место при

предварительных испытаниях рабочих блоков), значение τ было увеличено до 104 сек. Это соответствовало максимальному напряжению на обмотке относительно земли ± 250 В, при токе в СОТП 4 кА.

Увеличение времени вывода тока могло приводить к достаточно сильному разогреву перешедших в нормальное состояние участков обмотки. Поэтому, в отсутствие надежных экспериментальных данных, для снижения последствий замедленного вывода использовалось двукратное увеличение разрядного сопротивления в момент достижения тока, равного половине максимального. Кроме этого, программа испытаний была составлена таким образом, чтобы ограничить число переходов СОТП в нормальное состояние при токах, больших 3 кА.

Уставки системы защиты обмотки при возникновении нормальной фазы составляли по напряжению – 0.2 В, по длительности существования – 0.6 сек., защиты шинпроводов – 80 мВ и 0.6 сек, соответственно.

Для более подробного исследования СОТП применялась система дополнительной диагностики (СДД). Схема подключения каналов СДД к блокам обмотки (№№1-24) была идентична для каждой секции и показана на рисунке 4.2.

Аналоговые сигналы напряжений раскомпенсации в мостовых схемах СДД, измеренные с точностью ± 0.5 мВ, передавались в комплекс автоматизации эксперимента (КАЭ). В КАЭ на основе этих сигналов и измеренной мгновенной скорости изменения тока в обмотке, вычислялись абсолютные значения активных напряжений на блоках СОТП с точностью ± 5 мВ. Обработанные данные в виде гистограмм и числовых значений напряжений на обмотке выводились на монитор пульта управления и позволяли оператору контролировать состояние обмотки при вводе и поддержании тока.

Анализ активных напряжений, возникающих при появлении и развитии нормальной фазы, осуществлялся разработанной на базе персонального компьютера программы "кольцо", которая непрерывно вела обработку сигналов по 37 каналам с периодом опроса 400 мс и временем опроса 10 мс. Данная программа, используя ограниченный объем оперативной памяти, запоминала

данные за 120 секунд до момента перехода одного из блоков в нормальное состояние и 180 секунд спустя.

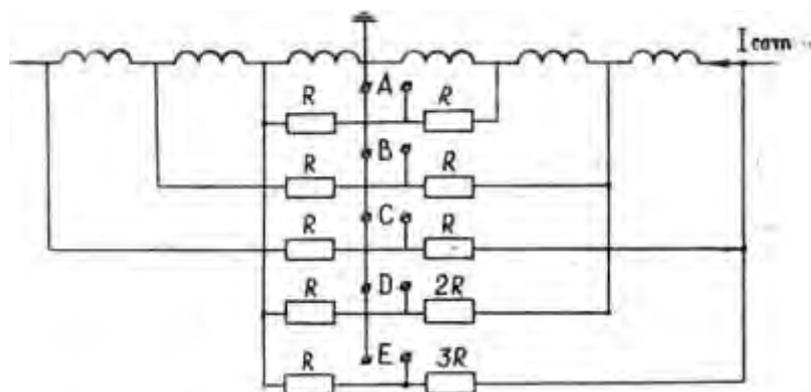


Рисунок 4.2 - Схема подключения каналов СДД к блокам обмотки

А - блоки: 5,11,17,23; В- блоки:4,10,16,22; С - блоки:3, 9,15,21;

Д -блоки: 6, 12, 18, 24; Е- блоки 7,13,19,1.

Кроме уровня электрических напряжений на СМС в программе "кольцо" измерялись значения токов в квадрантах, вакуум в криостате и блоке токовводов, температуры корпусов блоков, температуры гелии на входе и выходе каналов охлаждения обмоток, крайних галет, корпусов и шинпроводов.

Нарастание активного напряжения визуально контролировалось в каналах СДД. Срабатывание системы защиты происходило при достижении уровня напряжений заданных уставок. Большим недостатком системы защиты являлась сложность предварительной настройки электронных блоков, что приводило к большим потерям времени при компенсации индуктивных напряжений. Кроме этого, при включении схемы медленного вывода тока ($\tau = 500$ сек) и в других переходных режимах, в системе возникал сигнал, приводящий к переходу в режим быстрого вывода тока. Из-за влияния этих помех не удавалось использовать уставку защиты обмотки ниже 0.2 В, что также ограничивало возможность работы с токами, близкими к 4 кА.

Типичные осциллограммы поведения тока и напряжения в секциях обмотки при быстром выводе показаны на рисунке 4.3. Разница значений токов в

квadrантах составляла $3 \div 5 \%$, что не превышала погрешности измерений датчиков тока. Необходимо отметить, что эволюция напряжения носила монотонно убывающий характер (исключая скачок напряжения при увеличении разрядного сопротивления) во всем диапазоне изменения тока. Этот факт не согласовывался с высказанным в работе [69] предположением о значительном (в 5-20 раз) увеличении напряжения на обмотке в процессе вывода энергии по сравнению с возникающим напряжением в начальный момент вывода.

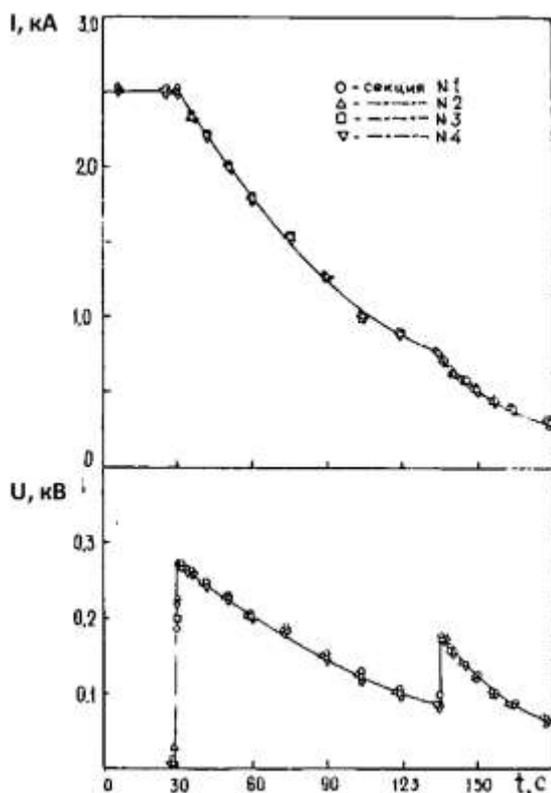


Рисунок 4.3 - Типичные осциллограммы поведения тока и напряжения в секциях обмотки при быстром выводе

4.3.2. Модернизированная система защиты СОТП

В начале экспериментальной кампании 1992 г. произошла авария в штатной системе защиты СОТП - возгорание одной из диагностических стоек в системе защиты СОТП. Причиной возгорания, по всей видимости, явилось замыкание на

землю одного или нескольких потенциальных концов. После аварии штатная система защиты СОТП не подлежала восстановлению.

В создавшейся ситуации, ввиду дефицита времени, в короткий срок была изготовлена упрощенная система защиты СОТП и токовых вводов. Система защиты СОТП состояла из четырех модулей, которые выдавали сигнал на вывод тока при появлении нормальной фазы в одной из секций СОТП и подводящих к ней шинопроводов. Для определения уровня уставок по амплитуде и длительности были проведены соответствующие расчеты.

4.3.3 Расчеты уровня уставок

4.3.3.1 Расчетная модель

Нарушение сверхпроводимости в магнитных системах сопровождается превращением запасенной энергии магнитного поля в тепловую энергию, которая идет на нагрев, как, собственно, части обмотки, перешедшей в нормальное состояние, так и защитных сопротивлений. Неоднородный разогрев части обмотки приводит к возникновению термомеханических напряжений, которые могут вызвать ее разрушение. Расчеты термомеханической прочности сверхпроводящей обмотки тороидального поля (СОТП) установки Токамак-15 показали, что максимальная температура нагрева обмотки не должна превышать $150\text{K} \div 160\text{K}$ [70, 71]. Для предотвращения разрушения обмотки при возникновении нормальной фазы осуществляется защитный вывод тока. При этом, чем быстрее происходит вывод тока, тем меньше нагрев обмотки. С другой стороны, скорость вывода тока не должна быть слишком высокой, чтобы возбуждаемое индуктивное напряжение на выводах обмотки не привело к электрическому пробое.

Возникновение и распространение нормальной фазы приводит к появлению и росту активного напряжения на части обмотки, перешедшей в нормальное состояние. Регистрация этого напряжения осуществляется в системе защиты

СОТП. Предельные уровни амплитуды и длительности этого напряжения, после превышения которых, осуществляется вывод тока, называются уставками системы защиты. Однако, существует ряд процессов, таких как начало ввода - вывода тока, выход тока на заданный уровень, включение полоидальных магнитных полей, подвижки блоков обмотки при вводе - выводе тока, рабочие импульсы с плазмой, которые также приводят к появлению сигналов, регистрируемых системой защиты как возникновение активного напряжения при развитии нормальной фазы. Следовательно, занижение уровня уставок приводит к увеличению вероятности ложных срабатываний системы защиты. В свою очередь, увеличение уровня уставок ведет к повышению температуры нагрева обмотки.

Были проведены расчеты по определению диапазона уставок, обеспечивающих защитный вывод тока без нагрева обмотки сверх допустимого уровня [70,71]. Температура обмотки определялась расчетным путем, так как экспериментальное ее измерение во множестве точек было затруднительно, тем более в процессах, критических для целостности обмотки. Аналогичные расчеты проводились в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова на стадии проектирования системы защиты СОТП [68], однако без учета экспериментальных данных по температурной зависимости удельного электрического сопротивления обмотки и скорости роста активных напряжений при нарушении сверхпроводимости в зависимости от тока в обмотке [67].

В начальный момент переход обмотки из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние происходит в одной отдельной точке. После чего, вследствие омического разогрева, теплопроводности стабилизирующей меди и межвитковой изоляции, нормальная фаза начинает распространяться как вдоль, так и поперек СТНЭ. Максимальная температура нагрева T_{\max} , зависящая от сценария вывода тока из обмотки, будет в точке зарождения нормальной фазы.

Для расчета температуры нагрева воспользуемся уравнениями теплового баланса для нагрева проводника и гелия:

$$(c_m \rho_m^v S_m + c_u \rho_u^v S_u) dT_m / dt = I^2(t) \rho / S_m - 2\alpha P(T_m - T_e) \quad (4.1)$$

$$c_2^p \rho_2^v S_2 dT_2/dt = \alpha P(T_M - T_2) \quad (4.2)$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения: T - температура, c - теплоемкость, ρ^v - объемная плотность и S - площадь сечения. Индексы «м», «и», «г» относятся к стабилизирующей меди, межвитковой изоляции и гелию, соответственно. $I(t)$ - текущее значение тока; $\rho(B, T)$ - электропроводность стабилизирующей меди; α - коэффициент теплопередачи между стенкой канала и гелием; P - омываемый периметр канала.

Первое уравнение описывает нагрев стабилизирующей меди и межвитковой изоляции. Второе уравнение описывает нагрев охлаждающего гелия при изобарическом процессе.

Температурные зависимости теплоемкостей меди и изоляции, используемые в расчетах, представлены на рисунке 4.4. Уменьшение плотности гелия с ростом температуры задавалось зависимостью, представленной на рисунке 4.5.

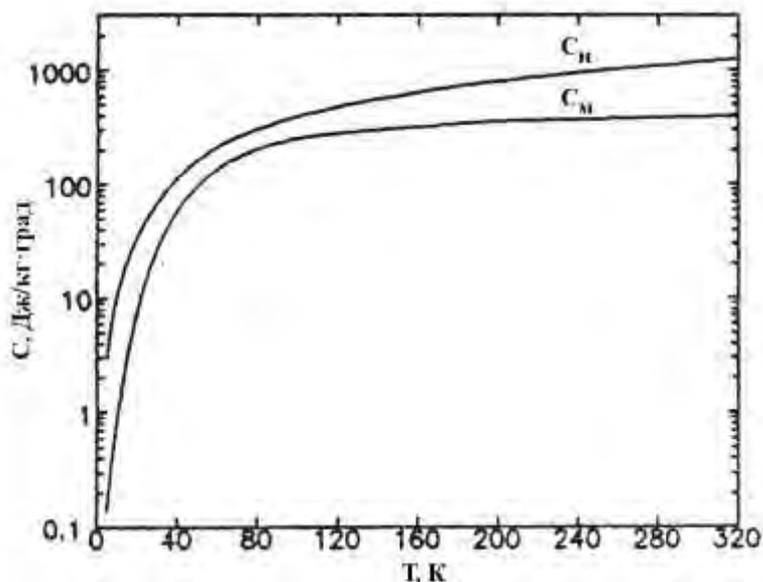


Рисунок 4.4 - Температурные зависимости теплоемкостей меди и изоляции

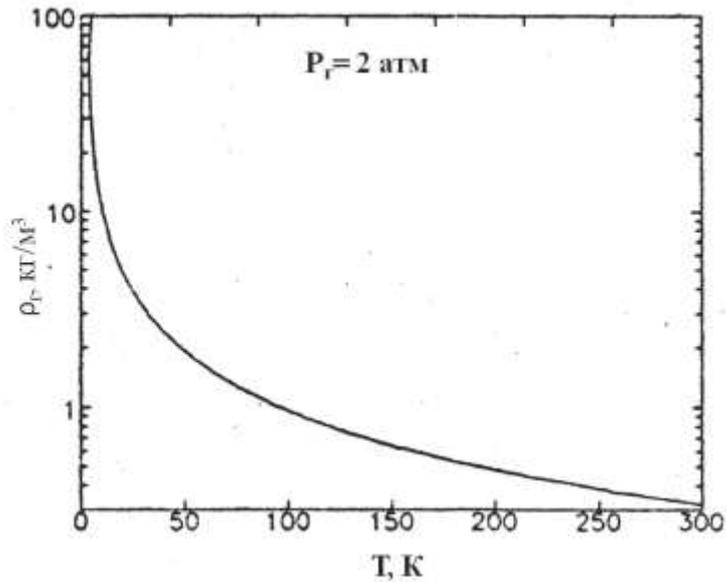


Рисунок 4.5 - Температурная зависимость плотности гелия от температуры

Зависимость удельного электрического сопротивления стабилизирующей меди от величины поперечного магнитного поля рассчитывалась по соотношению [72]:

$$\rho(B, T) = \rho(T)[1 + 2.7 \cdot 10^{-3} B(t) \rho_{300} / \rho(T)] \quad (4.3)$$

На рисунке 4.6. приведены значения $\rho(T)$, измеренные с точностью 10% в диапазоне температур 20К ÷ 300К [67]. Максимальная температура нагрева существенно зависит от величины $\rho(T)$ в области температур $T \leq 40$ К. Необходимо отметить, что стабилизирующая медь СТНЭ Т-15 характеризовалась относительно высоким значением соотношением $\rho_{300\text{K}}/\rho_{20} = 360$.

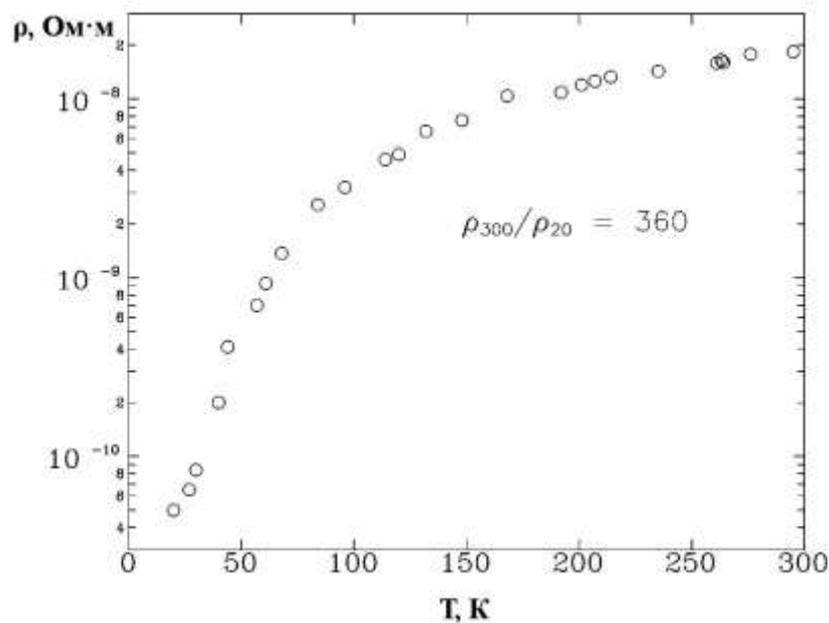


Рисунок 4.6 - Температурная зависимость удельного электрического сопротивления стабилизирующей меди.

В расчетах величина $V(t)$ бралась равной $V^{\max}(t)$, определяемой для тороидальной обмотки из соотношения:

$$V^{\max}(t) \approx 1.615 \cdot 10^{-3} I(t) \quad (4.4)$$

так как предполагалось, что зарождение нормальной фазы происходит в области максимального тороидального поля.

Величина коэффициента теплоотдачи α вычислялась из соотношений (4.5)÷(4.9):

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d \quad (4.5)$$

$$Nu = 2.3 \cdot 10^{-2} Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (4.6)$$

$$Re = v \rho d / \eta \equiv 4m / \pi d \eta \quad (4.7)$$

$$Pr = c^p \eta / \lambda \quad (4.8)$$

$$\eta = 5.0233 \cdot 10^{-7} T^{0.33} \quad (4.9)$$

где: Nu , Re , Pr - числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; λ , η - коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости гелия,

соответственно; d - диаметр охлаждающего канала; \dot{m} - массовый расход гелия; а соотношения (4.5) и (4.9) - уравнения Крауссольда и Кеезома [73], соответственно.

На рисунке 4.7 представлены температурные зависимости коэффициента теплоотдачи для трех значений суммарного расхода гелия через СОТП ($\dot{m} = 0.1$ кг/с, 0.2 кг/с и 0.4 кг/с). В расчетах использовались значения α для расхода гелия $\dot{m} = 0.1$ кг/с, соответствовавшего экспериментальным условиям.

В расчетах температурные зависимости параметров c_m , $c_{и}$, ρ_r^V и $\rho(T)$ (см. рис. 4.4 - 4.6) задавались в табличном виде, а для получения значений между точками использовалась параболическая интерполяция.

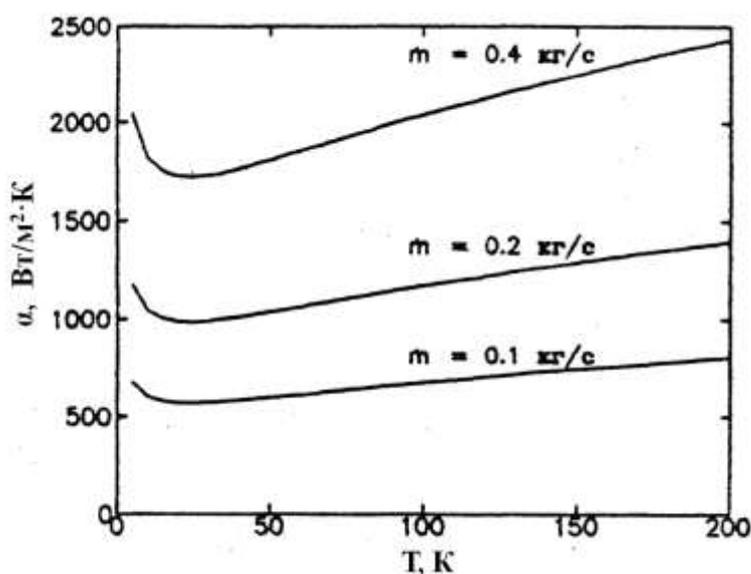


Рисунок 4.7- Температурные зависимости коэффициента теплоотдачи для трех значений суммарного расхода гелия через СОТП ($\dot{m} = 0.1$ кг/с, 0.2 кг/с и 0.4 кг/с)

4.3.3.2. Программа для расчета нагрева обмотки

Расчеты проводились с использованием программы, разработанной А.Н.Чудновским, для решения системы дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производной [70]. Программа использует удобный интерфейс ввода и изменения коэффициентов системы уравнений, начальных значений и других параметров, необходимых для проведения

расчетов, и снабжена системой графического отображения результатов вычислений. Программа была написана на языке FORTRAN и предназначена для выполнения расчетов на персональных компьютерах. В качестве иллюстрации на рисунке 4.8. показан пример графического представления результатов расчета. В левом верхнем углу представлен временной график защитного вывода тока с уровня 4 кА: время задержки выводе составляло 5с, постоянная вывода τ до достижения половины начального уровня равнялась 100с, а с уровня 2 кА - 50с; в нижнем левом углу - временная зависимость максимальной температуры обмотки; в верхнем правом – плотности энергии $w = \int j^2 \rho dt$ (Дж/см³), выделившейся в месте зарождения нормальной фазы; в нижнем правом - скорости распространения нормальной фазы V_t . Программа рассчитывала скорость

распространения нормальной фазы V_t , как $V_t \approx \sqrt{-d\chi/dt}$, где $\chi = \lambda_M / c_M \cdot \rho_M^v$ -

температуропроводность меди, что, как будет показано в (4.5.2.2.), хорошо согласовывалось с результатами расчетов адиабатической скорости распространения нормальной фазы полученной из решения уравнения теплопроводности.

Справа от рисунка выводятся значения задаваемых параметров модели: I_0 , А - начальный уровень тока в СОТП, T_{out} , с – время задержки вывода тока после зарождения нормальной фазы, τ_{in} , с - начальная постоянная вывода токе, I_1 , А - уровень тока, с которого постоянная вывода тока уменьшается вдвое. Остальные три параметра служат для управления решением и принимают значения 0 или 1. Если все эти три параметра равны 1, решается полная система уравнений (1,2). Задание параметра $He\ 1/0$ равным 0 позволяет исключить из уравнения (I) член, связанный с теплоотдачей от меди к гелию. Нулевое значение параметра $Ins1/0$ означает исключение из расчетов теплоемкости изоляции, а нулевое значение $THe1/0$ обеспечивает проведение расчетов при неизменной температуре гелия.

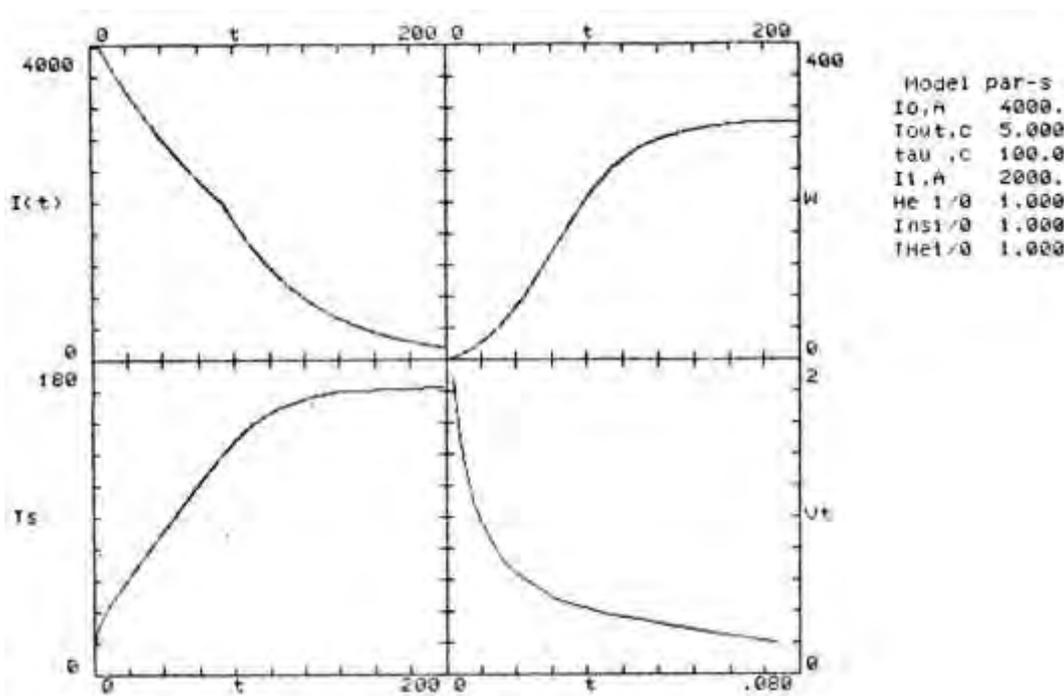


Рисунок 4.8 - Пример графического представления результатов расчета. I – ток в СОТП; T_s - температура нагрева стабилизирующей меди проводника; V_t - скорость распространения нормальной фазы (м/с); w – плотность энергии (Дж/см³), выделившаяся в месте зарождения нормальной фазы

4.3.3.3. Результаты расчетов

Результаты расчетов максимальной температуры нагрева СТНЭ (T_{\max}) в зависимости от исходного уровня тока в обмотке при мгновенном после нарушения сверхпроводимости начале вывода энергии приведены на рисунке 4.9. Кривые 1 и 2 получены для случая экспоненциального уменьшения тока с постоянными времени $\tau = 100$ с и $\tau = 50$ с соответственно, кривая 3 - для линейного спада тока. Вывод тока по линейному закону, то есть при постоянном напряжении, естественно обеспечивает меньший нагрев СТНЭ по сравнению с экспоненциальным, с таким же уровнем начального напряжения. Так при линейном выводе тока с уровня 4 кА за время 100 с, максимальная температура нагрева обмотки (кривая 3), примерно, на 75 градусов ниже по сравнению с экспоненциальным выводом с $\tau = 100$ с (кривая 1). Реализация системы линейного

вывода тока технически сложнее экспоненциального. Тем не менее, такое сравнение показывает, что приближение к линейной системе вывода в виде нескольких экспонент с последовательно уменьшающимися значениями τ позволило бы существенно снизить максимальную температуру нагрева СТНЭ.

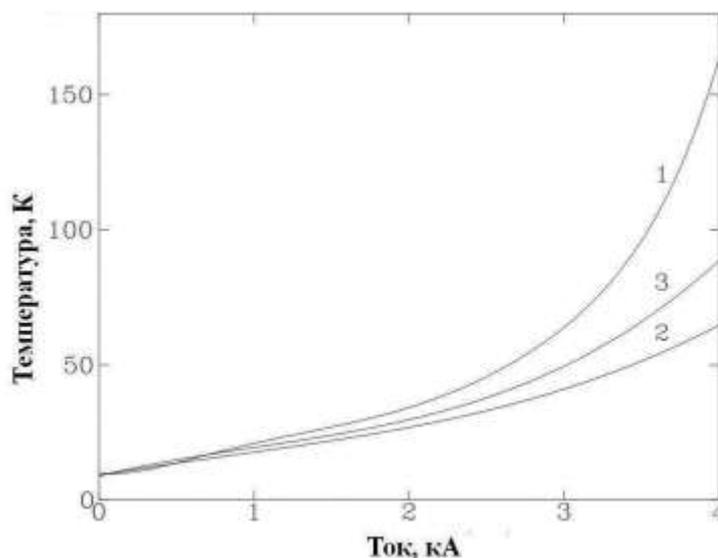


Рисунок 4.9 - Максимальная температура нагрева СТНЭ ($T_{\text{макс}}$) в зависимости от исходного уровня тока в обмотке. Кривые 1 и 2 - экспоненциальное уменьшение тока с постоянными времени $\tau = 100$ с и $\tau = 50$ с соответственно, кривая 3 - линейный спад тока

Из рассмотрения зависимостей рисунка 4.9 видно, что с точки зрения допустимых термомеханических напряжений ($T_{\text{макс}} \approx 150$ К), возможно было бы осуществлять вывод тока из обмотки даже с $\tau = 100$ с вплоть до значений $I = 4$ кА. Однако, по указанным выше причинам, включение системы защитного вывода энергии с близкой к нулю задержкой приводило бы к высокой вероятности ложных срабатываний.

На рисунке 4.10. приведены расчетные зависимости максимальной температуры нагрева СТНЭ ($T_{\text{макс}}$) от времени задержки вывода для начальных значений токов равных 2 кА, 3 кА и 4 кА. В этих расчетах вывод тока с уровней 2 кА и 3 кА осуществлялся с одной постоянной $\tau = 100$ с, а с уровня 4 кА - по сценарию, показанному на рисунке 4.8, то есть, начиная с тока в 2 кА постоянная

спада уменьшалась в два раза. Видно, что для тока 4 кА время задержки начала вывода не должно превышать ~ 5 с ($T_{\max} \approx 150 \text{ К} \div 160 \text{ К}$).

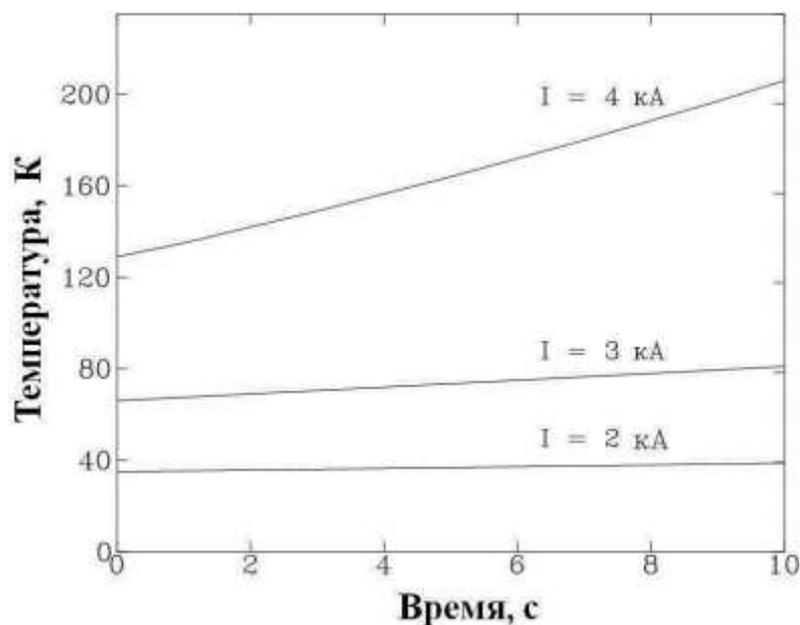


Рисунок 4.10 - Расчетные зависимости максимальной температуры нагрева СТНЭ (T_{\max}) от времени задержки вывода для начальных значений токов равных 2 кА, 3 кА и 4 кА

Выбор значений уставок системы защитного вывода тока в значительной мере зависит от исходного уровня тока в СОТП. Очевидно, что наиболее жесткие ограничения на диапазон возможных уставок накладывались для максимального тока в СОТП, который, как показали испытания [67], составлял ~ 4 кА. Выбор уставок системы защиты, соответствующих максимальному току в СОТП, в качестве рабочих для всего диапазона токов позволяет упростить эту систему. С другой стороны, использование защитных уставок, зависящих от тока в СОТП, могло бы снизить вероятность ложных срабатываний системы защиты при токах ниже 4 кА.

Рассмотрим возможный диапазон уставок системы защиты для случая максимального тока в 4 кА.

Для того, чтобы рассчитать требуемый диапазон уставок обратимся к экспериментальным данным по динамике нарастания активных напряжений при

распространении нормальной фазы для различных токов, инициирующих переход СОТП в нормальное состояние, приведенным на рисунке 4.11.

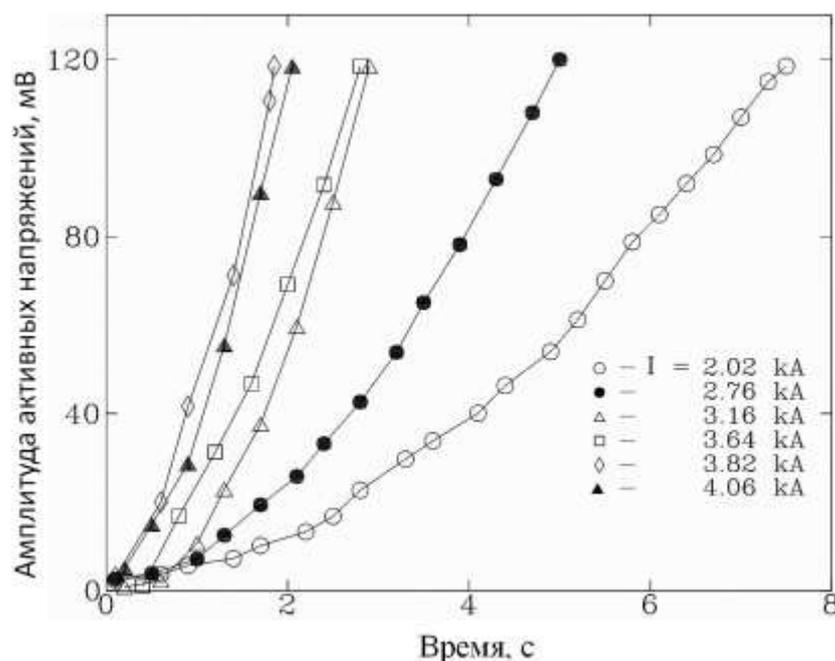


Рисунок 4.11 - Нарастание активных напряжений при распространении нормальной фазы для различных токов, инициирующих переход СОТП в нормальное состояние

Воспользуемся данными конкретно для тока 4060 А. В согласии с результатами расчетов (рисунок 4.9) принимаем, что допустимая задержка вывода тока с этого уровня составляет ~ 5 с. Тогда, если задаться уставкой по напряжению в 100 мВ, вывод тока должен быть начат не позже, чем через 3.2 с после ее превышения, так, чтобы суммарное время после начала перехода в нормальное состояние не превысило 5 с. Такие рассуждения для других значений уставки по напряжению позволяют построить диаграмму, представленную на рисунке 4.12. Кривая, которая могла быть получена аналогичным образом для значения тока меньшего 4 кА, была бы расположена выше кривой (рисунок 4.12), так как допустимое время ожидания тем больше, чем меньше исходный уровень тока (см. рисунок 4.10). Следовательно, любая комбинация уставок, находящаяся в области под кривой (рисунок 4.12), обеспечивает условия, в которых

термомеханические напряжения не превышают допустимых значений. Конкретный выбор уровней уставок определялся в зависимости от амплитуды и длительности ложных сигналов, не связанных с переходом обмотки из сверхпроводящего в нормальное состояние. Для токов в СОТП ≤ 4 кА был выбран одинаковый уровень уставок: 80 мВ, 4 с. На рисунке 4.13 показана работа системы защиты при защитном выводе тока 4060 А.

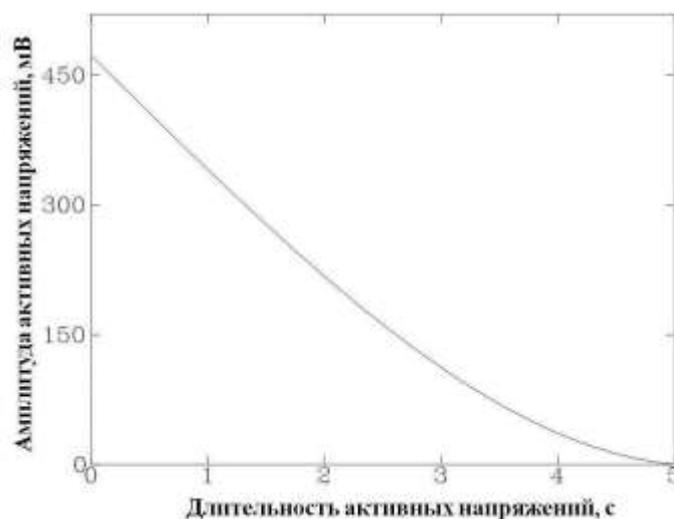


Рисунок 4.12 - Диаграмма уровней уставок для токов в СОТП $I \leq 4$ кА.

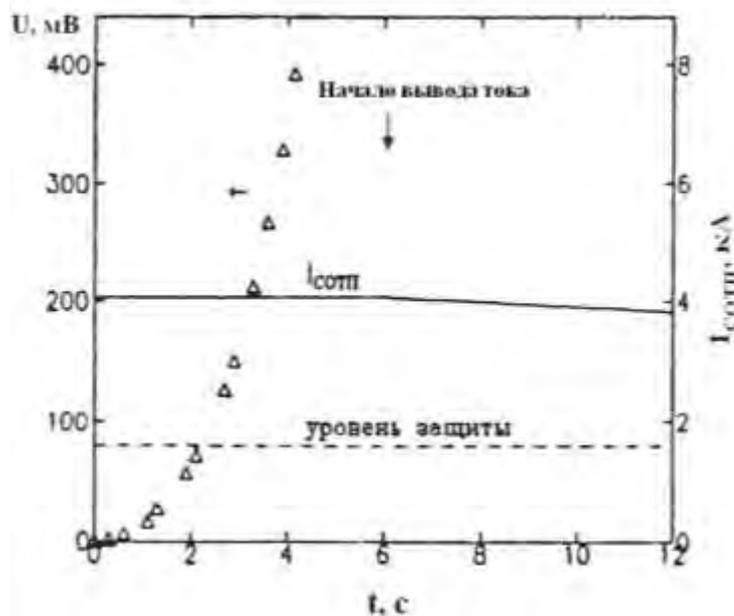


Рисунок 4.13 - Иллюстрация работы системы защиты СОТП при возникновении нормальной фазы. Δ - нарастание активного напряжения, уровень уставки в системе защиты - 80 мВ, длительность - 4 с.

4.3.3.4 Заключение

1. Проведены расчеты максимальной температуры нагрева СТНЭ в результате возникновения нормальной фазы для токов $I \leq 4$ кА, в зависимости как от постоянной времени вывода энергии, так и задержки начала вывода.
2. Показано, что при мгновенном начале вывода тока с уровня 4кА нагрев СТНЭ приводит к повышению температуры, при которой не достигается предел по допустимым термомеханическим напряжениям.
3. Показано, что с точки зрения допустимых термомеханических напряжений задержка начала вывода тока с уровня 4 кА не должна превышать ~ 5 с.
4. Определен диапазон уставок системы защиты СОТП для токов до 4кА.

4.4. Зависимость токонесущей способности СОТП от температуры

Важной характеристикой СОТП для оценки перспективности метода «~~я~~мотка-отжиг» при создании крупных сверхпроводящих магнитов на основе Nb_3Sn является зависимость токонесущей способности СОТП от температуры. Ее знание необходимо и для обеспечения надежной работы токамака Т-15 в различных режимах с плазмой.

Все полученные в предшествующих исследованиях данные по токонесущей способности как коротких образцов проводника Т-15, так и проводника Т-15 в модельных, опытных и рабочих катушках должны были быть дополнены результатами испытаний СОТП в сборе. Без этого невозможно было получить уточненное описание этой зависимости и обеспечения проведения различных рабочих режимов токамака. Это связано, в первую очередь, с тем очевидным обстоятельством, что токонесущая способность проводника Т-15, особенно если он имеет возникшие при обращении с ним дефекты, весьма чувствительна к его напряженно-деформированному состоянию и к тому, в каком магнитном поле находятся участки проводника с дефектом. Само это напряженно-деформированное состояние проводника, когда он испытывается в виде

отдельной катушки, будь то модельная катушка или одиночный рабочий блок, отличается от его состояния в собранной воедино тороидальной магнитной системе, также как и отличается распределение магнитного поля по объему катушки в этих двух случаях.

Токонесущая способность СОТП исследовалась в интервале температур от 4.7К ÷ 12К [74,75,76,77,78,79,80,81]. Представление полученных данных в совокупности с данными о незапланированных переходах СОТП в нормальное состояние при увеличении тока, росте температуры обмотки или падении расхода хладагента проводилось по произведению тока перехода на индукцию максимального магнитного поля на обмотке в зависимости от входной температуры хладагента - гелия. Поскольку для СОТП Т-15 $B_{\text{макс}}(T) = 1.615 \cdot I_{\text{СОТП}}$ (кА), то фактически исследовалась функция $1.615 \cdot I_{\text{СОТП}}^2 = f(T_{\text{He,вх}})$.

Выбор входной температуры гелия в качестве одного из параметров обуславливался следующими причинами. Во-первых, как показали результаты первых испытаний, при токах близких к критическим значениям, рост активных напряжений на обмотке соответствовал изменению температуры входа, а не выхода [76]. Во-вторых, на выходную температуру влияет ряд факторов таких как, стационарная и резистивная тепловые нагрузки, условия охлаждения корпусов и т.д.

При исследовании в диапазоне температур 6К ÷ 12К температурный режим СОТП обеспечивался работой двух ожижителей ОГ-800. Один из них работал в рефрижераторном режиме с расходом 230 кг/час при температуре 11К ÷ 12К, а другой - в ожижительном режиме с производительностью 320 л/час и подливом части жидкости в прямой поток. Для понижения температуры СОТП в схему криостатирования включался рефрижератор РГ-2000, при этом обе установки ОГ-800 работали в ожижительном режиме. Минимальная температура достигалась в этой схеме при расходе гелия через СОТП 730 кг/час и расходе через токовводы 23 кг/час и составляла на входе в СОТП 4.7 К, а на выходе 5.2К.

Результаты экспериментов приведены на рисунке 4.14, на котором указаны не только значения произведения $I_{\text{СОТП}} \times B_{\text{макс}}$ при различных температурах, но и

номер блока обмотки (по нумерации СОТП в сборе), инициировавшего переход обмотки в нормальное состояние. Символом (*) отмечены блоки, которые перешли в нормальное состояние, но точно не были идентифицированы в предыдущих испытаниях СОТП (1989-1990 гг.).

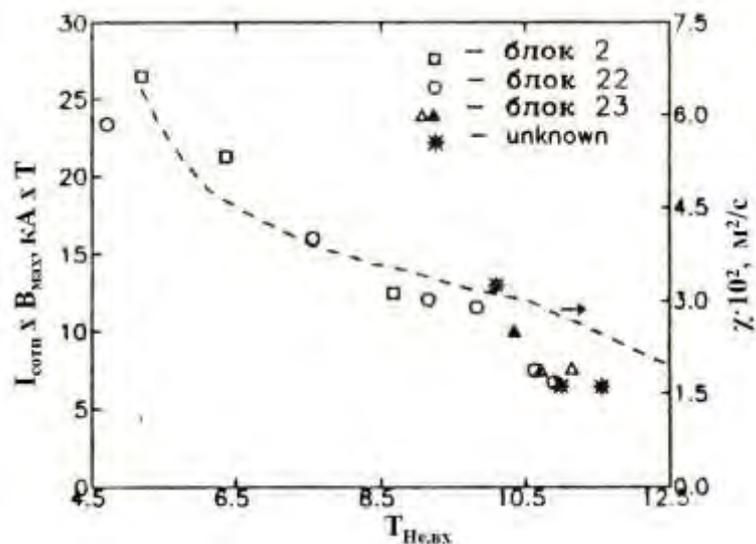


Рисунок 4.14 - Температурные зависимости токнесущей способности СОТП ($I_c \times V_{max}$) и температуропроводности стабилизирующей меди (χ)

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. При этом вблизи проектных рабочих температур и расходах хладагента, т.е. при низких температурах и больших расходах, переход происходил в блоке №2, а при повышенных температурах и сниженных расходах - в блоках №22 и №23. Блок №2 по нумерации СОТП в сборке, в испытаниях одиночных блоков соответствовал блоку №8 и, как видно из данных приведенных на рисунке 1.11 (см.гл.1.), характеризовался заметной резистивностью одной из катушек. Блоки №22 и №23, при испытаниях в виде одиночных блоков (соответственно №12 и №13 рисунок 1.11), также имели повышенную, по сравнению со средней резистивность - мощность тепловыделений, при испытательном токе 6.9 кА, составляла 50Вт ÷ 60 Вт.

Для проверки возможности длительного поддержания номинального режима в обмотку был введен ток 4 кА, при входной температуре гелия 4.7 К и

массовом расходе 730 кг/час, который находился в ней в течение 8 часов, а затем был выведен без перехода обмотки в нормальное состояние.

Этими экспериментальными данными, достаточно близкими к экспериментальным данным испытаний одиночных рабочих блоков, была подтверждена возможность надежного обеспечения сверхпроводящим тороидальным магнитом номинального режима работы токамака Т-15.

Экстраполяция температурной зависимости произведения $I_{\text{СОТП}} \times V_{\text{макс}}$ к входной температуре хладагента 4.5 К при расходе 730 кг/час не давала основания ожидать, что достижение форсированного режима работы СОТП Т-15 ($B_0 = 4.5$ Тл) будет осуществимо. Результаты исследований токонесущей способности СОТП находились в согласии с выводами работы [82] согласно которой, из-за дефектов сверхпроводящей скрутки токонесущая способность СОТП ограничена величиной $I_{\text{СОТП}} \times V_{\text{макс}} \cong 26.5 \text{ кА} \times \text{Тл}$ ($I_{\text{СОТП}} = 4.05 \text{ кА}$).

4.5. Измерения резистивных тепловыделений

Для сверхпроводящего магнита, намотанного токонесущим элементом охлаждаемым циркулирующим по каналам охлаждения двухфазным или сверхкритическим гелием, решающее влияние на работоспособность оказывает соотношение между резистивными тепловыделениями и теплоотводящей способностью хладагента. Испытания СОТП в сборе должны были дать ответ, в какой степени собственно резистивные тепловыделения влияют на достижение рабочих параметров СОТП установки Т-15 и правильно ли они были оценены в технологических испытаниях рабочих блоков.

Источниками резистивных тепловыделений являются дефекты сверхпроводящей скрутки, которые могли возникнуть в процессе изготовления проводника и намотки катушек. К сожалению, на действующей плазменной установке Т-15 во всех кампаниях не было возможности провести эксперименты по измерению электрической мощности, выделяемой в каждом блоке по детальному исследованию спаев и поблочному распределению резистивности или

измерению паросодержания после каждого блока. Резистивное тепловыделение в СОТП определялось интегральным методом, по суммарному энерговыделению в поток хладагента и измерению его теплосодержания. Общее тепловыделение за счет резистивности составляло около 300 Вт. Таким образом, оценки дополнительного резистивного тепловыделения в катушках СОТП, которые были сделаны по результатам предмонтажных испытаний рабочих блоков, оказались подтвержденными испытаниями в сборе [67,79,80,81].

На рисунке 4.15 приведены результаты измерений суммарных резистивных тепловыделений, при вводе тока в обмотку до 3.6 кА, а также суммарных тепловыделений в 24 блоках по итогам предмонтажных испытаний, в зависимости от параметра $I_c \times V_{max}$. Видно, что суммарные резистивные тепловыделения в тороидальной конфигурации, по крайней мере, не превышали суммарных тепловыделений отдельных блоков. Это может быть объяснено тем, что конфигурация магнитного поля в торе отличалась от конфигурации поля в предмонтажных испытаниях. Измеренное сопротивление спаев между блоками №22 и №23 при токе в обмотке 2 кА составило $6 \div 8 \cdot 10^{-8}$ Ом. Если предположить, что все межблочные спаи имеют такую же величину сопротивления, то вклад спаев в суммарные резистивные тепловыделения не превышали 30 Вт.

Таким образом, из измерений резистивных тепловыделений СОТП можно сделать следующие выводы:

- предмонтажные испытания позволили правильно оценить масштабы резистивности СОТП;
- связанные с резистивностью тепловыделения в номинальном режиме составляют относительно малую долю (менее 20 %) от общей тепловой нагрузки на систему гелиевого криогенного обеспечения установки Т-15.

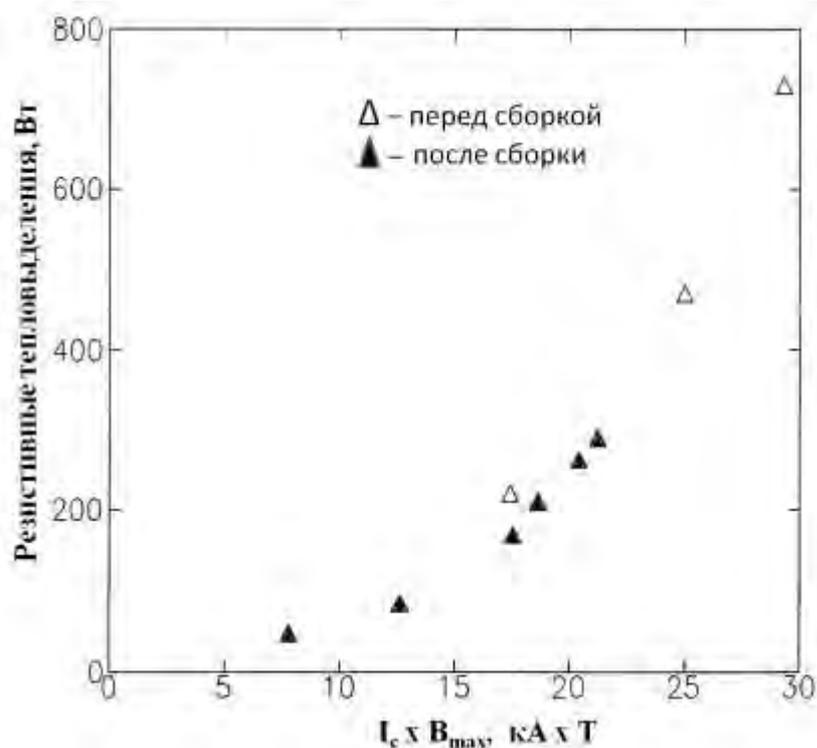


Рисунок 4.15 - Зависимость суммарных резистивных тепловыделений в 24 блоках СОТП от параметра $I_{cотп} \times V_{max}$, кА x Тл: Δ – предмонтажные испытания, \blacktriangle – тороидальная обмотка в сборе

4.6. Исследование нагрева СОТП при защитном выводе энергии

4.6.1. Экспериментальные результаты

После возникновения необратимого перехода в нормальное состояние в обмотке начинается распространение нормальной фазы и повышение температуры, наибольшее в месте перехода. Конечная температура нагрева зависит от величины тока и сценария его защитного вывода.

Как уже отмечалось выше, после технологических испытаний рабочих блоков, в процессе проведения которых произошло несколько электрических пробоев во внешних подводящих коммуникациях во время защитного вывода тока при ухудшении вакуума в криостате [45, 81], была изменена величина проектной постоянной времени вывода энергии с 26 с на 104 с и таким образом,

осуществлено соответствующее понижение напряжения вывода в номинальном режиме работы СОТП с величины $\pm 1000\text{В}$ до величины $\pm 250\text{В}$. При таких изменениях в системе защиты необходимо было убедиться, что нагрев обмоток при защитном выводе энергии не превышал допустимый уровень ($T = 150\text{ К}$), т.к. при работе СОТП на токах более 3.5 кА переход какого-либо участка обмотки в нормальное состояние сопровождался сильным его разогревом и длительным временем восстановления. Это происходило, несмотря на то, что для уменьшения нагрева использовался специальный прием, при котором производилось двукратное увеличение разрядного сопротивления в момент достижения тока, равного половине максимального. При принятой постоянной времени вывода энергии 104 с и 4 секундной задержке в системе защиты перегрев обмотки мог превышать допустимый.

Были проведены расчетные оценки нагрева участков обмотки, перешедших в нормальное состояние в зависимости от тока, с которого происходит вывод энергии, и от времени задержки срабатывания системы защиты. Из-за отсутствия температурных датчиков внутри обмотки справедливость проведенных температурных оценок проверялась сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными по общему разогреву обмотки и времени восстановления в них рабочей температуры. На рисунке 4.16 представлены результаты таких верифицированных расчетов.

Как видно из этих данных, при работе в номинальном режиме с током около 4 кА разогрев обмотки мог быть более 150 К [67].

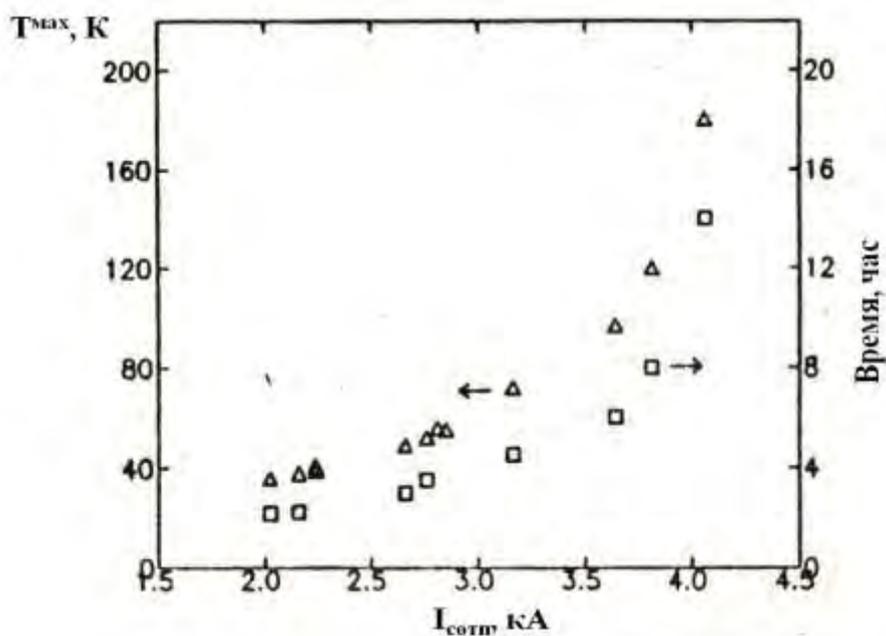


Рисунок 4.16 - Зависимости максимальной температуры нагрева СОТП (Δ) и времени восстановления исходного режима криостатирования (□) от тока, инициировавшего переход СОТП в нормальное состояние

Для более детального анализа нагрева катушек при появлении нормальной фазы и последующем выводе энергии на выводных трубках гелия из галет блока № 22 были установлены температурные датчики. Схема расположения датчиков показана на рисунке 4.17.

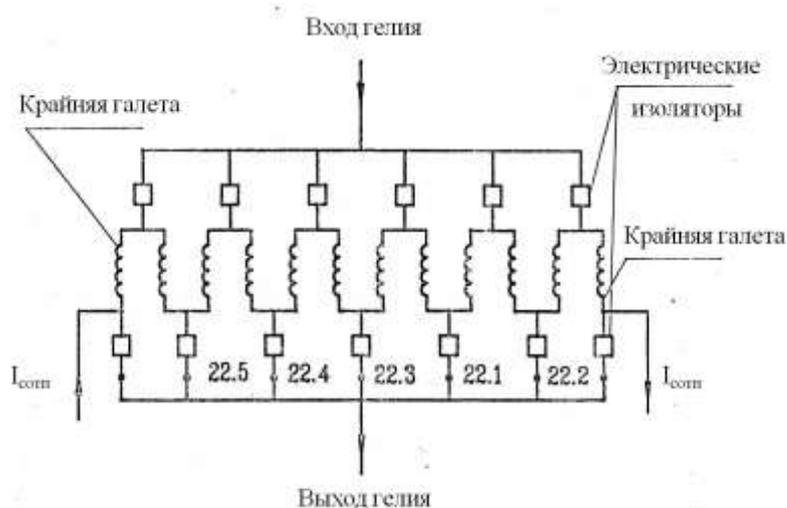


Рисунок 4.17 - Расположение температурных датчиков на выходах из галет блока №22.

Ток в обмотку вводился со скоростью 1 А/с. Режим криостатирования СОТП при входной температуре гелия $T_{\text{вх}} \sim 8.8$ К и выходной температуре $T_{\text{вых}} \sim 10.8$ К осуществлялся двумя ожижителями, работающими в параллель. Массовый расход гелия распределялся следующим образом: через корпуса блоков $\sim 110 \div 130$ кг/час, через обмотку $\sim 145 \div 180$ кг/час.

Переход в нормальное состояние блока №22 произошел при токе 2800 А [83]. Вывод тока начался примерно 3 секунды спустя после появления нормальной фазы при постоянной вывода $\tau = 104$ с. Временные зависимости выходной температуры гелия из галет (датчики T1 \div T5) и температуры корпуса блока №22 показаны на рисунке 4.18 (а-с). Каждый из датчиков T1 \div T5 регистрировал общую выходную температуру гелия из двух соседних галет. Два других датчика регистрировали выходную температуру гелия из крайних галет. Датчик, регистрирующий температуру корпуса блока, располагался на корпусе со стороны сильного магнитного поля.

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, рассчитывалось по разнице энтальпий (Δh) входящего и выходящего гелия:

$$Q = \dot{m} \cdot \int \Delta h dt \quad (4.10)$$

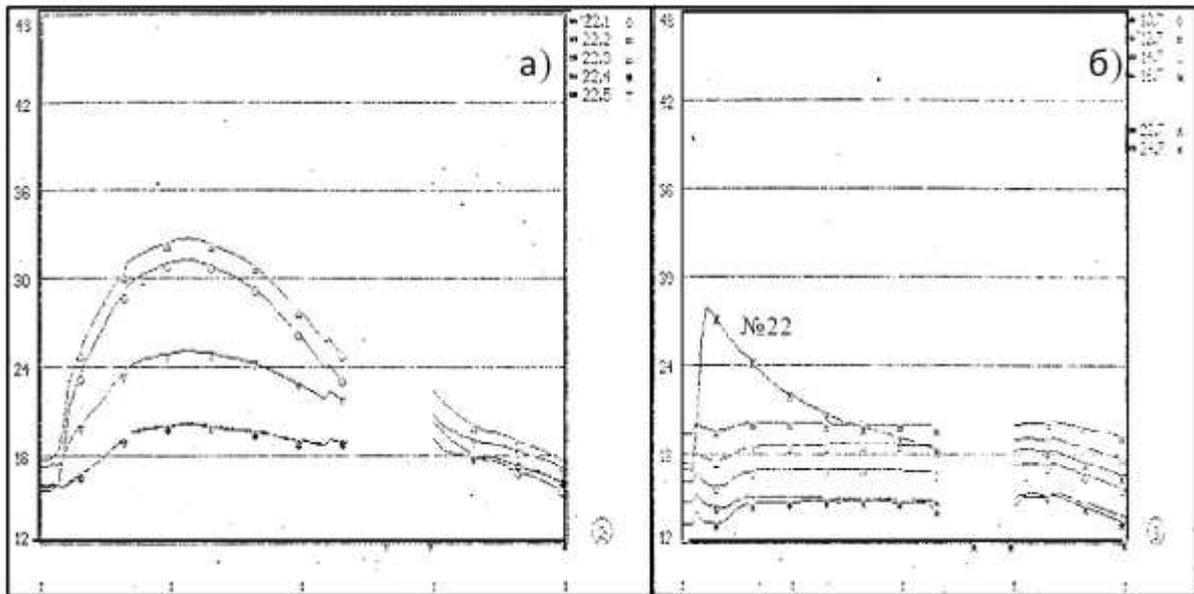


Рисунок 4.18 - а) - Временные зависимости выходной температуры гелия из галет (датчики Т1÷Т5) блока №22 и б)- температуры корпуса блока №22.

Полная временная шкала - 8 часов

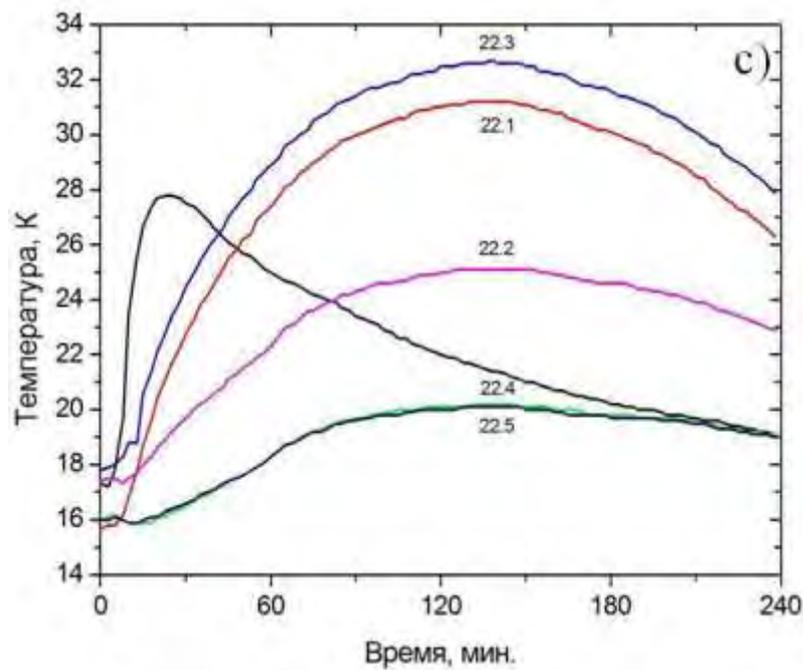


Рисунок 4.18 - с) - Временные зависимости выходной температуры гелия из галет (датчики Т1 ÷ Т5) и температуры корпуса блока №22

Изменение во времени разности энтальпий входящего и выходящего гелия показано на рисунке 4.19.

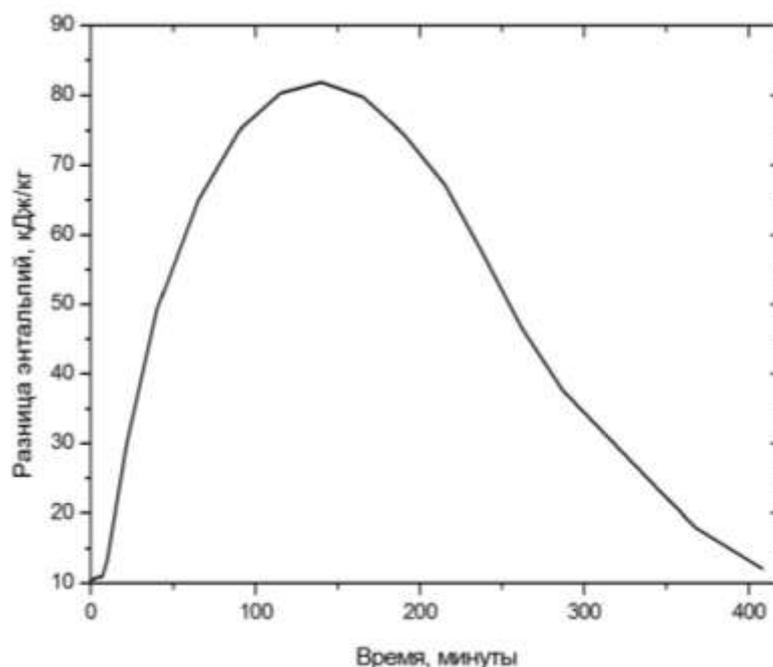


Рисунок 4.19 - Изменение во времени разницы энтальпий (Δh) выходящего и входящего гелия

При полном расходе гелия через СОТП $\dot{m} = 145 \div 180$ кг/час, и предполагая, что распределение расхода гелия между галетами и корпусами блоков не менялось, количество тепла вынесенного гелием через две галеты составляло $Q = 330 \div 410$ 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.

4.6.2. Моделирование экспериментальных данных

4.6.2.1. Нарушение сверхпроводимости при токе 2800 А

На рисунке 4.20 показаны расчетные временные зависимости тока в СОТП $I(t)$, максимальной температуры нагрева проводника T (К), плотности энергии w (Дж/см³), выделившейся в точке зарождения нормальной фазы и начальной скорости распространения нормальной фазы V_t (м/с).

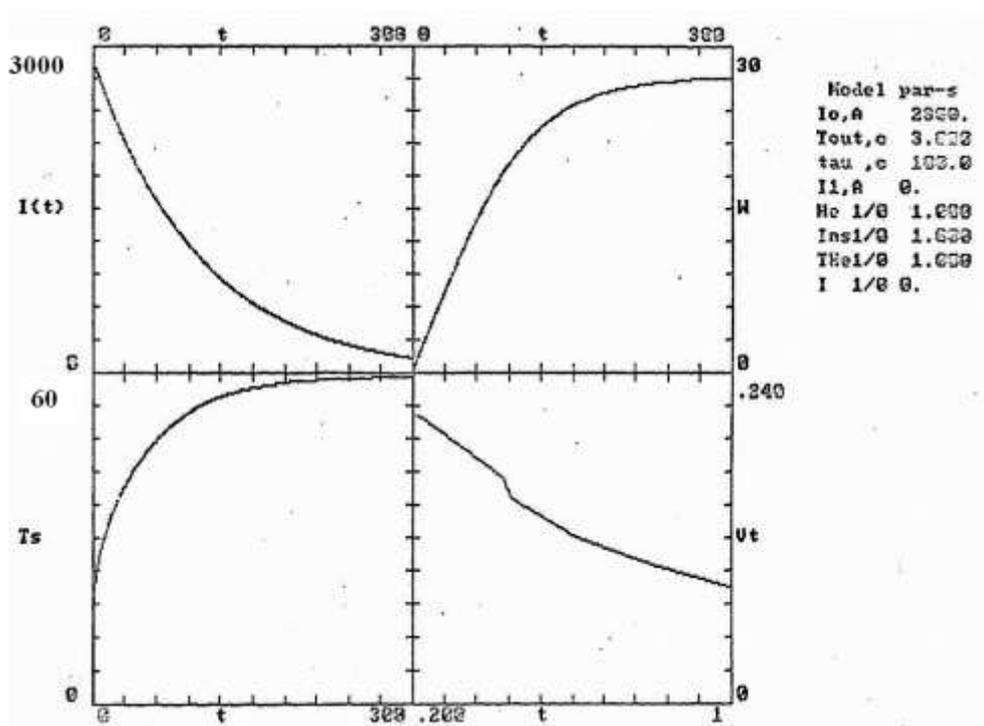


Рисунок 4.20 - Временные зависимости тока в СОТП $I(t)$, максимальной температуры нагрева проводника T_s (К), плотности энергии w (Дж/см³) и начальной скорости распространения нормальной фазы V_t (м/с)

Распределения плотности энергии и температуры по виткам галеты, перешедшей в нормальное состояние, показаны на рисунке 4.21 и рисунке 4.22. Моделирование 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 (см. рисунок 4.14). Величина скорости распространения нормальной фазы вдоль проводника была выбрана равной 0.2 м/с. Спустя одну секунду от момента возникновения нормальной фазы, за счет теплопроводности межвитковой изоляции, начинали нагреваться и переходить в нормальное состояние соседние витки галеты, а 4 секунды спустя, переходили в нормальное состояние соседние галеты.

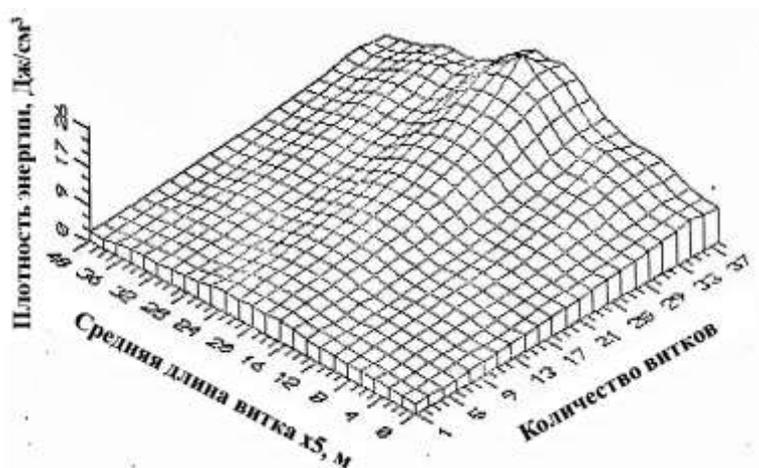


Рисунок 4.21 - Распределение плотности энергии по виткам (38) галеты

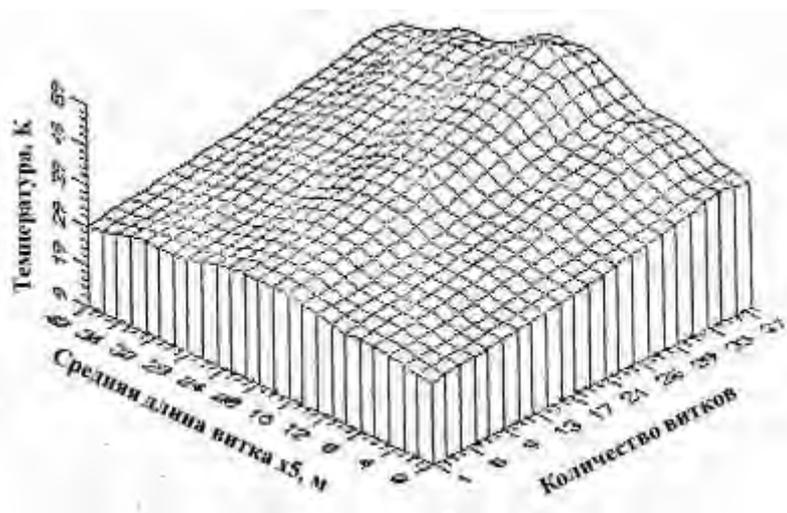


Рисунок 4.22 - Распределение температуры по виткам (38) галеты

Количество тепла, выделившееся в галете, перешедшей в нормальное состояние, вычисленное как:

$$Q = S \int_0^L w dl \quad (4.11)$$

составило $2.1 \cdot 10^5$ Дж (S - поперечное сечение СТНЭ). Количество тепла, выделившееся в каждой соседней галете, составило $1.8 \cdot 10^5$ Дж. Таким образом, количество тепла, выделившееся в двух соседних галетах, гидравлически объединенных по выходу гелия, составило $3.9 \cdot 10^5$ Дж, что находилось в хорошем согласии с экспериментально полученными данными.

4.6.2.2. Моделирование роста активных напряжений

На рисунке 4.11 приведены экспериментальные кривые нарастания активных напряжений при распространении нормальной фазы для различных токов, вызвавших переход в нормальное состояние. Видно, что, практически во всех случаях, более медленное нарастание активных напряжений соответствует меньшим токам.

Для моделирования нарастания активных напряжений и скорости распространения нормальной фазы были выбраны случаи нарушения сверхпроводимости при токах 4060 А и 2020 А. Моделирование осуществлялось в предположении, что нормальная фаза распространялась в противоположные стороны от точки зарождения с постоянной скоростью. Кроме того, спустя некоторое время, зависящее от уровня вкладываемой мощности в области зарождения нормальной фазы, за счет теплопроводности межвитковой изоляции, начинали нагреваться и переходить в нормальное состояние симметричные участки в соседних витках галеты.

Нарастание активных напряжений при распространении нормальной фазы описывалось следующей зависимостью:

$$U(t) = \frac{2 \cdot I \cdot v_t}{S} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^t \rho(B, T) dt \quad (4.12)$$

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 .

Скорость распространения нормальной фазы (v) вычислялась из решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho^v c S \frac{\partial T}{\partial t} - 2\alpha P(T - T_0) + j^2 \rho S = 0 \quad (4.13)$$

или, вводя переменную $\varepsilon = x_0 - v \cdot t$, уравнение (13) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{d^2 T}{d\varepsilon^2} + \frac{v\rho^v c}{\lambda} \frac{dT}{d\varepsilon} - \frac{2\alpha P}{\lambda S} (T - T_0) + \frac{j^2 \rho}{\lambda} = 0 \quad (4.14)$$

Если пренебречь теплоотдачей от нагретого проводника в хладагент ($\alpha=0$), то можно получить выражение для величины адиабатической скорости ($v_{ад}$) распространения нормальной фазы вдоль проводника в две стороны от точки ее зарождения:

$$v_{ад} = \frac{I}{2S\rho^v c} \sqrt{\frac{\rho\lambda}{T_c - T_0}} \quad (4.15)$$

В уравнениях 4.13-4.15 введены следующие обозначения: λ - коэффициент теплопроводности, α - коэффициент теплоотдачи, I , - ток, j - плотность тока, P - периметр канала охлаждения, T - температура, T_0 - начальная температура проводника, равная температуре хладагента, T_c - критическая температура перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное, ρ^v - плотность, ρ - удельное электрическое сопротивление, c - коэффициент теплоемкости, S - поперечное сечение проводника, по которому распространяется нормальная фаза.

Для определения T_c воспользуемся экспериментальными данными по зависимости параметра $I_c \times B$ как функции температуры для модельной катушки [80]:

$$I_c \times B \text{ (кА} \times \text{Тл)} = 84 - 7 T_c \text{ (К)} \quad (4.16)$$

Теплофизические и электрические свойства стабилизирующей меди и величины скоростей распространения нормальной фазы от точки ее зарождения в обе стороны вдоль медной шины, рассчитанные по формулам (4.15 и 4.16) для различных токов перехода представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1- Теплофизические и электрические свойства стабилизирующей меди и величины скорости распространения нормальной фазы

I, А	T ₀ , К	T _с , К	J x 10 ⁻⁶ , А/м ²	C, Дж/кг·град	ρ ^v , кг/м ³	ρ x 10 ¹¹ , Ом·м	, Вт/м·К	v, м/с
4060	5.18	8.2	50.75	0.14	8900	4.0	90	0.7
2800	8.8	10.2	35.0	0.86	8900	4.4	250	0.2
2020	10.8	11.06	25.25	1.6	8900	4.6	260	0.19

Также, для определения скорости распространения нормальной фазы вдоль проводника, было рассчитано изменение во времени температуропроводности стабилизирующей меди (χ) на начальном росте температуры нагрева участка, перешедшего в нормальное состояние, для вышеуказанных случаев (рисунок 4.23 и рисунок 4.24). Скорость распространения теплового фронта (v_t), определенная

как $V_t \approx \sqrt{-d\chi/dt}$, находилась в пределах 0.5÷1.0 м/с для случая I= 4060 А и 0.15 ÷ 0.2 м/с для случая I = 2020 А.

На рисунке 4.25 и рисунке 4.26 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 2020 А. Экспериментальные данные показаны треугольниками.

Хорошее совпадение между расчетными и экспериментальными кривыми свидетельствовало о близости выбранной модели расчета к реальной ситуации и позволило определить скорость распространения нормальной фазы в искомых случаях.

Таким образом, можно сделать вывод, что в проведенных экспериментах скорость распространения нормальной фазы определялась скоростью распространения теплового фронта по стабилизирующей меди вдоль проводника.

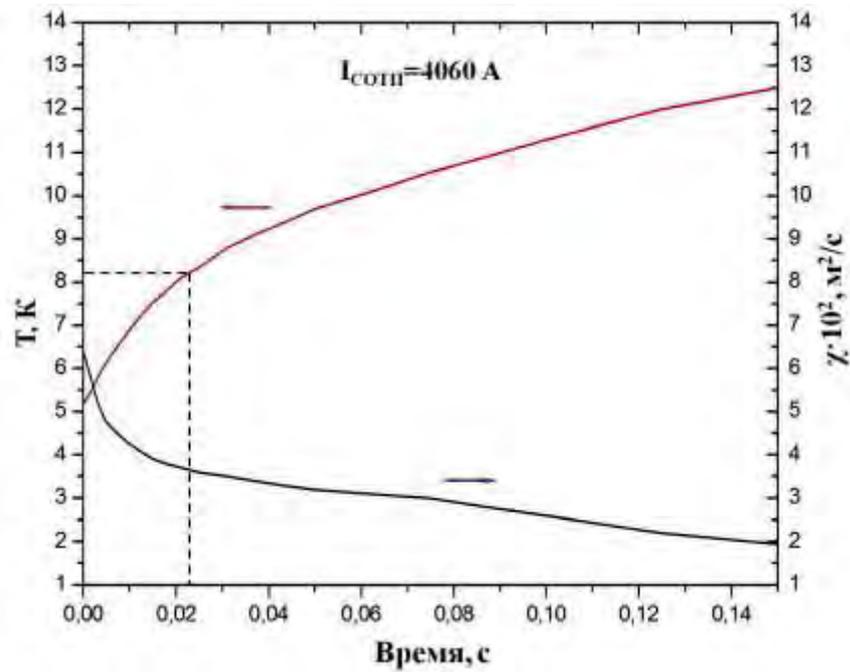


Рисунок 4.23 - Временные зависимости начальной температуры нагрева участка обмотки, перешедшего в нормальное состояние при токе 4060 А и коэффициента температуропроводности стабилизирующей меди. Пунктиром показана критическая температура перехода в нормальное состояние, рассчитанная по формуле 4.16

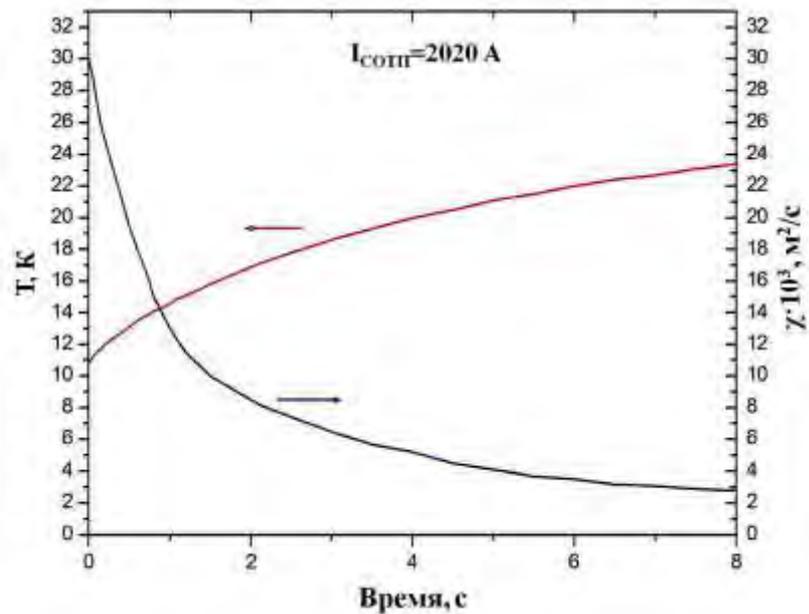


Рисунок 4.24 - Временные зависимости температуры нагрева участка обмотки, перешедшего в нормальное состояние при токе 2020 А и коэффициента температуропроводности стабилизирующей меди

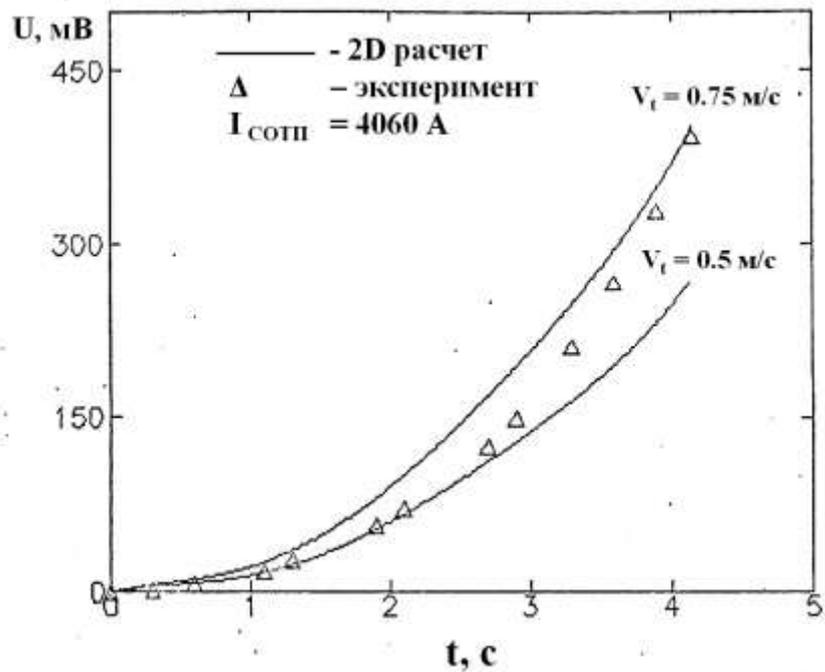


Рисунок 4.25 - Нарастание активных напряжений для тока 4060 А: сплошные кривые - двумерный расчет для скоростей распространения нормальной фазы 0.5 м/с и 0.75 м/с, Δ – эксперимент

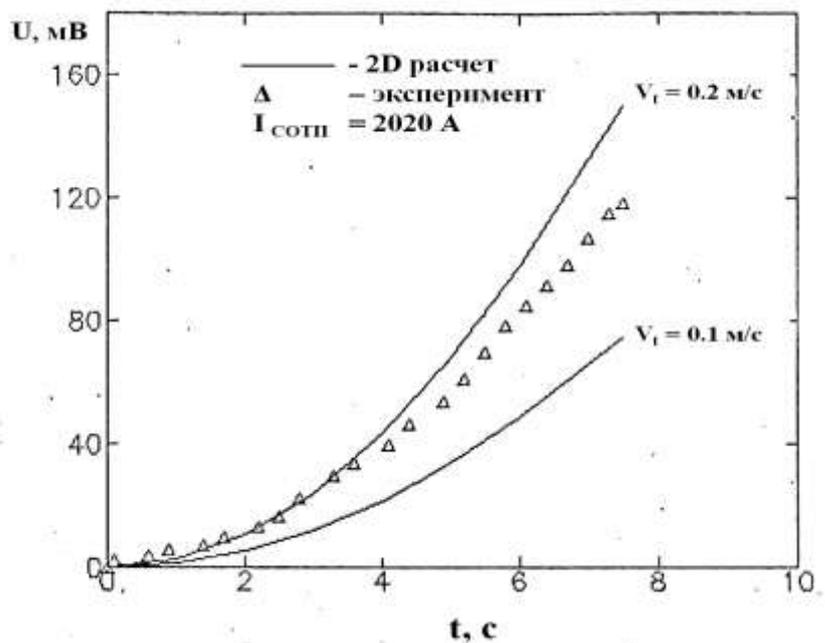


Рисунок 4.26 - Нарастание активных напряжений для тока 2020 А: сплошные кривые - двумерный расчет для скоростей распространения нормальной фазы 0.1 м/с и 0.2 м/с, Δ - эксперимент

На рисунке 4.27 показано распределение температуры по виткам галеты, перешедшей в нормальное состояние при токе 4060 А, после вывода энергии. Расчет проводился в предположении, что участок перехода в нормальное состояние находился на внутренних витках галеты в области максимального поля, а также с учетом экспериментальной зависимости температуры перехода от величины критического тока. В расчете скорость распространения нормальной фазы была выбрана равной 0.75 м/с.

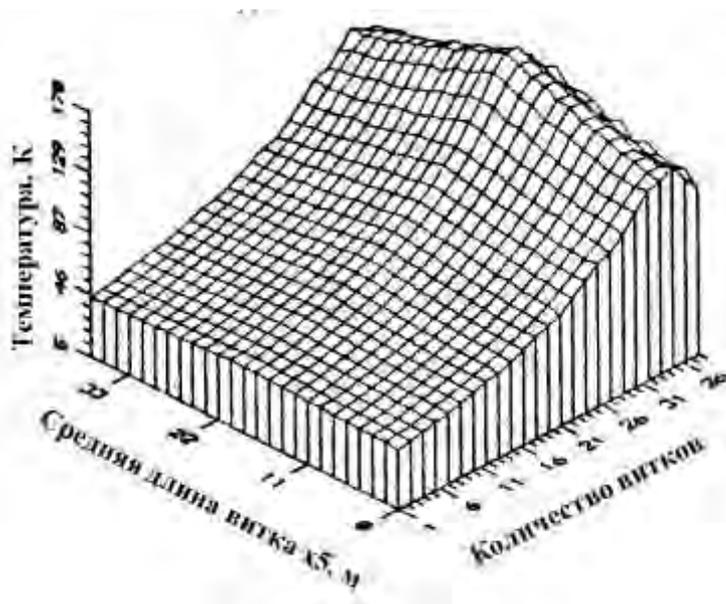


Рисунок 4.27 - Распределение температуры по 38 виткам галеты после вывода тока из обмотки, перешедшей в нормальное состояние при токе 4060 А.

4.7. Влияние импульсов с плазмой на работу СОП

Отличительной особенностью условий работы сверхпроводящей магнитной системы тороидального поля токамака является сильное возмущающее воздействие на нее переменных полоидальных полей индуктора, управляющих обмоток и тока плазмы, особенно при срывах последнего. В СОП Т-15 использован сверхпроводник из Nb_3Sn с большим температурным запасом между критической и рабочей температурами, в первую очередь, для повышения

устойчивости магнита к этим возмущениям. Устойчивость токонесущего элемента T-15 к возмущениям, возникающим при срывах тока плазмы, исследовалась как расчетным путем, так и в экспериментах на модельных обмотках [84,85,86]. Было показано, что при охлаждении двухфазным гелием и запасе по критическому току $I / I_c \leq 0.9$ устойчивость обеспечивалась вплоть до параметров форсированного режима T-15 с начальной амплитудой полоидального поля ~ 0.8 Тл и постоянной времени спада 10 мс. Уже во второй экспериментальной кампании было показано, что срыв тока плазмы 0.7 МА, сопровождаемый изменением полоидального поля с $dB/dt \sim 15$ Тл/с, не приводил к нарушению работы СОТП, когда ток в ней составляет 85 % от тока перехода при данной температуре [87,88]. В последующих экспериментах, когда импульсы со срывами тока плазмы 0.8 МА (рисунок 4.28) следовали каждые 6 минут, они тоже 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.

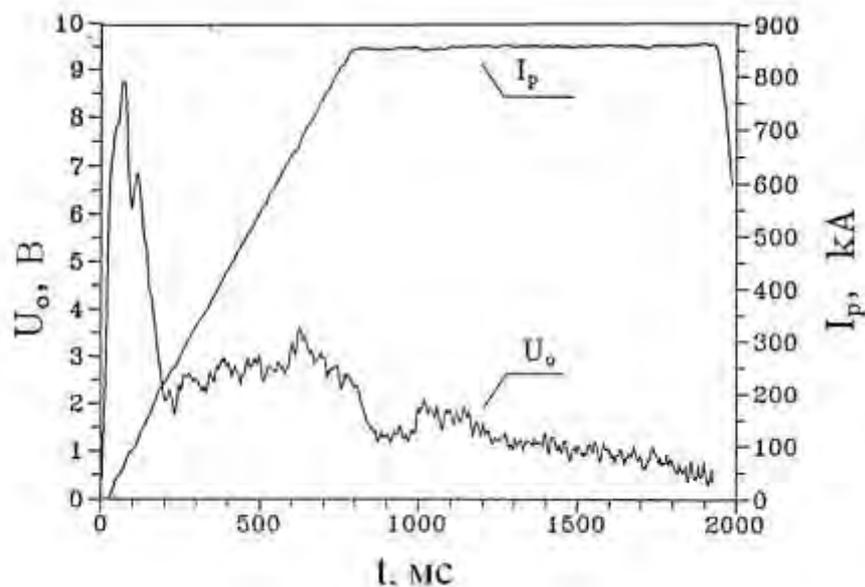


Рисунок 4.28 - Поведение во времени тока плазмы I_p и напряжения на обходе плазменного шнура U_0

На рисунке 4.29 показано наблюдавшееся в этих экспериментах возрастание температуры хладагента на выходе из обмоток и корпусов СОТП [81]. На этом рисунке видно, что температура входного потока гелия также возрастала после срыва, что, видимо, связано с кратковременным изменением режима работы рефрижератора, когда температура обратного потока увеличивалась после срыва. Тем не менее, длительного нарушения режима охлаждения не происходило, а возрастание выходной температуры не превышало 0.2 К.

Следует отметить, что в серии экспериментов с регулярными срывами тока плазмы не все корпуса успевали остыть за промежуток между импульсами до исходной температуры. В некоторых из них, как видно из рис.4.30 средняя температура возрастала в течение серии импульсов на величину до 4 К. Хотя это возрастание меньше начального разброса температур корпусов, корреляция которого с токнесущей способностью блоков не обнаружена, тем не менее, это обстоятельство привело к увеличению интервала между импульсами до 10 ÷ 15 минут.

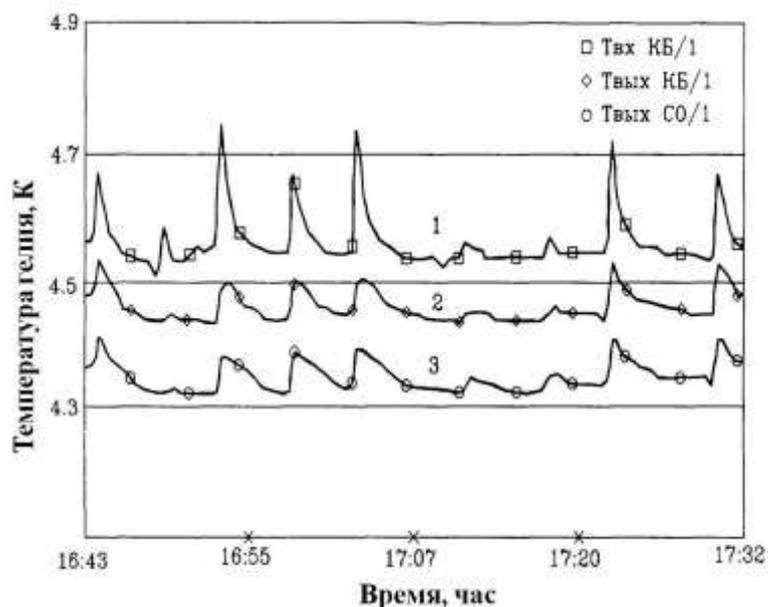


Рисунок 4.29 - Изменение температуры гелия на выходе из обмотки (3) и корпусов (2), а также на входе в СОТП (1) в серии импульсов со срывом тока плазмы 0.8 МА.

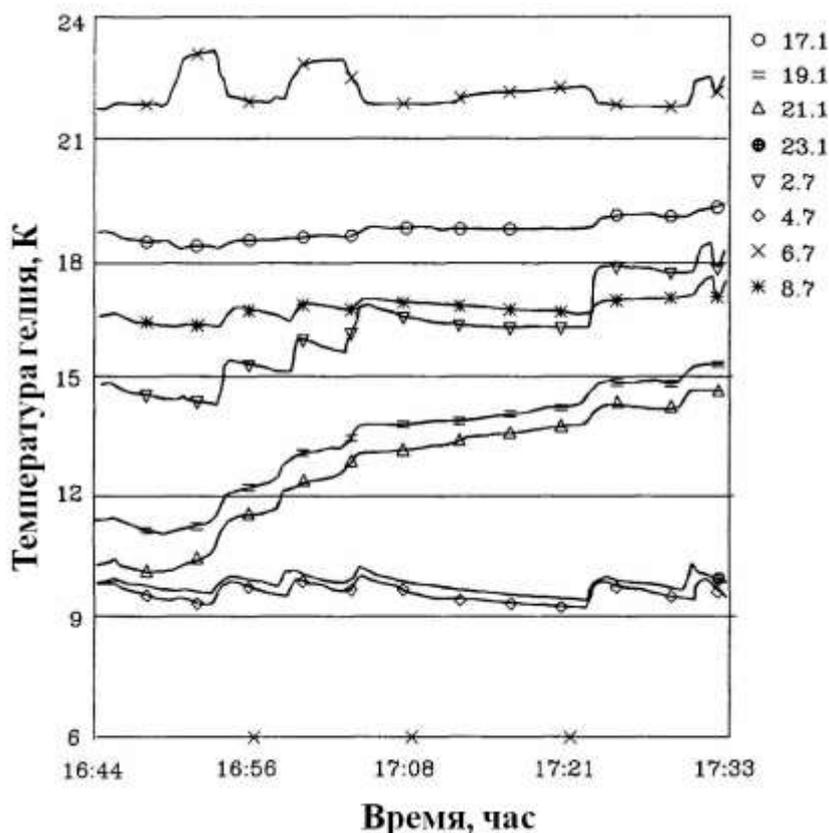


Рисунок 4.30 - Изменение максимальных температур корпусов блоков в серии импульсов со срывом тока плазмы 0.8 МА

4.8. Выводы к Главе 4

1. Токковые испытания показали, что при входной температуре гелия $T_{вх} = 4.7$ К СОТП Т-15 обеспечивала возможность длительной работы при проектном значении поля 3.5 Тл ($I_{сопн} = 3,9$ кА, $B_{max} = 6.3$ Тл).
2. В экспериментальных кампаниях 1992 ÷ 1993 гг. СОТП Т-15 обеспечила создание магнитного поля, необходимого для проведения плазменных экспериментов (~ 2500 импульсов) практически бесперебойно. Не было сбоев в работе, связанных с работой собственно СОТП.
3. Токонесущая способность СОТП была ограничена резистивными тепловыделениями. При токе 3.6 кА резистивные тепловыделения, включая потери на спаях, составили около 300 Вт. Суммарные резистивные тепловыделения в тороидальной конфигурации, по крайней мере, не превышали

суммарных тепловыделений отдельных блоков.

4. 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. При этом вблизи проектных рабочих температур и расходах хладагента, т.е. при низких температурах и больших расходах, переход происходил в блоке №2, который в предмонтажных испытаниях показал наибольшее тепловыделение среди блоков, использованных в тороидальной сборке, а при повышенных температурах и сниженных расходах - в блоках №22 и №23.

5. Нарушение сверхпроводимости происходило в области сильного магнитного поля.

6. Срывы тока плазмы со скоростью изменения полоидального поля до $dB/dt \sim 20$ Тл/с (как при токе плазмы до 1 МА, так и серия срывов при токе плазмы – 0.8 МА с интервалом 6 мин), не приводили к нарушению работы СОТП или криогенного комплекса.

6. Анализ экспериментальных данных по выводу энергии из СОТП и расчетные исследования этого процесса показали, что при защитном выводе энергии с постоянной времени, равной 104 с и токе ~ 4 кА максимальная температура участка обмотки, вызвавшего переход, составляла около 150К, что находилось на пределе допустимого уровня нагрева.

7. Моделирование роста активных напряжений при распространении нормальной фазы показало, что их рост определялся скоростью распространения теплового фронта по стабилизирующей меди вдоль проводника в обе стороны от места зарождения нормальной фазы.

ГЛАВА 5. СОЗДАНИЕ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭМС И КАМЕРЫ Т-15 – ПРОЕКТЫ ТОКАМАКОВ Т-15М И Т-15Д

5.1. Модернизация электромагнитной системы и вакуумной камеры установки Т-15 – проект токамака Т-15М

5.1.1. Цели и физическое обоснование создания токамака 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 [88]. 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.

Предлагаемая установка [90, 91, 92] должна была обеспечить возможность реализации ИТЭР - подобной конфигурации формы плазменного шнура (в геометрической пропорции 1/4) с сепаратрисой и полоидальным дивертором. Одним из достоинств Т-15М, выделяющим этот проект среди ИТЭР - подобных установок, являлось увеличенное расстояние между плазмой и магнитными катушками, что позволяло моделировать систему управления плазменным шнуром в токамаке - реакторе.

Экспериментальная программа Т-15М должна была охватывать широкий диапазон исследований по УТС, включая решение следующих задач:

- Возможность достижения высоких значений β_N , как путь к удешевлению ТЯР, при одновременном обеспечении высокой плотности и температуры.

- Управление профилем тока и давления, как путь к увеличению β_N и времени удержания τ_E .
- Возможность реализации режимов улучшенного удержания с внутренним и внешним транспортным барьером.
- Исследование ограничения по β из-за развития неоклассических и идеальных винтовых возмущений.
- Изучение возможности реализации режимов с высокими значениями β и n_e в условиях стационарного разряда с полностью неиндукционным током.
- Оптимизация дивертора и исследование влияния периферийной плазмы на глобальные характеристики плазменного разряда.
- Исследование вопросов вертикальной устойчивости плазмы.
- Исследование и алгоритмизация систем обратных связей для получения устойчивых режимов с высокими характеристиками.

На предлагаемой установке возможно было проведение и традиционных исследований по программе токамак, включая:

- Изучение электронного и ионного транспорта.
- Изучение срывов.
- Исследование турбулентности.
- Исследование ИТЭР - подобных (по безразмерным параметрам) разрядов с уточнением зависимости от безразмерных параметров.
- Исследование технологических вопросов ТЯР.

Для решения указанных задач на установке Т-15М необходимо:

- Использовать системы дополнительного нагрева плазмы, разработанные для Т-10 и Т-15, с мощностью не менее $P_{aux} = 15$ МВт, обеспечивающие нагрев как ионной (ИН, $P_{ин} = 8 \div 10$ МВт), так и электронной (ЭЦР, $P_{ЭЦР} = 8$ МВт, $f = 110 - 120$ ГГц) компонент. Создать системы дополнительного нагрева плазмы с использованием ионно-циклотронного (ИЦР) и нижнегибридного нагрева (НГ).

- Обеспечить возможность генерации неиндукционного тока, равного току плазмы (ИН, ЭЦР, НГ) и управление профилем тока.
- Предусмотреть оснащение установки диагностическим комплексом, не уступающим комплексам диагностик современных установок.

Дальнейшая модернизация установки предусматривала увеличение мощности дополнительного нагрева, что позволило бы реализовывать режимы с предельно высокими значениями β .

Токамак Т-15М предполагалось расположить на площадке ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» при использовании инфраструктуры установок Т-10 и Т-15. Поэтому на выбор параметров Т-15М в существенной степени влияли ограничения по энерго- и водопотреблению. Кроме того, важна была стыковка электромагнитной системы и вакуумной камеры Т-15М с имеющимися системами нагрева плазмы (гиротронный комплекс, система инжекции нейтралов). Общий вид установки в 3-D формате представлен на рисунке 5.1.

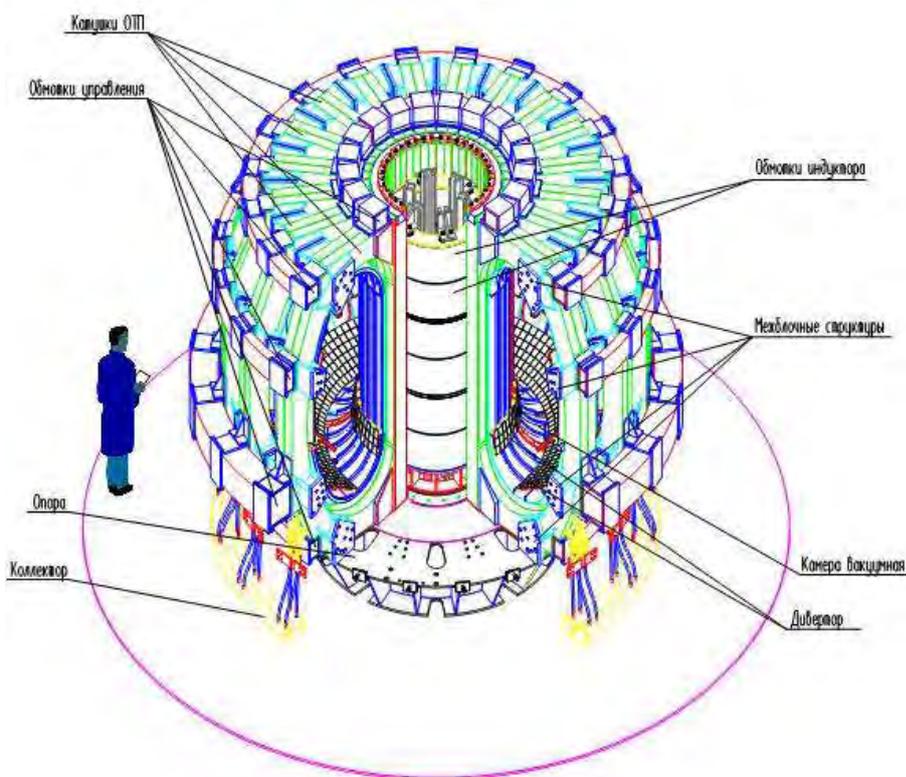


Рисунок 5.1- Общий вид установки Т-15М

5.1.2. Выбор основных параметров установки T-15M

Привязка установки к имеющейся инженерной инфраструктуре площадки ИЯС во многом определяла параметры токамака. Использование имеющегося мощного гиротронного комплекса фактически задавало величину тороидального магнитного поля в центре плазмы. Вторая гармоника частоты $f = 112$ ГГц соответствует значению тороидального магнитного поля на уровне $B_t = 2$ Тл. При учёте некоторого запаса и для расширения возможностей экспериментальной программы нагрева было принято значение тороидального магнитного поля на оси плазмы $B_{t0} = 2.5$ Тл.

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

Важным элементом программы являлось исследование поведения плазмы с токами мегаамперного диапазона при достаточно длинном импульсе поддержания тока. Необходимо отметить, что в России не было работающих токамаков с током плазмы $I_p \geq 1$ МА и длительностью плато тока $\Delta t_{\text{плато}} \geq 1$ с. При указанных выше величинах дополнительного нагрева на уровне $10 \div 20$ МВт весьма желательно получение разрядов с длительностью несколько секунд, что соответствует скиновым временам установления профилей основных параметров плазмы.

Указанные выше особенности могли быть совмещены в установке с ITER-подобной конфигурацией: однонулевой (SN) конфигурацией плазмы, с значениями аспектного отношения $A = 3.1$ и запаса устойчивости на краю плазмы $q_{95} \approx 3.1$, вытянутостью плазмы по уровню 95% потока $k_{95} \approx 1.7$ (по сепаратрисе $k_x = 1.87$) и треугольностью $\delta_{95} \approx 0.3$ ($\delta_x = 0.5$). Основные геометрические размеры выбраны в пропорции $\frac{1}{4}$ от соответствующих параметров ITER-FEAT, а именно –

большой радиус тора $R_0 = 1.55$ м (6.2 м / 4), малый радиус плазмы $a = 0.5$ м (2 м / 4). Указанные параметры при значении магнитного поля на оси плазмы $B_{t0} = 2.5$ Тл определяли максимальную величину тока плазмы $I_p = 1.7$ МА.

Требуемый запас потока в центральном соленоиде был получен масштабированием ИТЭРовского значения $\Delta\Psi_{cs} = 200$ В·с с помощью подобия $\Delta\Psi_{cs} \sim R \cdot I_p$. Это приводило для Т-15М к значению $\Delta\Psi_{cs} = 200 \times (1/4) \times (1.7/15) \approx 6$ Вб. Выбранная в техническом проекте система полоидального поля обеспечивала запас потока в центральном соленоиде $\Delta\Psi_{cs} \approx 8$ Вб.

Для полученных выше параметров Т-15М предел Гринвальда для плотности плазмы n_e составлял $n_{e,G} \sim 10^{20} \cdot I_p / \pi a^2 \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (в ITER-FEAT соответствующее значение предела Гринвальда $n_{e,G} \approx 1.2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$). С некоторым запасом было принято для максимального значения плотности плазмы - $n_e = 1.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, которое близко к принятому в ИТЭР.

Указанные данные основных параметров токамака Т-15М в сравнении с ITER-FEAT приведены в Таблице 5.1 [90].

Таблица 5.1 - 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 А	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_{95}/k_x	1.7/1.85	1.7/1.85	1.7/1.85
Треугольность δ_{95}/δ_x	0.35/0.5	0.35/0.5	0.22/0.35
Тороидальное поле на оси плазмы $B_{t R_0}$, Тл	5.3	2.5	2.5
Длительность плато тока плазмы $\Delta t_{\text{плато}}$, с	400	2 - 3	3 - 5
Мощность нагрева плазмы P_{AUX} , МВт	40	≤ 3	15 - 20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м^{-3}	1	0.5	1
Запас потока $\Delta\Psi_{cs}$, Вб	200	8	8
Конфигурация плазмы	SN	SN	SN

В Таблице 5.1 приведены данные двух основных конфигураций плазмы, которые необходимо было реализовать в одной установке. 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 T-15M [90].

Предполагалось, что первая конфигурация плазмы соответствовала первому этапу работы установки, основная задача которого – наладка системы управления формой и положением шнура, что заставляло работать с открытым дивертором. Это ограничивало мощность дополнительного нагрева плазмы величиной ~ 3 МВт. Второй этап (вариант 2 в Таблице 5.1) соответствовал полномасштабным экспериментам с использованием профилированных пластин дивертора и полной мощностью дополнительного нагрева плазмы.

5.1.3. Пределы подобия установок T-15M и ITER-FEAT

Как следует из Таблицы 5.1, значительная часть параметров T-15M была получена масштабированием параметров ИТЭР, при этом безразмерные параметры оставались теми же, что в ИТЭР (такие как k_{95} , δ_{95} , q_{95}); геометрия – в пропорции $1/4$; остальные – в пропорции, определяемой простыми соотношениями (такими как $I_p \sim a^2 B_t$, $\Delta\psi_{cs} \sim R B_t$).

Как будет показано ниже, при анализе базовых сценариев разряда в токамаке T-15M, указанных в Таблице 5.1 значений мощности нагрева оказалось достаточным, чтобы достичь параметров β_p , β_N , близким к значениям принятым в ИТЭР.

В результате в установке T-15M могли быть промоделированы большинство режимов, подобных по параметрам плазмы.

Более того, создание геометрически подобной (в отношении $1/4$) полоидальной системы в принципе могло позволить получать подобные конфигурации плазмы при пропорционально изменённых ($\sim I_{p,T-15M} / I_{p,ITER}$) токах в обмотках.

Некоторые отличия диктовались отсутствием в Т-15М ряда систем (таких, как бланкет и защита), несколько другой ролью патрубков, более тонкой камерой и т.д.

5.1.4. Исходные параметры и базовые физические сценарии разряда

При предварительной проработке физических сценариев разряда в Т-15М, т.е. временной эволюции параметров R , a , k , δ , n_e , I_p , напряжения на обходе U , сопротивления плазмы R_{PL} , энергетического времени жизни плазмы τ_E , значений полоидальной бэты плазмы β_P и нормализованной бэты β_N и ряда других параметров, были приняты следующие допущения:

- пробой плазмы производится при достижении тороидальным полем базового значения;
- положение области пробоя – вблизи наружного обвода плазмы, как в ITER-FEAT, в этом случае проще осуществить подвод ЭЦР мощности к области пробоя;
- скорость подъема тока плазмы выбиралась в диапазоне $dI_p/dt \approx 1-2$ МА/с (при этом, верхняя граница скорости подъема тока получена масштабированием $dI_p/dt \sim L_p^{-1} \sim R^{-1}$ из ITER-FEAT, нижняя – быстрым ростом резистивных потерь при медленном подъёме тока плазмы), концентрация плазмы на стадии подъёма тока выбиралась растущей вместе с током;
- после выхода плазменного тока на плато происходит включение источников нагрева плазмы.

Принято, что на плато разряда ось плазмы смещена на 0.1 м относительно горизонтальной оси симметрии центрального соленоида – с целью увеличения пространства для расположения диверторных устройств в нижней части камеры.

Как указано в Таблице 5.1, в качестве базовых использовались две конфигурации плазмы, которые должны быть реализованы в одной установке.

Конфигурация (I) с большой треугольностью $\delta_{95} \approx 0.35$, $\delta_x \approx 0.5$ геометрически подобна ITER - FEAT. Её достижение предполагалось при

умеренной мощности нагрева плазмы $Q_{\text{доп.}} \leq 3$ МВт, при этом имелась возможность использовать сравнительно простые приёмные диверторные пластины. В конфигурации (I) положение нижней X-точки характеризуется координатами ($R = 1.3$ м, $Z = -0.9$ м).

В конфигурации (II) с уменьшенной треугольностью плазмы $\delta_{95} \approx 0.22$, $\delta_x \approx 0.35$, возможно увеличение мощности дополнительного нагрева до $P_{\text{доп.}} = 15 \div 20$ МВт и применение специального приёмного диверторного устройства, предназначенного для восприятия существенно больших тепловых нагрузок. В конфигурации (II) положение нижней X-точки характеризовалось координатами ($R = 1.4$ м, $Z = -1$ м).

Моделирование полного сценария разряда включало несколько этапов. Вначале с помощью кода TRANSMAK [95] рассчитывалась стадия пробоя рабочего газа и первичного нарастания тока до значения, когда должны образовываться замкнутые магнитные поверхности. Далее с помощью кода ASTRA [94] рассчитывался полный временной сценарий разряда. При этом самосогласованно решались двумерная задача равновесия плазменного шнура с фиксированной границей в трехмоментном приближении (с учетом смещения, вытянутости и треугольности магнитных поверхностей) и усредненная по магнитным поверхностям система уравнений переноса полоидального потока, частиц и энергии плазмы. Далее параметры, полученные в этих расчетах, использовались для определения временных зависимостей токов в первичной обмотке и в витках системы полоидального поля с помощью кодов ТОКАМЕQ [93] и TRANSMAK [95].

5.1.4.1. Пробой и начальная стадия формирования плазменного шнура

Токамак Т-15М геометрически подобен реактору ITER-FEAT (пропорция $1/4$). Считалось целесообразным сохранение подобия и в ходе сценария разряда. Это определило геометрические параметры области пробоя, приведённые в Таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Геометрические параметры области пробоя ITER-FEAT и T-15M

	ITER-FEAT	T-15M
Номинальные параметры		
Большой радиус тора R, м		
Малый радиус плазмы a, м	6.2	155
Вытянутость плазмы k_{95}	2	0.5
Тороидальное магнитное поле B_t , Тл	1.7	1.7
	5.3	2.5
Параметры области пробоя		
Большой радиус R_d , м	7.48	1.9
Малый радиус a_d , м	0.8	0.2
Вытянутость плазмы k_{95}	1	1
Объём зоны пробоя V_d , м ³	100	1.5
Объём камеры V_v , м ³	1000	30
Напряжение на обходе U_d , В	14	10
Вихревое электрическое поле E, В/м	0.3	0.84
Тороидальное магнитное поле B_{td} , Тл	4.4	2.0

Расчёты давления рабочего газа перед пробоем p , требуемой мощности подогрева плазмы Q_{ECRH} и допустимого уровня рассеянных полей проведены А.Б.Минеевым [31] с помощью кода SCENPLINT, использовавшегося также для моделирования начальной стадии разряда в токамаке ITER-FEAT. Принято, что рабочим газом в токамаке T-15M являлся водород (H), а основной примесью – углерод (C).

Расчёты показали, что старт разряда с помощью чисто вихревого электрического поля возможен только при очень низком давлении рабочего газа (для геометрии, представленной в Таблице 5.2): $p \leq 0.3$ мПа (т.е. $p \leq 2 \div 2.5 \cdot 10^{-6}$ Торр). При таком давлении становится весьма вероятным переход электронов в режим убегания, кроме того, требования к фоновому вакууму становятся весьма жёсткими $P_{\text{вак}} \sim 2 \cdot 10^{-8}$ Торр. Величина допустимого магнитного поля рассеяния B_{str} в этом случае составляет около 5 Гаусс.

При увеличении давления рабочего газа для формирования разряда становится необходимым ввод в область разряда ЭЦР мощности на частоте, соответствующей тороидальному магнитному полю в зоне пробоя. Расчётная зависимость минимальной мощности подогрева $Q_{\text{ЭЦР}}$ от давления рабочего газа

при низком уровне примесей в разряде приведена в Таблице 5.3. Там же приведены значения отношения E/p . Видно, что отношение E/p становится минимально допустимым (меньшим 600 В/м/Па, что достигнуто в экспериментах на JT-60U) только при значениях давления $p \geq 1.5$ мПа (т.е. $p \geq 10^{-5}$ Торр), чему соответствует значение мощности подогрева $Q_{\text{ЭЦР}} \geq 150$ кВт. Величина допустимого магнитного поля рассеяния в этом случае увеличивалась до $B_{\text{str}} \sim 10 \div 15$ Гаусс.

В качестве примера приведены соответствующие величины для ITER-FEAT ($U_{\text{bd}} \approx 14$ В, $p \approx 0.8$ мПа, $Q_{\text{ЭЦР}} \approx 2$ МВт в течение 1 с, $B_{\text{str}} \approx 10$ Гаусс) и проекта токамака KSTAR ($U_{\text{bd}} \approx 6$ В, $p \sim 1.5 - 2$ мПа, $Q_{\text{ЭЦР}} \approx 500$ кВт в течение 0.5 с, $B_{\text{str}} \sim 20-30$ Гаусс).

Таблица 5.3 - Зависимость мощности подогрева плазмы от давления рабочего газа

p , мПа	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	1.7
$Q_{\text{ЭЦР}}$, кВт	≈ 0	20	50	70	150	200
E/p , В/м/Па	2330	1400	1000	700	500	400

В соответствии с указанными в Таблице 5.3 данными, для дальнейшего анализа начальной стадии разряда были выбраны следующие значения параметров:

$$p \approx 1.7 \text{ мПа}, Q_{\text{ЭЦР}} \approx 200 \text{ кВт}, B_{\text{str}} \sim 10 \text{ Гаусс}.$$

Оценки показали, что при токе плазмы около 30 кА в плазменном шнуре формируется система замкнутых магнитных поверхностей.

Поскольку индуктивность плазменного шнура с геометрией, приведённой в Таблице 5.2 составляла около 6 μH , то при напряжении на обходе $U_{\text{bd}} \sim 10$ В подъём тока плазмы до $I_{p,\text{min}} \approx 40$ кА занимал не менее $20 \div 30$ мс. Кроме того, омическая мощность к концу начальной стадии разряда $U_{\text{bd}} I_{p,\text{min}} \approx 300 \div 400$ кВт уже превышала мощность ЭЦР подогрева плазмы и подогрев мог быть отключён.

Таким образом, время 20 – 30 мс определяло необходимый масштаб времени работы источника ЭЦР подогрева плазмы на начальной стадии разряда.

5.1.4.2. Стадия подъема тока плазмы

Расчёты основных сценариев разряда были проведены В.М.Леоновым с помощью кода ASTRA. Использовалась та же модель, как и при расчётах ИТЭР с нормировкой времени удержания на скейлинги ИТЭР (в омическом режиме – на скейлинг омического режима, в L-моду – на скейлинг L-моды, в H-моду – на скейлинг H-моды; L-H переход происходил при превышении пороговой мощности, соответствующей скейлингу ИТЭР для $P_{пор.}$).

В токамаке T-15M было выбрано значение средней скорости подъёма тока $dI_p/dt \approx 1.5$ МА/с. При такой скорости подъёма тока плазмы расчёты показали на отсутствие убегающих электронов. Кроме того, скиновое время при подъёме плазменного тока близко к характерному времени подъёма тока и можно надеяться на отсутствие сильного скинирования. Наконец, дальнейшее увеличение скорости подъёма тока уже не даёт существенного выигрыша в величине резистивных потерь полоидального потока.

Переход из лимитерной в диверторную конфигурацию, сопровождаемый уменьшением большого радиуса наружной границы плазмы ($R+a = 2.00 \rightarrow 195$ м), производился при значении плазменного тока ≈ 0.75 от значения тока на плато, т.е. при токе $1.2 \div 1.3$ МА.

Эволюция основных плазменных параметров для двух базовых сценариев разряда в токамаке T-15M приведена на рисунке 5.2 и рисунке 5.3. Обозначения величин: I_p (МА) – ток плазмы; U_{res} (В) – резистивное напряжение на обходе плазмы; n_e ($1 \cdot 10^{20}$ м⁻³) – концентрация плазмы; q_{95} – запас устойчивости вблизи границы плазмы; T_e , T_i (кэВ) – температура электронов и ионов на оси плазмы; P_{OH} , $P_{доп.}$ (МВт) – мощность омического и дополнительного нагрева; $l_i(3)$ – внутренняя индуктивность плазмы; β_p , β_N – полоидальная и нормализованная бэта

плазмы; a , R (м) – малый и большой радиус плазмы, k_x , δ_x – вытянутость и треугольность сепаратрисы плазмы; τ_E (с) – энергетическое время жизни плазмы; Ψ_{res} , Ψ_{tot} – резистивные и полные (с учётом индуктивной составляющей) затраты полоидального потока.

5.1.4.3. Параметры разряда на плато тока

В омическом режиме и при небольшом дополнительном нагреве плазмы (≤ 3 МВт) принято значение концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это значение ниже предела Мураками $n_e < 2V_t/qR$ ($\approx 1.1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) и предела Гринвальда $n_e < I_p/\pi a^2$ ($\approx 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$).

Расчёты по коду ASTRA для режима с небольшим дополнительным нагревом привели к следующим результатам. Величина напряжения на обходе плазмы составляла $U_{\text{res}} \sim 1.3$ В (омический режим) и $U_{\text{res}} \sim 0.6$ В (режим с $P_{\text{доп.}} = 3$ МВт) – см. рисунок 5.2; температура на оси плазмы достигала $T_e \approx T_i \approx 3$ кэВ; энергетическое время жизни $\tau_E \approx 100$ мс; полоидальная и нормализованная бэта плазмы соответственно равны $\beta_P \sim 0.2$, $\beta_N \sim 0.6$. Профили плотности тока плазмы довольно пикированные, чему соответствовало значение $l_i \approx 0.9$.

Величина мощности дополнительного нагрева плазмы, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы, согласно базе данных ИТЭР, составляла $P_{\text{ном}} \approx 0.45 \cdot n_{20}^{0.75} \cdot V_t \cdot R^2 \approx 2 \div 2.7$ МВт (при плотности плазмы $n_e \approx (0.5 \div 1) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$). Другие скейлинги для мощности L-H перехода давали $P_{L \rightarrow H} \approx 2.5 \div 3.0$ МВт. Поэтому при уровне мощности нагрева плазмы $10 \div 20$ МВт удержание плазмы в T-15M должно соответствовать H-моду удержания.

Значение напряжения на обходе при мощном нагреве плазмы U_{res} может быть снижено примерно в несколько раз по сравнению с режимом омического нагрева, что позволяло существенно увеличить длительность импульса при чисто индуктивном сценарии разряда, а в режимах с пониженным током плазмы возможен переход к чисто неиндуктивному режиму поддержания разряда.

Величина напряжения на обходе плазмы при вкладе 20 МВт мощности в плазму с плотностью $n_e \approx 1.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ составляла $U_{\text{res}} \sim 0.25 \text{ В}$; температура на оси плазмы достигала $T_e \approx T_i \approx 7 \div 10 \text{ кэВ}$; энергетическое время жизни $\tau_E \approx 60 \text{ мс}$; полоидальная и нормализованная бэта плазмы достигали значений $\beta_P \sim 0.7$, $\beta_N \approx 2$ (см. рисунок 5.3). Эти данные показывают, что в плазме токамака Т-15М было возможно воспроизведение основных безразмерных плазменных параметров, которые предполагалось достичь в ITER-FEAT.

Кроме двух базовых сценариев плазменного разряда в токамаке Т-15М с $\Delta t_{\text{имп.}} \sim 5 \text{ с}$ был проанализирован также режим очень длинного импульса разряда ($\Delta t_{\text{имп.}} \sim 30 \text{ с}$) с переходом на неиндуктивное поддержание тока с помощью тангенциальной инжекции пучков нейтралов. Для снижения скорости нагрева электромагнитной системы для этого режима приняты уменьшенное значение тока плазмы ($I_p \approx 0.5 \text{ МА}$) и тороидального магнитного поля ($B_t \approx 1 \text{ Т}$). Уменьшена также плотность плазмы на плато разряда (до $n_e \approx 0.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$). В результате расчёты по коду ASTRA показали на возможность достижения режима неиндуктивного поддержания тока при уровне мощности дополнительного нагрева 9 МВт (см. рисунок 5.4).

Конфигурация плазмы в токамаке Т-15М с вытянутостью сечения $k_{95} \approx 1.7$ является неустойчивой по вертикали, что делало необходимым создание специальной системы управления положением плазмы.

Стабилизирующих свойств только вакуумной камеры (её сопротивление в тороидальном направлении $R \approx 200 \text{ мОм}$) не хватало для обеспечения требуемого инкремента ухода плазмы по вертикали $\gamma \leq 100 \text{ с}^{-1}$ (т.е. характерного времени ухода $\tau_\gamma \geq 10 \text{ мс}$). Поэтому в токамаке Т-15М система управления включала в себя обмотки пассивной стабилизации, расположенные внутри камеры и обмотки активного управления ОУ7 - ОУ8, расположенные вне камеры. Задача обмоток пассивной стабилизации состояла в увеличении времени ухода плазмы по вертикали до уровня $\tau_\gamma \sim 10 \text{ мс}$.

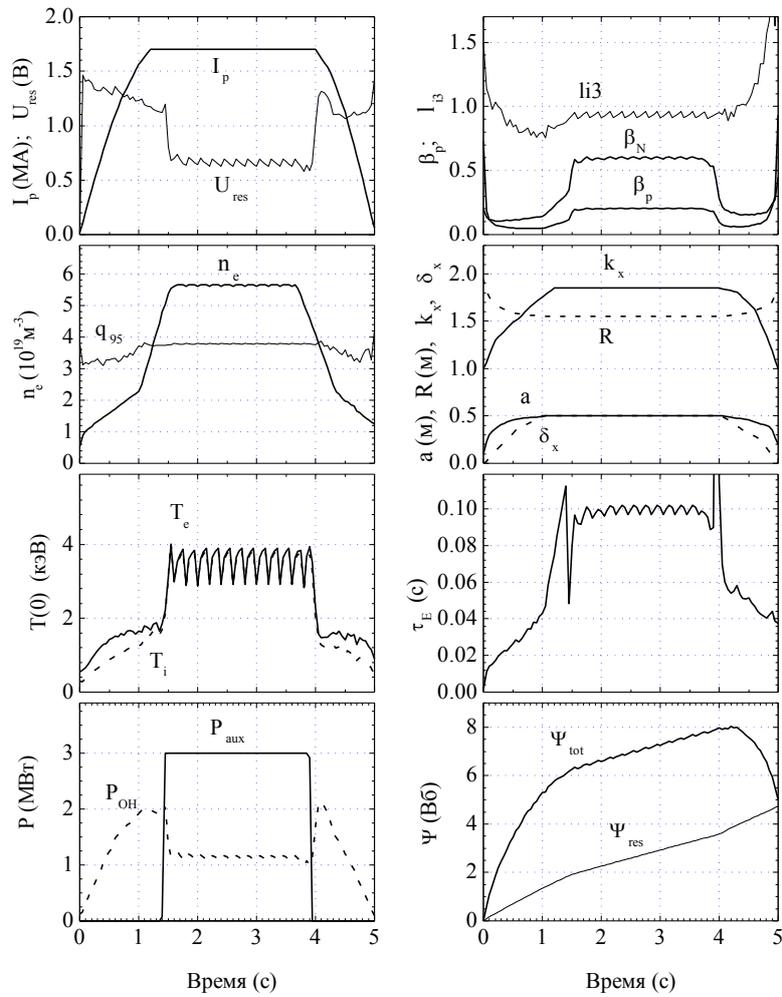


Рисунок 5.2 - Сценарий характерного разряда Т-15М с дополнительным нагревом мощностью ~ 3 МВт, током разряда 1.7 МА и среднечордовой плотностью плазмы $\sim 5.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

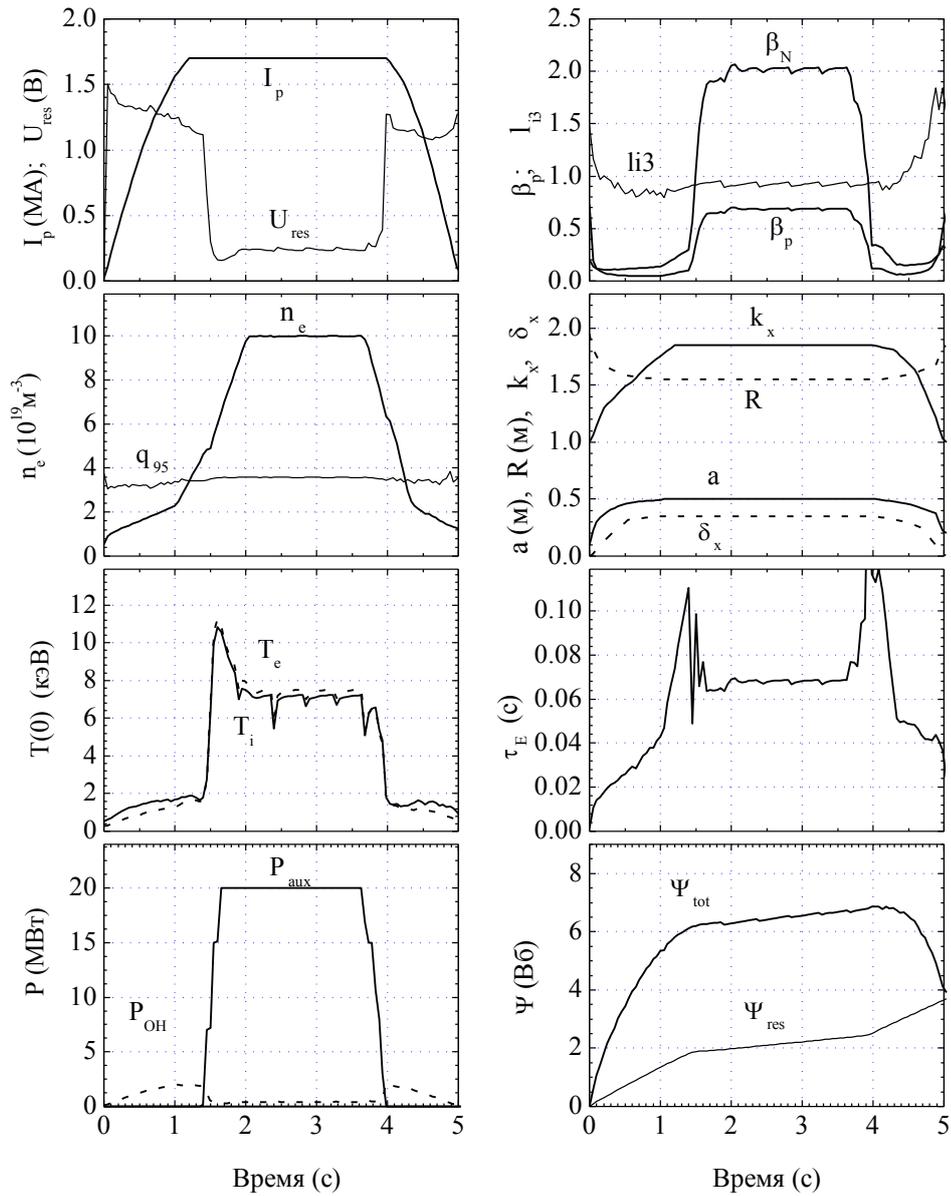


Рисунок 5.3 - Сценарий характерного разряда Т-15М с комбинированным нагревом (ИН+ЭЦР+ИЦР) мощностью ~ 20 МВт; ток разряда 1.7 МА и среднехордовая плотность плазмы $\sim 1.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

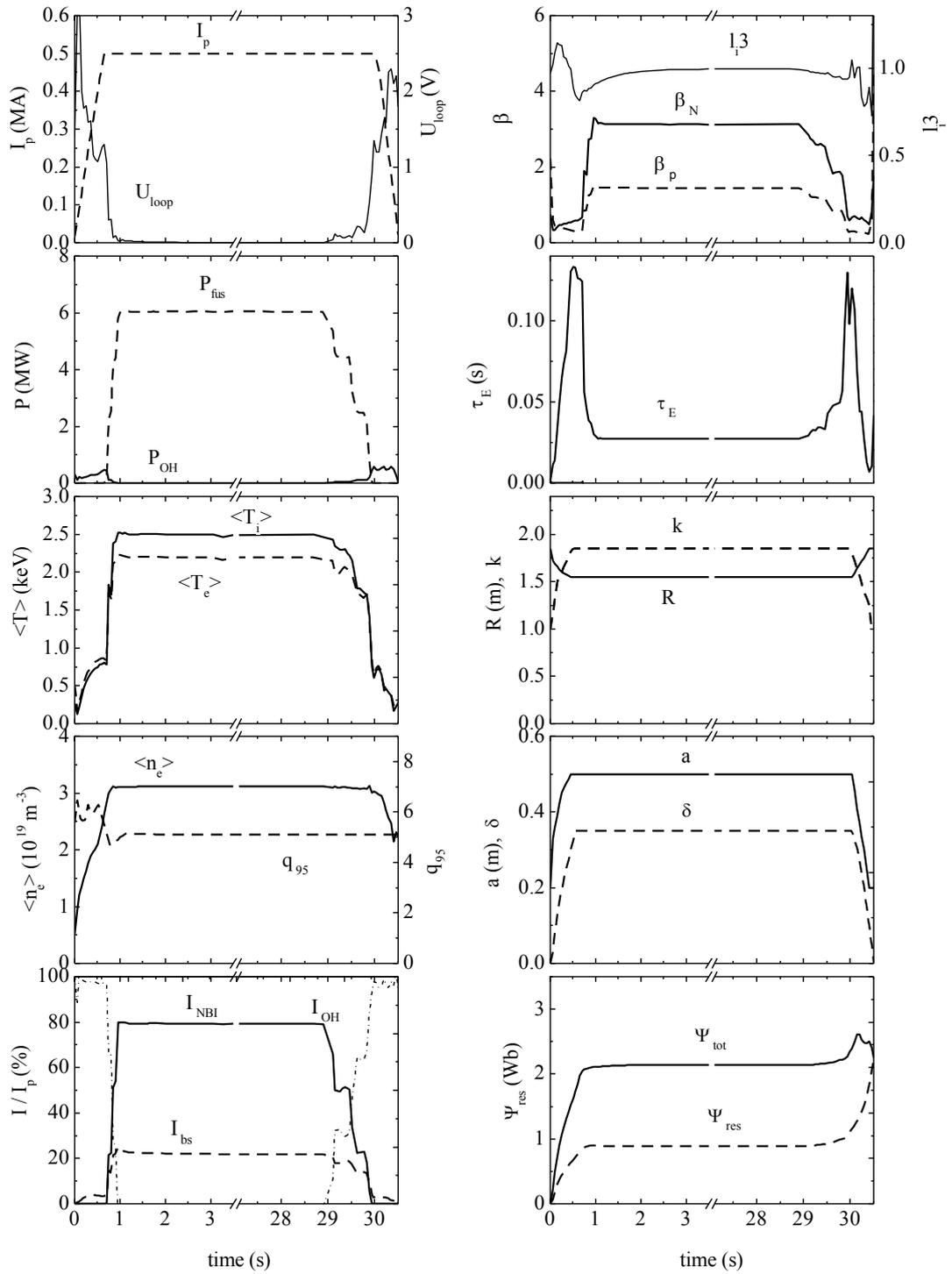


Рисунок 5.4 - Сценарий разряда токамака T-15M с увеличенной длительностью инжекции пучков 80кэВ / 9 МВт

5.1.5. Выводы к физическому обоснованию

1. В токамаке T-15M могут быть достигнуты те же значения полоидальной и нормализованной бэта, что и в реакторе ITER-FEAT.
2. Старт разряда в области, геометрически подобной ITER-FEAT может быть осуществлён при значении вихревого напряжения в камере 10 В, уровне ЭЦР подогрева плазмы 200 кВт и давлении рабочего газа $\sim 1.5 \div 2$ мПа. Скорость подъёма тока плазмы может достигать 1.5 МА/с.
3. Величина мощности дополнительного нагрева плазмы, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы составляла $2.5 \div 3.0$ МВт.
4. При уровне поглощённой в плазме мощности ~ 20 МВт возможно достичь на оси плазмы с плотностью $n_e \approx 1.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температур $T_e \approx T_i \approx 7 \div 10$ кэВ.
5. В токамаке T-15M возможно при тангенциальной инжекции пучков нейтралов 80 кэВ/9МВт достижение длительного горения разряда $\Delta t_{\text{имп.}} \approx 30$ с при неиндуктивном поддержании тока масштаба 0.5 МА.

5.1.6. Электромагнитная система

Электромагнитная система установки T-15M (ЭМС) предназначена для генерирования тороидальных и полоидальных магнитных полей [96].

В состав ЭМС входят: обмотка тороидального поля (ОТП), обмотка индуктора (ОИ), обмотки управления (ОУ), опорные конструкции.

Выбор параметров электромагнитной системы был predetermined следующими обстоятельствами. Использование имеющейся инфраструктуры (систем питания и охлаждения) установок T-10 и T-15, накладывало технические ограничения на величины токов в обмотках ($I_{\text{макс}} = 40$ кА) и напряжений, величины напора охлаждающей обмотки воды – $\Delta P = 0.8$ МПа (8 атм). Пауза между импульсами не должна была превышать 15 минут. Основные параметры ЭМС представлены в Таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Основные параметры ЭМС токамака Т-15М

Параметр	Величина
Число катушек ОТП	20
Индукция тороидального магнитного поля на оси плазменного шнура, Т	2.5
Максимальная неоднородность магнитного поля в центре плазмы, %	0.002
Максимальная неоднородность магнитного поля на краю плазмы, %	0.66
Перепад давления охлаждающей воды, МПа	0.8
Расход охлаждающей воды, м ³ /час	47
Длительность паузы между импульсами, мин	15
Масса материала обмоток (меди и бронзы), т	111
Полная масса ЭМС, т	220

Электромагнитная система токамака Т-15М представлена на рисунке 5.5.

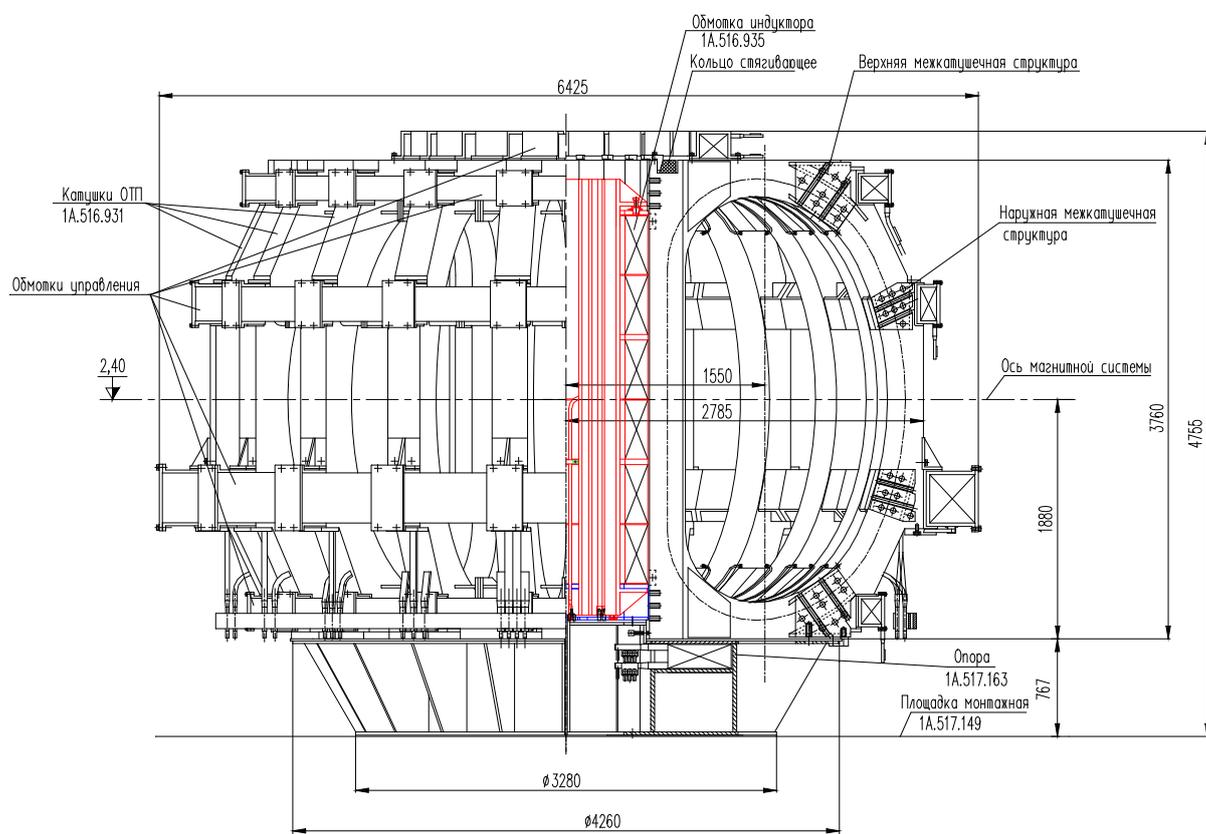


Рисунок 5.5 - Электромагнитная система Т-15М

5.1.6.1. Программа расчета параметров ЭМС Т-15

Совместно с А.Н.Чудновским, была создана программа для расчета параметров ЭМС по заданному алгоритму токов в обмотках: поведения во времени температуры нагрева проводников, температуры охлаждающей воды, величины выделившейся энергии в обмотке, скорости охлаждения после прохождения импульса тока.

Стадия подъема тока описывалась уравнениями:

- для нагрева охлаждающей воды:

$$\frac{dT_W}{dt} = F_{TW} \frac{\alpha P_{tube} (T_{cu} - T_W)}{\rho_W C_W S_W} - F_{dm} \frac{T_W - T_{W0}}{L_{cond} \rho_W S_W} \frac{\dot{m}}{N} \quad (5.1)$$

- для нагрева проводника:

$$\frac{dT_{cu}}{dt} = \frac{I^2 \rho^\sigma / S_{SB} - F_W \alpha P_{tube} (T_{cu} - T_W)}{C_{SB} \rho_{SB} S_{SB} + F_{ins} C_{ins} \rho_{ins} S_{ins}} \quad (5.2)$$

- для сценария тока

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_{UP} - I \rho^\sigma L_{cond} / S_{SB}}{L} \quad (5.3)$$

- на стадии стационарного тока:

$$\frac{dI}{dt} = 0 \quad (5.4)$$

На стадии вывода тока:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{-U_{DOWN} - I \rho^\sigma L_{cond} / S_{SB}}{L}, \quad (5.5)$$

где U_{DOWN} - обратное напряжение для вывода тока.

Выходной параметр - перепад давления ΔP вычислялся по формуле:

$$\Delta P = 2.5312 \cdot 10^{-5} \frac{\dot{m}^2 L_{cond} N}{\pi^2 d_{hyd}^5 \text{Re}^{0.25} \rho_W (T_W(t=0))} \quad (5.6)$$

В этих формулах: t - время, T_W - температура воды, T_{cu} - температура медного проводника, I - ток, $C_W = C_W(T_W)$ - удельная теплоемкость воды, $C_{SB} = C_{SB}(T_{cu})$ - удельная теплоемкость проводника, $C_{ins} = C_{ins}(T_{cu})$ - удельная теплоемкость изоляции, $\rho_W = \rho_W(T_W)$ - плотность воды, ρ_{SB} - плотность меди, ρ_{ins} - плотность

изоляции, d_{hyd} - гидравлический диаметр канала охлаждения, S_W и P_{tube} - площадь и периметр канала охлаждения, L_{cond} - длина проводника, S_{SB} и S_{ins} - площади сечения шины и изоляции, $\rho^\sigma = \rho^\sigma(T_{cu})$ - удельное электрическое сопротивление проводника, U_{UP} - начальное напряжение на обмотке, L - индуктивность обмотки, $\alpha = \alpha(T_W) = Nu \cdot \lambda / d_{hyd}$ - коэффициент теплоотдачи стенка-вода, $\lambda = \lambda(T_W)$ - коэффициент теплопроводности воды, $Nu = Nu(T_W) = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$ - число Нуссельта, $Re = 4 \frac{\dot{m}}{N \pi d_{hyd} \eta}$ - число Рейнольдса, $Pr = Pr(T_W) = C_{He} \eta / \lambda$ - число Прандтля, η - динамическая вязкость воды, \dot{m} - расход воды, N - число катушек охлаждения, F - коэффициент, учитывающий в расчетах наличие ($F=1$) или отсутствие ($F=0$) слагаемого или параметра.

Примеры расчета нагрева и охлаждения проводника обмотки тороидального поля представлены на рисунке 5.6 и рисунке 5.7.

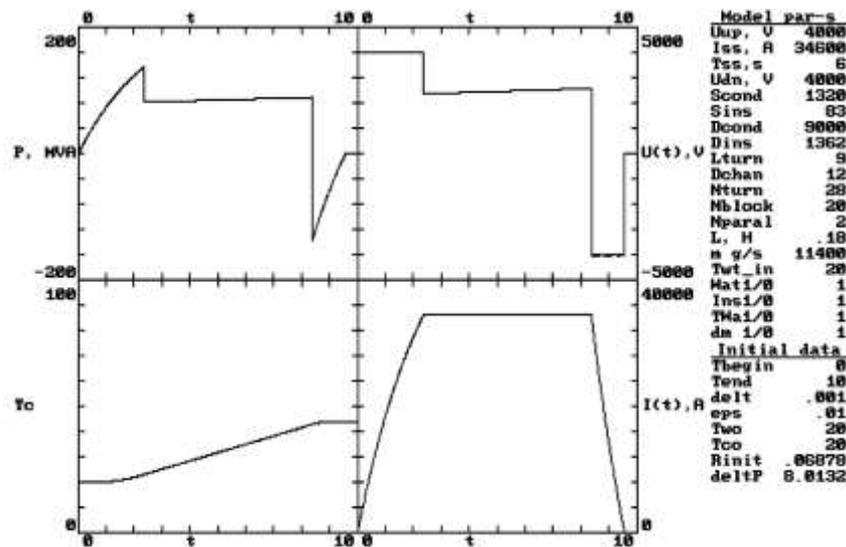


Рисунок 5.6 - Временные кривые тока в ОТП (I , А), напряжение на обмотке (U , В), температуры нагрева проводника (T_c , °С), активной электрической мощности (P , МВА).

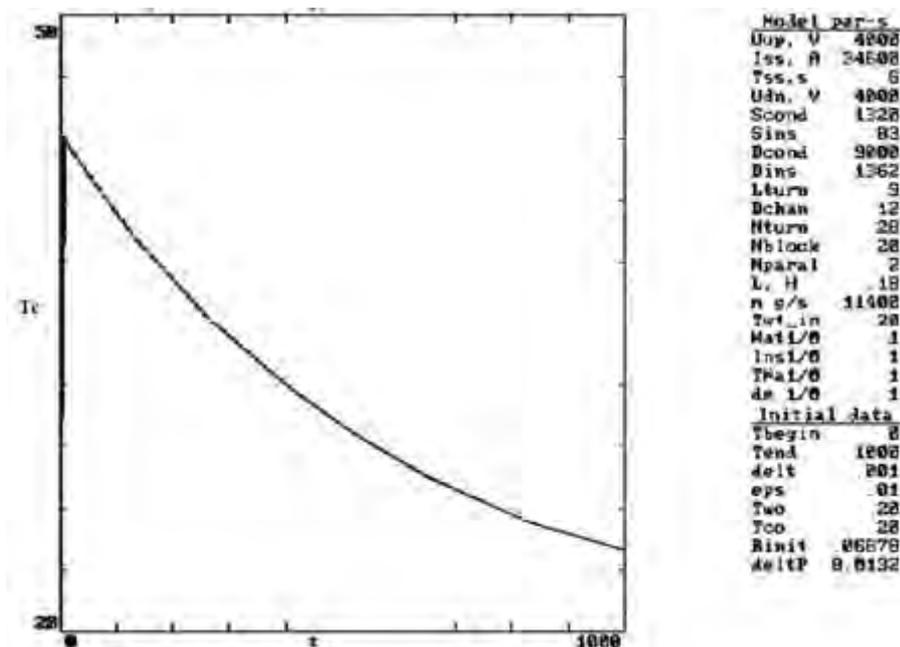


Рисунок 5.7 - Кривая охлаждения проводника ОТП после прохождения импульса тока.

5.1.6.2. Обмотка тороидального поля (ОТП)

Общий вид обмотки тороидального поля (ОТП) показан на рисунке 5.8. ОТП состоит из 20 катушек D-образной формы. Форма катушек не является классической безмоментной. Она обусловлена размерами и формой плазменного шнура, наличием однонулевого дивертора, требованиями к гофрировке тороидального магнитного поля, желанием уменьшить габариты установки, требованиями инжекции. Каждая катушка состоит из двух двухслойных секций. Секции намотаны из бронзовой трубы с размерами $26 \times 57 \text{ мм}^2$ с отверстием диаметром 12 мм. Отверстие должно быть смещено от центра проводника на 8 мм. Секции в катушке намотаны в разных направлениях, что позволяет компенсировать токи в переходных витках. Витковая изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты. Секции подвергаются пропитке эпоксидным компаундом. Перед наложением корпусной изоляции секции обрабатываются под углом 9° в зоне «внутренней ноги». При обработке срезается витковая изоляция и часть сечения с 6 витков. Проведенный тепловой расчет

показал, что перегрев охлаждающей воды с учетом уменьшения сечения проводника не превысит 50°C.

Катушки ОТП уложены в корпуса из нержавеющей стали, воспринимающие механические нагрузки. Корпуса состоят из двух половин, скрепленных болтами и штифтами. Расчет механической прочности корпусов показал, что в штифтах между половинами корпуса возникают значительные напряжения среза. Достаточную надежность конструкции могут обеспечить только штифты из высокопрочной стали установленные на расстоянии не более 300 мм друг от друга. Эти требования приводили к необходимости при дальнейшем проектировании рассмотреть вариант конструкции со сваркой двух полукорпусов. В этом варианте следовало принятия мер по сохранению электрической изоляции катушек во время сварки.

На внутренней стороне корпуса в зоне минимального зазора между ним и вакуумной камерой расположены трубки водяного охлаждения. Внутренний диаметр трубок 10 мм. Трубки впаяны в пазы корпуса.

Внешние стороны катушек связаны между собой четырьмя межблочными структурами, приваренными к корпусам. Межблочные структуры соседних катушек ОТП изолированы друг от друга стеклотекстолитовыми прокладками и скреплены между собой семью болтами М36 каждая и изолированными штифтами. Такая конструкция обеспечивала необходимую жесткость обмотки при действии электромагнитных сил, направленных из плоскости катушек. Корпуса катушек имели усиления на наружной части для крепления обмоток управления и образования горизонтальных опорных поверхностей самой ОТП.

В зоне арочного распора между катушками устанавливались тонкие изоляционные прокладки из стеклотекстолита. «Внутренние ноги» ОТП, во избежание взаимного смещения, между собой были связаны изолированными штифтами. Выводные концы катушек располагались в их нижней части. Концы каждых десяти соседних катушек ОТП соединялись между собой неохлаждаемыми шинами-перемычками с сечением 20×120 мм². Рядом с перемычками проложены компенсирующие шины с током обратного

направления. Подвод тока к каждой из двух групп катушек производится кабелями.

Для установки штифтов между корпусами катушек и межблочными структурами на заводе-изготовителе должна быть проведена контрольная сборка всей обмотки тороидального поля.

Основные параметры катушек ОТП приведены в Таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Основные параметры катушек ОТП

Параметр	Величина
Материал проводника	бронза
Удельное сопротивление, Ом·м	$1.733 \cdot 10^{-8}$
Размеры проводника, мм	$26 \times 57 / \varnothing 12$
Диаметр отверстия, мм	12
Сечение проводника, мм ²	1369
Сечение отверстия, мм ²	113.1
Число катушек в обмотке ОТП	20
Число витков в катушке	28
Длина проводника в катушке, м	252
Масса проводника в обмотке, кг	59210
Масса проводника в катушке, кг	2960
Сопротивление катушки, 293К, мОм	0.334
Сопротивление обмотки, 293К, мОм	68
Ампер-витки катушки, А	968750
Перегрев проводника, °С	24
Перепад давления воды, атм	8
Число ветвей охлаждения на катушку	2
Длина ветви охлаждения, м	126
Число ветвей охлаждения на обмотку	40
Скорость воды в ветви, м/с	2.27
Расход воды на ветвь, л/с	0.26
Расход воды на катушку, л/с	0.51
Перегрев воды, °С	24

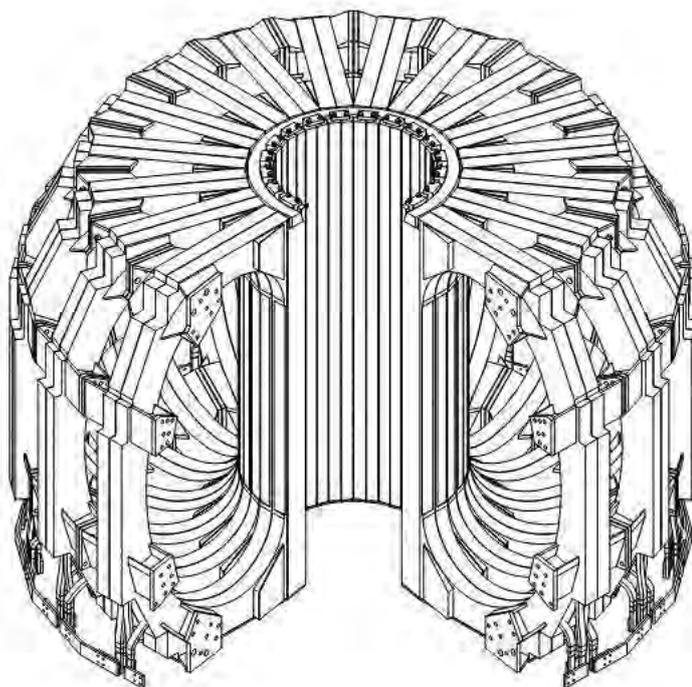


Рисунок 5.8 - Общий вид обмотки тороидального поля

5.1.6.3. Обмотка индуктора

Обмотка индуктора конструктивно состоит из шести одинаковых катушек. Две средние катушки включены последовательно на общий источник электропитания. Остальные катушки запитываются своими собственными источниками. Обмотка индуктора изображена на рисунке 5.9 (а,б).

Проводник обмотки – бронзовая труба с размерами $22 \times 22 \text{ мм}^2$ с отверстием диаметром 12 мм. Изоляция обмотки - стеклослюдинитовая лента и стеклолента, пропитанные эпоксидным компаундом.

Каждая катушка индуктора состоит из восьми двухслойных секций и двух однослойных секций сверху и внизу. Соседние секции спаиваются друг с другом серебрясодержащим припоем.

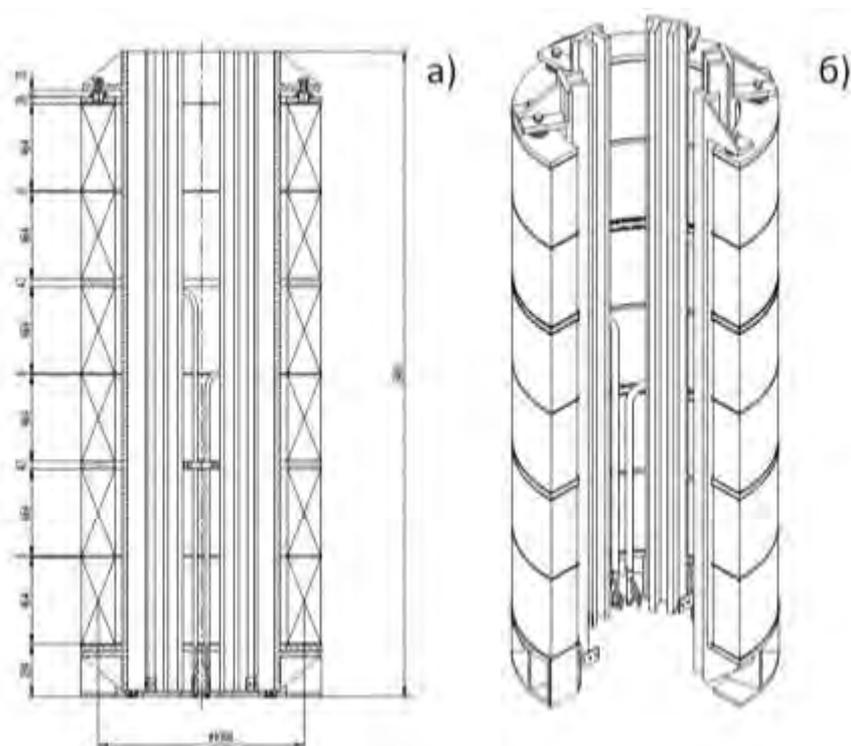


Рисунок 5.9 - а,б - Обмотка индуктора

Катушки обмотки индуктора ставятся друг на друга через тонкие стеклотекстолитовые прокладки. Между катушками ОИ2, ОИ3 и ОИ4, ОИ5 установлены стальные кольца толщиной 48 мм с изоляционными разъемами. Выводные концы каждой из катушек обмотки индуктора сбандажированы вместе стеклолентой, выведены вниз и закреплены колодками к стальным кольцам. Выводные концы катушек расположены внутри индуктора равномерно через 60° .

Во время импульса тока на катушки обмотки индуктора действуют вертикальные электромагнитные силы, изменяющиеся по величине и направлению. Жесткость обмотки индуктора в вертикальном направлении из-за большой суммарной толщины изоляции мала. Поэтому все катушки должны быть предварительно сжаты усилием не менее 100 т. Это усилие создается шестью кронштейнами, расположенными между выводными концами катушек, и двенадцатью болтами М30 в верхней части кронштейнов. Постоянное сжатие катушек обеспечивается тарельчатыми пружинами, расположенными под болтами.

Обмотка индуктора имеет свою кольцевую подставку, состоящую из двух изолированных частей. Параметры катушек индуктора приведены в Таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Основные параметры катушек индуктора (ОИ)

Параметр	катушка				
	ОИ1	ОИ2	ОИ3,4	ОИ5	ОИ6
Материал проводника	бронза				
Удельное сопротивление, Ом·м	$1.73 \cdot 10^{-8}$				
Размеры проводника, мм	22×22 / Ø12				
Диаметр отверстия, мм	12				
Сечение проводника, мм ²	367.5				
Сечение отверстия, мм ²	113.1				
Число витков в обмотке	124	124	248	124	124
Длина проводника в катушке, м	426.6	426.6	853	426.6	426.6
Масса проводника в катушке, кг	1395	1395	2790	1395	1395
Сопротивление катушки, Ом (20°C)	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02
Средний ток в витке за период, А	653	498	809	636	609
Ампер-витки обмотки, А	81017	61872	200793	78903	75595
Перегрев проводника, dT, К	15	9	23	14	13
Мощность на катушку, кВт	8.7	5.1	26.9	8.3	7.6
Перепад давления воды, атм	8				
Число ветвей охлаждения на катушку	1	1	2	1	1
Длина ветви охлаждения, м	426.6	426.6	426.6	426.6	426.6
Скорость воды в ветви, м/с	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
Расход воды на ветвь, л/с	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Расход воды на катушку, л/с	0.14	0.14	0.28	0.14	0.14
Мощность на ветвь, кВт	8.7	5.1	13.4	8.3	7.6
Перегрев воды, град.	15	9	23	14	13

5.1.6.4. Обмотки управления

Электромагнитная система Т-15М включает в себя шесть обмоток управления (ОУ). Количество витков и сопротивления обмоток выбирались с учетом использования в системе электропитания источников, имеющих в наличии в ИЯС РНЦ «Курчатовский институт». Обмотки спроектированы с расчетом на нагрев не более чем на 50°C и возможности охлаждения их за период

между импульсами 15 мин. Координаты расположения обмоток приведены на рисунке 5.10. Параметры обмоток представлены в Таблице 5.7.

Все обмотки управления представляли собой катушки, собранные из двухслойных секций. Материал проводника – медные трубы. Изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты и стеклотенты с эпоксидным связующим.

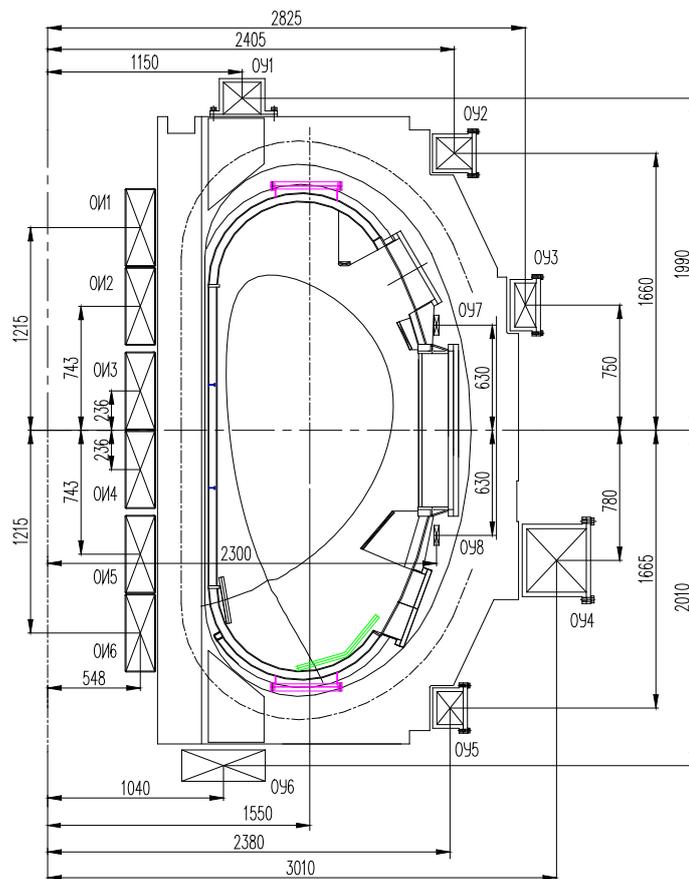


Рисунок 5.10 - Расположение обмоток управления

Таблица 5.7 - Основные параметры обмоток управления (ОУ)

Параметр	Обмотка					
	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6
Материал проводника	медь					
Удельное сопротивление Ом·м	$1.72 \cdot 10^{-8}$					
Размеры проводника, мм	20×20 / Ø9	33×43.5 / Ø15	29×29 / Ø16	33×43.5 / Ø15	29×29 / Ø16	33×43.5 / Ø15
Диаметр отверстия, мм	9.0	15.0	16.0	21.2	16.0	15.0
Сечение проводника, мм ²	335.5	1251.1	639.1	2502.2	639.1	1251.1
Сечение отверстия, мм ²	63.6	176.7	201.1	353.4	201.1	176.7
Число витков в обмотке	80	24	32	40	30	56
Длина проводника в обмотке, м	578	362	567	756	448	365
Масса проводника в обмотке, кг	1726	4038	3231	16846	2552	4074
Сопротивление обмотки, 293К, Ом	0.03	0.005	0.015	0.005	0.01	0.005
Средний ток в витке за период, А	558	2009	138	1387	479	1714
Ампер-витки обмотки, А	44700	48229	4419	55508	14398	96000
Перегрев проводника, dT, К	15	19	1	5	2	14
Мощность на обмотку, кВт	9.8	21.7	0.3	10.3	2.8	15.7
Перепад давления воды, МПа (атм)	0.8 (8)					
Число ветвей охлаждения на обмотку	2	1	1	1	1	1
Длина ветви охлаждения, м	289	362	567	756	448	365
Скорость воды в ветви, м/с	1.24	1.55	1.30	1.35	1.46	1.55
Расход воды на ветвь, л/с	0.08	0.27	0.26	0.48	0.29	0.27
Расход воды на обмотку, л/с	0.16	0.27	0.26	0.48	0.29	0.27
Мощность на ветвь, кВт	4.9	21.7	0.3	10.3	2.8	15.7
Перегрев воды, град.	15	19	1	5	2	14

Обмотки управления ОУ1, ОУ2, ОУ3 ОУ4 и ОУ5 крепятся к корпусам обмотки тороидального поля. Обмотка ОУ6 укладывается в основную опору установки Т-15М. Концы ее выводятся во внутрь. Подвод тока к обмоткам управления должен осуществляться кабелями. Все обмотки управления охлаждаются водой.

В установке Т-15М предусматривались обмотки быстрого управления плазменным шнуром ОУ7 и ОУ8. Конструктивно они представляли собой четыре однослойные седлообразные катушки, каждая из которых закреплялась на секторе вакуумной камеры. Для катушки был выбран медный проводник с размерами 20x20,Ø9 мм, используемый для обмотки ОУ1. Выводные концы катушек выходят к наружной части установки в зоне между нижней межблочной структурой и нижним наклонным патрубком вакуумной камеры. Соединения между катушками располагаются под обмоткой ОУ4 и крепятся к ее конструктивным элементам.

5.1.6.5. Сценарии токов и напряжений в обмотках полоидального поля

При разработке технического проекта установки Т-15М учитывалась необходимость возможно максимального приближения геометрии её полоидальной системы к полоидальной системе ИТЭР, а также ограничения на размещение разного рода патрубков. Предлагаемая геометрия полоидальной системы обеспечивала возможность реализации ИТЕР-подобной плазменной конфигурации.

Все катушки полоидальной системы (6 катушек обмотки индуктора и 6 катушек управления) размещались снаружи обмотки тороидального поля и имели отдельные источники питания. При этом две центральные катушки обмотки индуктора соединялись последовательно и питались от одного источника.

Начальное распределение токов в системе полоидального поля определялось с учётом возможностей системы питания и необходимостью обеспечить минимальное поле рассеяния в зоне формирования разряда с большим

радиусом $R=1.9$ м и малым $a = 0.2$ м. Осуществлялась также оптимизация начальных токов для снижения нагрузки на систему питания.

Сценарии плазменного разряда рассчитывались для двух граничных по токам полоидальной системы режимов: с омическим нагревом и дополнительным нагревом 20 МВт. В качестве базовых использовались две конфигурации плазмы.

Конфигурация (I) с большой треугольностью $\delta_{95} \approx 0.35$, $\delta_x \approx 0.5$ геометрически подобна ITER-FEAT. Её достижение предполагалось при умеренной мощности нагрева плазмы $P_{\text{доп.}} \leq 3$ МВт, при этом имелась возможность использования сравнительно простых приемных диверторных пластин ("открытый" дивертор). В конфигурации (I) положение нижней X-точки характеризуется координатами ($R= 1.3$ м , $Z = -0.9$ м).

В конфигурации (II) с уменьшенной треугольностью плазмы $\delta_{95} \approx 0.22$, $\delta_x \approx 0.35$ и с мощностью дополнительного нагрева до $P_{\text{доп.}} = 15 \div 20$ МВт предполагалось использовать "закрытый" дивертор, предназначенный для восприятия больших тепловых нагрузок. В конфигурации (II) положение нижней X-точки характеризовалось координатами ($R=1.4$ м , $Z=-1.0$ м).

Эволюция формы плазмы конфигурации I и II на стадии подъёма тока плазмы показана на рисунке 5.11 и рисунке 5.12.

Начальное формирование плазменного разряда происходит в круглом сечении на внешнем радиусе вакуумной камеры с $R=1.9$ м и $a=0.2$ м. Круглое сечение плазмы поддерживается до момента времени $t=0.11$ с и $I_p=0.13$ МА ($R=1.87$ м и $a=0.23$ м). Дальнейший рост тока плазмы происходит за счёт вытягивания шнура на интервале 0.38 с $< t < 1.26$ с. К моменту $t = 1.26$ с ток плазмы для обоих режимов достигает максимального значения $I_{pl} = 1.7$ МА и формируется однонулевая диверторная конфигурация.

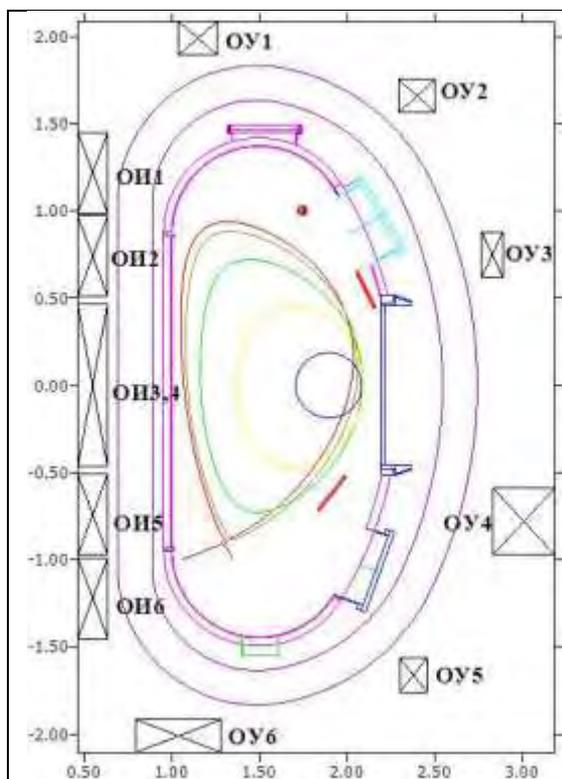


Рисунок 5.11 - Эволюция формы плазмы на стадии подъёма тока для режима I-омического нагрева

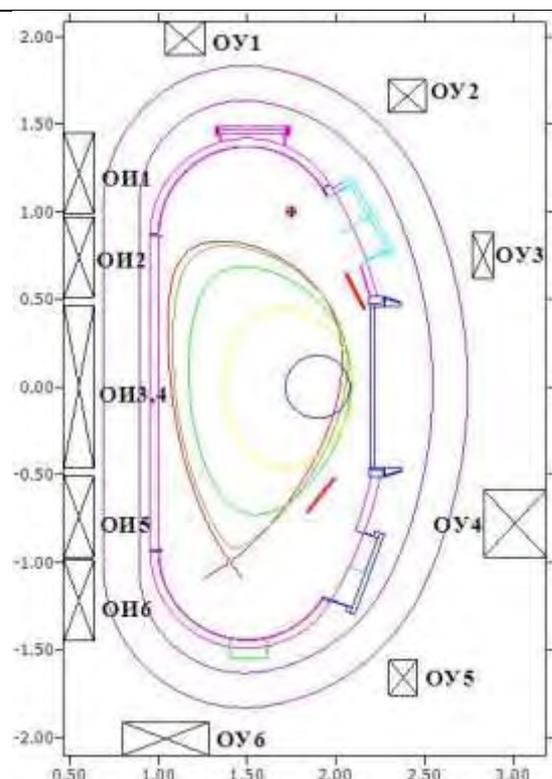


Рисунок 5.12 - Эволюция формы плазмы на стадии подъёма тока для режима II – с дополнительным нагревом 20 МВт

— $t=0.03\text{c}$, $I_p=0.045\text{MA}$; — $t=0.26\text{c}$, $I_p=0.46\text{MA}$; — $t=0.66\text{c}$, $I_p=1.11\text{MA}$;
 — $t=0.96\text{c}$, $I_p=1.46\text{MA}$; — $t=1.26\text{c}$, $I_p=1.7\text{MA}$

5.1.7. Вакуумная камера

Вакуумная камера (ВК) установки Т-15М [97] предназначена для получения вакуумного объёма с характеристиками, обеспечивающими формирование, нагрев, удержание и диагностическое наблюдение за плазменным шнуром.

Технические характеристики ВК приведены в Таблице 5.9.

В состав вакуумной камеры входят: оболочка ВК; патрубки, опора ВК; защитное покрытие; стационарный лимитер; диверторное устройство; подвижная диафрагма, элементы системы электромагнитной диагностики; элементы системы обезгаживающего прогрева; витки пассивной стабилизации.

ВК (рисунок 5.13) представляет собой металлоконструкцию оболочечного типа, размещаемую внутри ЭМС и электрически изолированную от неё.

Таблица 5.9 - Технические характеристики ВК

Параметры	Величина
Габаритные размеры: диаметр × высота, м × м	4.95 × 3.15
Толщины оболочки, мм : - центральный цилиндр; - верхняя и нижняя части тора; - на большом радиусе тора.	4 8 8
Количество полномасштабных циклов разряда плазмы с периодичностью 4 имп./ч при односменной работе	5×10^4
Количество срывов тока плазмы ($B_T \leq 2,5$ Тл, $I_p \leq 1.7$ МА)	2×10^3
Количество полных циклов обезгаживания (после разгерметизации)	2×10^2
Предельное фоновое давление, Па	3×10^{-6}
Температура прогрева, °С	220
Минимальный зазор плазма - первая стенка в экваториальной плоскости установки: - на внутреннем радиусе, мм - на наружном радиусе, мм	50 150
Материал защитных пластин	графит
Объём вакуумной камеры, м ³	33.5
Количество и размещение патрубков - экваториальный; верхний и нижний наклонные; - верхний вертикальный; - нижний вертикальный;	- 20 в каждом сечении (между ОТП); - 10 в каждом втором

ВК составляют 4 идентичных по габаритам модуля которые свариваются между собой в единое целое на монтажной площадке, после предварительной сборки с катушками ОТП. Камера устанавливается на общую с ЭМС кольцевую ферму на собственных опорах. Для присоединения оборудования дополнительного нагрева и диагностики плазмы, системы откачки, других устройств и приборов ВК оснащена патрубками с фланцевыми соединениями. Герметичность фланцевых соединений обеспечивается сваркой или медным уплотнителем. Внутренняя поверхность камеры защищена графитовыми плитками, которые охлаждаются излучением в паузах между импульсами. Конструкция ВК предусматривает установку в её нижней части диверторного устройства для работы установки в режимах «открытого» и «закрытого»

дивертора. На первом этапе эксплуатации в ВК должно было устанавливаться диверторное устройство для работы установки в режиме «открытого» дивертора. В промежутках между патрубками на внутренней поверхности камеры закреплены 3 кольцевых витка пассивной стабилизации плазмы. Электрически изолированные от камеры витки имеют разрыв в одном из сечений, а их концы соединены по 3 между собой, образуя тем самым рамку из 3-х параллельных проводников, электрически незамкнутую по тору. Снаружи камеры по обеим сторонам экваториального патрубка предусмотрены опорные площадки для крепления обмоток управления ОУ7 и ОУ8, предназначенных для активной вертикальной стабилизации плазмы. Большинство датчиков системы электромагнитной диагностики плазмы размещается в вакууме на внутренней поверхности камеры под графитовым защитным покрытием.

Для поддержания рабочей температуры (220°C) на наружной поверхности ВК уложен нагревательный кабель укрытый теплоизоляционными матами. Нижняя часть камеры в зоне диверторных пластин имеет каналы охлаждения, расположенные на её наружной поверхности. В ходе эксплуатации камера и внутрикамерные элементы обслуживаются в основном изнутри, через специально предусмотренный для этих целей люк доступа.

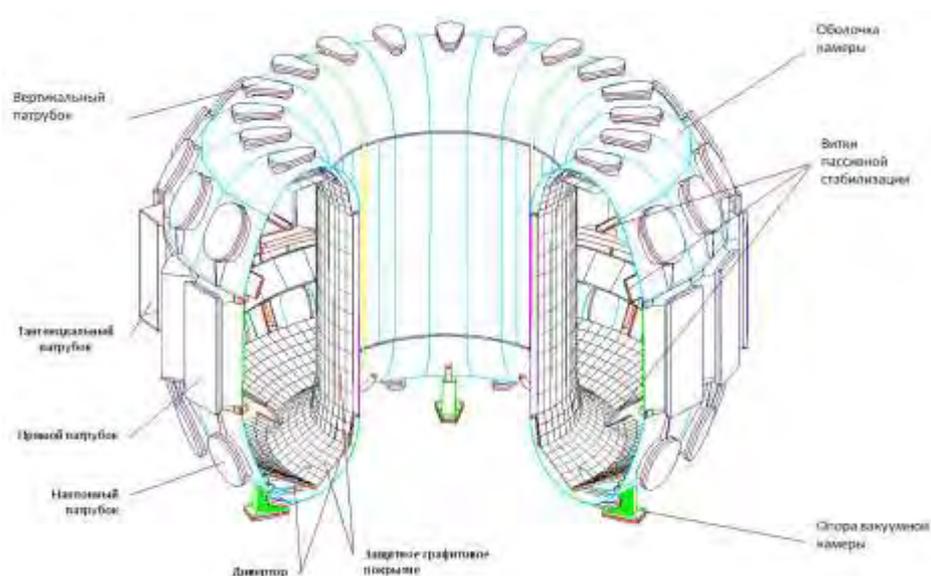


Рисунок 5.13 – Вакуумная камера установки Т-15М

Оболочка вакуумной камеры (ОВК) представляет собой цельносварную, тонкостенную, тороидальной формы конструкцию. D - образное поперечное сечение ОВК формируют стенки толщиной 4 мм и 8 мм. Внутренняя часть оболочки представляет собой цилиндр диаметром 1900 мм, наружная - состоит из 20 секторов, плоской формы по обходу тора.

Для предотвращения потери устойчивости ОВК под действием сжимающих нагрузок 36 равномерно распределённых по обходу тора поясов жёсткости полностью охватывают поперечное сечение оболочки.

В каждом из 20 сечений ОВК, во всех промежутках между ОТП, предусмотрены: экваториальный, верхний и нижний наклонные и вертикальные патрубки, предназначенные для присоединения оборудования дополнительного нагрева и диагностики плазмы, вакуумной откачки, обеспечения доступа обслуживающего персонала внутрь камеры и других целей.

Четыре тангенциальных патрубка в экваториальной плоскости ОВК с проходным сечением $300 \times 950 \text{ мм}^2$ предназначаются для инъекции нейтралов. Принимая во внимание расстояние между двумя соседними блоками ОТП, было определено, что максимально возможный радиус инъекции равен 1250 мм. Выбор геометрических параметров инъекции выполнен в расчёте на использование инжекторов установки Т-15. Один из патрубков имел противоположное трём другим направление и предназначен только для работы в режиме контр - инъекции.

Два экваториальных патрубка с минимальным проходным сечением $360 \times 950 \text{ мм}^2$, расположенных под углом 36° между собой, предназначались для ввода СВЧ мощности.

15 других экваториальных патрубков в рассматриваемом варианте имели также проходное сечение $360 \times 950 \text{ мм}^2$. Один из этих патрубков мог использоваться для обеспечения доступа обслуживающего персонала внутрь камеры через люк диаметром 400 мм.

Все экваториальные патрубки оснащены фланцами с эластомерным уплотнителем. После завершения периода пуско-наладочных работ уплотнитель

мог быть удален и выполнено сварное соединение, допускающее трёхкратную операцию резка - сварка.

Верхние и нижние наклонные, а также вертикальные патрубки общим числом 70 предназначались в основном для диагностики плазмы в т.ч. и области X-точки. В качестве материала для изготовления ОВК была принята нержавеющая сталь 12X18H10T.

Для обеспечения монтажа ОВК с неразъёмными катушками ОТП, она сегментировалась на 4 идентичных модуля. Сварка модулей оболочки также как и патрубков выступающих за ОТП должна была выполняться изнутри вакуумной камеры на монтажной площадке.

Расчет ОВК на статическую прочность и устойчивость, выполненный с учетом действия электромагнитных нагрузок: от центрального срыва, от «фало» токов и при вертикальном смещении плазмы в сочетании с действующим атмосферным давлением показал, что выбранная конструкция оболочки удовлетворяла критериям статической прочности при нормальных условиях эксплуатации.

В нижней части ВК расположено диверторное устройство, предотвращающее попадание пиковых тепловых и корпускулярных потоков из плазмы на стенки оболочки вакуумной камеры и обеспечивающее решение физических задач, необходимых для устойчивой работы установки. Предусматривалось на первом этапе работы установить диверторное устройство для работы установки в режиме «открытого» дивертора. Эти режимы характеризуются низкой мощностью дополнительного нагрева плазмы (до 3МВт) Диверторное устройство представляло собой набор отдельных модулей, образующих две сплошные по тору многогранные поверхности, находящиеся на внутреннем и наружном обходе камеры. Расположение, конфигурация и размеры диверторного устройства определялись с учётом требуемого минимального расстояния до X-точки (20 см и 50 см соответственно для внутренней и наружной ветвей сепаратрисы), а также общей компоновкой вакуумной камеры.

Модуль диверторного устройства представлял собой несущую конструкцию, выполненную из нержавеющей стали, на которой закреплены плитки из графита типа РГТ. Размеры модулей выбраны из условия необходимости их замены в процессе эксплуатации установки через люк диаметром 400 мм. Таким образом, в каждом из 18-ти градусном секторе устанавливались: один модуль - на внутреннем и два - на внешнем обводе камеры. По центру каждой графитовой плитки размером $\sim 100 \times 100 \text{ мм}^2$, располагался узел крепления, обеспечивающий её прижим. С целью улучшения теплообмена при охлаждении и прогреве графита, между контактирующими поверхностями в узле крепления предусматривалась прокладка из материала на основе графита. Плитки могли воспринимать без потери работоспособности в течение всего срока эксплуатации тепловые потоки удельной мощностью до 10 МВт/м^2 . На несущем основании закреплялись трубки для охлаждения графита в паузах между импульсами, а также электрический кабель (кирс-кабель) для прогрева до 400°C . Установленная мощность нагревателей – 40 кВт, электроснабжение которых обеспечивалось имеющейся системой питания установки Т-15.

Графитовые плитки могли прогреваться до рабочей температуры 220°C излучением от ОВК за 8 часов, и их максимальная температура после единичного импульса не превышала допустимой 1300°C для всех режимов эксплуатации установки и понижалась до 220°C в паузе между импульсами.

5.1.8. Система электропитания

5.1.8.1. Предназначение системы электропитания

Система электропитания (СЭП) предназначена для обеспечения необходимых по форме и величине импульсов токов в обмотках электромагнитной системы (ЭМС) и состоит из систем питания обмотки тороидального поля (ОТП), обмотки индуктора (ОИ) и обмоток управления (ОУ).

Система электропитания ЭМС должна обеспечивать работу установки в двух базовых режимах, а именно, в режиме с омическим нагревом плазмы и в режиме с использованием систем дополнительного нагрева плазмы мощностью 20МВт.

СЭП совместно с системой управления плазмой должны обеспечивать управление токами в обмотках и прикладываемыми к ним напряжениями в широком диапазоне.

5.1.8.2. Система электропитания обмотки тороидального поля

Обмотка тороидального поля конструктивно разделена на 20 катушек. Электрически, катушки ОТП объединены в блоки, каждый из которых состоял из 10 катушек, соединенных последовательно.

Система питания ОТП состояла из двух 12-пульсных тиристорных преобразователей, которые соединены по поочередно-последовательной схеме с двумя блоками катушек ОТП. Каждый преобразователь включал в себя два 6-пульсных мостовых выпрямителя, питаемых от 3-х обмоточного анодного трансформатора с различным соединением вторичных обмоток (Y и Δ). При этом вторичное напряжение сдвинуто по фазе в 30° эл., что позволяло использовать эквивалентную 12-пульсную схему выпрямления. Применение 12-пульсной системы выпрямления снижает пульсации напряжения на обмотке, а также уменьшает искажение напряжения в питающей сети переменного тока.

Первичные обмотки анодных трансформаторов подключены к шинам 10.5 кВ подстанции №1, которые в свою очередь питаются от сети переменного тока 110 кВ через понижающие трансформаторы.

Управление работой преобразователей и контроль состояния элементов схемы производится системой управления и защиты СЭП по сигналам от системы автоматического регулирования установки и собственных измерительных устройств в составе СЭП.

5.1.8.3. Система электропитания обмотки индуктора

Индуктор конструктивно разделен на 6 катушек ОИ1 ÷ ОИ6. Катушки ОИ3, ОИ4 соединены последовательно и имеют общую СЭП. Остальные катушки питаются отдельно, от собственных источников.

В качестве источников питания для всех катушек ОИ должны были использоваться мостовые тиристорные преобразователи, питаемые от 6-ти анодных трансформаторов. Все трансформаторы разбиты на три группы по 2 трансформатора. Первичные обмотки анодных трансформаторов подключены к шинам 10.5 кВ местной подстанции №1.

Наиболее мощной является общая система питания катушек ОИ3 и ОИ4, соединенных последовательно. Питание катушек должно было осуществляться от двух тиристорных преобразователей, включенных последовательно и образующих 12-пульсную схему выпрямления за счет различного соединения первичных обмоток анодных трансформаторов. Требуемая смена направления тока производится с помощью реверсивного переключателя. Для обеспечения повышенного напряжения на катушках, необходимого для пробоя и образования плазмы, в контур тока, предварительно заведенного в катушки, должно вводиться сопротивление. Ввод сопротивления должен был осуществляться с помощью размыкателя при открывании его контактов. Контакты размыкателя вновь замыкаются при переходе тока катушек ОИ3 и ОИ4 через ноль. В дальнейшем управление током в катушках обеспечивается тиристорным преобразователем.

5.1.8.4. Система электропитания обмоток управления

Все обмотки управления ОУ1 - ОУ6 имеют отдельные системы электропитания. Питание обмотки ОУ1 осуществляется от 12-пульсного 4-х мостового реверсивного преобразователя. Две пары тиристорных мостов, включенных по встречно-параллельной схеме, соединены последовательно и

питаются от двойного анодного трансформатора, состоящего из двух двухобмоточных трансформаторов в общем корпусе.

Аналогично построены СЭП обмоток ОУ2 - ОУ5. Режим работы обмоток ОУ1 - ОУ5 характеризуется сменой направления протекающего в них тока. Это обеспечивается встречно-параллельным включением двух тиристорных мостов. Питание обмотки ОУ6 осуществляется от тиристорного преобразователя, подключенного к вторичной обмотке трехобмоточного анодного трансформатора.

Управление работой всех преобразователей и контроль состояния элементов производится системой управления и защиты СЭП по сигналам от системы автоматического регулирования установки и собственных измерительных устройств в составе СЭП.

5.1.8.5. Система электропитания обмоток быстрого управления

Обмотки быстрого управления ОУ7, ОУ8 имеют общую систему электропитания, при этом электрически обмотки соединены последовательно, а по магнитному потоку - встречно. В качестве СЭП этих обмоток предлагалась схема на основе автономного инвертора напряжения, как показано на рисунке 5.14.

Инвертор напряжения U2 включает в себя конденсаторную батарею и однофазный мост, выполненный на полностью управляемых ключах – IGBT транзисторах. Подобная схема позволяет обеспечивать протекание тока в обмотках быстрого управления в обоих направлениях, а также регулирование тока с заданной частотой.

Инвертор напряжения питается от диодного выпрямителя U1, подключенного к анодному трансформатору T1.

Для обеспечения требуемого тока в обмотке в 10 кА при напряжении 1500 В, в каждой ветви моста должны использоваться в параллель до 8 отдельных IGBT модулей, имеющих рабочий ток 1500 А и рабочее напряжение 2500 В.

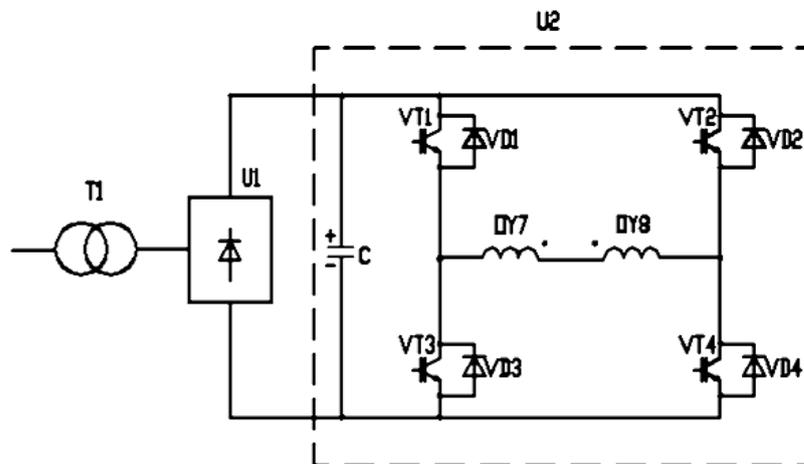


Рисунок 5.14 – Схема системы электропитания обмоток быстрого управления

5.1.8.6. Система внешнего электропитания обмоток

При проведении экспериментов с плазмой на шины 110 кВ ТЭЦ-16 по линии Токамак подается импульсная нагрузка. Форма и уровень импульсов активной и реактивной мощностей в омическом режиме и в режиме с дополнительной мощностью нагрева 20 МВт представлены на рисунке 5.15 (а,б). Уровень максимальной потребляемой активной мощности составлял 170 МВт, максимальной потребляемой реактивной мощности – 280 МВАр, длительность импульса составляла 12 с, частота следования импульсов – через 15 мин, при этом скорости нарастания активной и реактивной нагрузок соответственно составляли 30 МВт/с и 50 МВАр/с. Снятие (отключение) импульсной нагрузки происходило практически мгновенно.

Анализ режимов работы генераторов ТЭЦ-16 ОАО Мосэнерго при дополнительной импульсной нагрузке по линии Токамак, совместно с местной нагрузкой, проведенный на кафедре «Электрические станции» в МЭИ [98] показал, что включение импульсной нагрузки до 300 МВт не приводило к

нарушению устойчивости работы узла ее подключения. Это давало основание сохранить существующую кабельную линию 110 кВ от ТЭЦ-16.

По результатам проведенного анализа ОАО Мосэнерго выдал согласие на проектирование установки с потребляемой импульсной мощностью 300 МВт в течение 12 секунд и паузой между импульсами 15 минут.

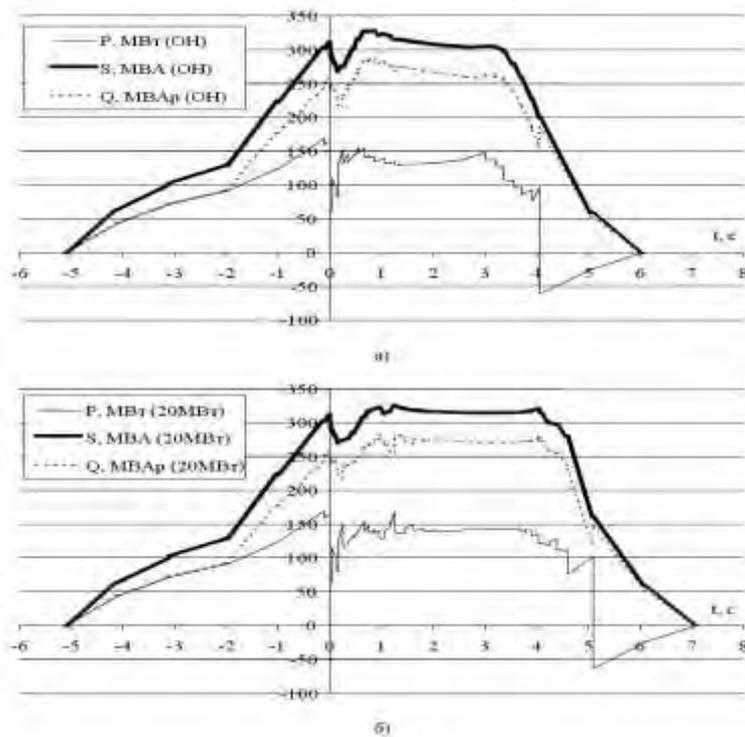


Рисунок 5.15 - Мощность, потребляемая системой электропитания установки при работе в режиме с омическим нагревом плазмы (а) и с дополнительным нагревом 20 МВт (б)

5.1.9. Выводы к разделу 5.1

1. Разработан технический проект модернизации электромагнитной системы и вакуумной камеры установки Т-15 – установка Т-15М, имеющей размеры плазменного шнура в соотношении $\frac{1}{4}$ от размеров плазмы в реакторе ITER-FEAT.
2. Дано физическое обоснование параметров токамака Т-15М.
3. При уровне поглощённой в плазме мощности ~ 20 МВт возможно достичь в приосевой области плазмы с плотностью $n_e \approx 1.0 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температуры $T_e \approx T_i \approx 7 \div 10 \text{ кэВ}$.

4. В токамаке Т-15М возможно достижение длительного горения разряда $\Delta t_{\text{имп.}} \approx 30\text{с}$ при неиндуктивном поддержании тока масштаба 0.5 МА.
5. Проведены расчеты параметров модернизированной электромагнитной системы установки Т-15М при имеющихся технических параметрах инженерных систем установки Т-15.
6. Определена максимальная потребляемая от сети электрическая мощность, равная 300 МВт. Получено согласие ОАО Мосэнерго на проектирование установки с потребляемой указанной мощностью.

5.2. Модернизация электромагнитной системы токамака Т-15 – установка Т-15Д

5.2.1. Цели модернизации и физические задачи токамака Т-15Д

В рамках подготовленной федеральной целевой программы «Овладение энергией термоядерного синтеза. Создание научно-технологической базы термоядерной энергетики в России на 2008-2015 годы» было предложено на основе сверхпроводящего токамака Т-15 разработать токамак с дивертором.

В 2006 г. в Институте ядерного синтеза было принято решение о техническом перевооружении токамака Т-15 путем создания диверторной конфигурации в существующей камере Т-15 – проект Т-15Д [32,99].

Техническое перевооружение Т-15 было нацелено на получение плазмы с температурой до 10 кэВ, создание однонулевой полоидальной диверторной конфигурации, увеличение длительности плазменного разряда до 25 с (в дальнейшем до 1000 с) и общей мощности нагрева до 20 МВт. Модернизация токамака Т-15 рассматривалась как шаг к увеличению вклада России в экспериментальные исследования, проводимые на токамаках в рамках международной кооперации.

В Таблице 5.10 приведены параметры зарубежных сверхпроводящих токамаков и токамака Т-15Д.

Таблица 5.10 - Параметры сверхпроводящих токамаков

Параметр	JT-60SA	KSTAR	EAST	SST-1	T-15Д
R, м	3.01/3.16	1.8	1.7	1.1	2.43
a, м	1.14/1.02	0.5	0.4	0.2	0.42
A = R/a	2.65/3.1	3.6	4.25	5.5	5.8
I _p , МА	5.5/3.5	2	1/1.5	0.22	1
V _t , ТЛ	2.72/2.59	3.5	3.5/4	3.0	3.5
κ	1.83/1.7	2	1.6÷2	1.7÷2	1.45
	0.57/0.33	0.8	0.6÷0.8	0.4÷0.7	0.25
t _{имп} , с	100 (8 ч)	300	1000	1000	5/25/1000
P, МВт	41	26	7/15	3	20
Дивертор	DN/SN	DN/SN	DN/SN	DN/SN	SN
Год	2015	2008	2006	2007	2012

В ряду сверхпроводящих установок токамак T-15Д с вытянутым сечением плазмы имеет большее аспектное отношение $A = 5.8$. Эксплуатация установки с большим аспектным отношением позволило бы расширить границы международной базы данных токамаков. В настоящее время подавляющее число проектов ориентировано на аспектное отношение, близкое к 3.

Анализ влияния аспектного отношения на различные параметры, проведенный в работе [100], показывал, что современное состояние экспериментальной базы данных не позволяло однозначно выявить зависимости таких параметров, как энергетическое время жизни, критическая мощность L-H-перехода, доля бутстреп-тока, пороги устойчивости МГД-мод и других от величины аспектного отношения - A. Следовательно, проведение исследований на установке T-15 предоставило бы полезные данные для анализа возможности применения токамаков с большим значением A в качестве термоядерных реакторов.

Техническое перевооружение токамака T-15 предусматривало создание новой системы формирования и управления вытянутой конфигурацией плазмы и сооружение дивертора в существующей разрядной камере установки. Указанные цели могли быть достигнуты при использовании имеющихся сверхпроводящей магнитной системы тороидального поля, вакуумной камеры установки и основных технологических систем.

Основные технические задачи модернизации токамака Т-15 следующие:

- существенная модернизация технологических систем для повышения их надежности и уменьшения эксплуатационных расходов;
- создание вытянутой сепаратрисной магнитной конфигурации в существующей вакуумной камере;
- создание системы управления равновесием вытянутой конфигурации;
- разработка, изготовление и установка диверторного устройства в вакуумной камере;
- модернизация систем нагрева плазмы и генерации тока;
- увеличение мощности нагрева до 20 МВт и в перспективе длительности разряда до 1000 с;
- разработка и изготовление системы интегрированного управления устойчивостью, равновесием, нагревом и удержанием высокотемпературной плазмы в режиме реального времени.

Для автоматизации технологических систем Т-15Д предполагалось использовать современные промышленные системы управления и сбора данных, такие как Trace Mode и Emerson-DeltaV. При создании проблемно-ориентированных информационных систем должны были быть использованы решения, согласующиеся с проектами соответствующих систем ИТЭР [53], а также учтен опыт создания платформы токамака Т-10 DASSQL [101] для работы с экспериментальными данными установок УТС.

В ходе построения комплексной системы автоматизации Т-15Д должен был быть решен ряд задач, связанных с созданием глобальной информационной инфраструктуры для установок УТС (включая ИТЭР), объединяющей экспериментальные данные, базы знаний в данной области и унифицированные средства для удаленной работы и доступа. Результатами должны были стать:

- создание и апробирование информационных систем для установок УТС (включая системы управления технологических систем, хранилище данных и инструменты удаленного участия в эксперименте);
- создание центра коллективного доступа и международного сотрудничества;

- интеграция с использованием сети Fusion Grid информационной инфраструктуры Т-15 российского центра удаленного доступа к ИТЭР и центрам обработки данных в партнерских организациях;
- подготовка кадров в области информационных технологий для термоядерной энергетики России и проекта ИТЭР.

Предполагалось, что на первом этапе эксплуатации токамак Т-15 будет работать в круглой лимитерной конфигурации. Имелись также варианты изучения бездиверторных конфигураций, более экономно использующих объем магнитного поля, в частности, режимов с литиевой диафрагмой либо виртуальными диафрагмами, создаваемыми пылевыми струями. Физические программы в поддержку ИТЭР оказывались сильно ограниченными на данном этапе.

После создания диверторной магнитной конфигурации спектр физических и технологических задач значительно расширится. Физическая программа токамака Т-15Д должна была быть ориентирована на изучение:

- квазистационарного плазменного разряда с высоким уровнем нагрева плазмы и генерации тока;
- МГД-устойчивости плазмы в режиме реального времени;
- профилей тока и давления в режиме реального времени;
- процессов переноса энергии и частиц и влияния турбулентности на перенос;
- проблем дивертора и периферийной плазмы;
- взаимодействия плазмы с различными материалами, включая графит, вольфрам и литий;
- технологии поддержания рабочего состояния первой стенки.

5.2.2. Этапы модернизации

Реализацию модернизации Т-15 планировалось осуществить в 2008-2022 гг. в три этапа [32].

На первом этапе (2008-2012 гг.) планировалось провести перевооружение технологических и диагностических систем, тестирование систем установки, эксперименты с плазмой в круглой лимитерной конфигурации и установить новые внутрикамерные элементы дивертора и систем равновесия и стабилизации плазмы. Нагрев плазмы планировалось осуществлять нейтральными частицами и электронно-циклотронными волнами с суммарной мощностью нагрева 16 МВт при длительности 5 с. При этом, мощность нейтральной инжекции (НИ) должна была составить 9 МВт, мощность гиротронной системы для ввода электронно-циклотронных волн (ЭЦР) - 7 МВт (Таблица 5.11).

Таблица 5.11 - Проектные параметры систем нагрева

Метод нагрева	2008—2012	2013—2017	2018—2022
НИ, МВт	9	9	9
ЭЦР, МВт	7	7	7
НГ, МВт	—	4	4
ИЦР	—	—	4
Длительность, с	5	25	1000

Эксперименты с вытянутой конфигурацией и дивертором при длительности разряда 25 с должны быть начаты на втором этапе (2013 ÷ 2017 гг.). Мощность нагрева плазмы должна была быть увеличена до 20 МВт. Это позволило бы проводить эксплуатацию токамака в базовых режимах. На этом этапе предусматривалась работа токамака Т-15Д с термоядерными параметрами плазмы при длительности разряда 5 с и модернизация установки для увеличения длительности разряда до 25 с. Увеличение мощности нагрева предполагалось осуществить за счет системы нижнегибридного нагрева плазмы (НГ) мощностью 4 МВт.

Модернизация магнитной системы, систем нагрева и генерации тока для разряда длительностью 1000 секунд планировалась на третьем этапе с 2017г. по 2022 г. одновременно с проведением экспериментальной программы. В этот период должны быть разработаны и установлены сверхпроводниковые полоидальные обмотки и охлаждаемые защитные элементы стенки. Мощность

нагрева должна быть увеличена до 24 МВт за счет системы ионно-циклотронного нагрева плазмы (ИЦР) мощностью 4 МВт [102].

5.2.3. Максимальная длительность разряда

Длительность импульса разряда при наличии методов безиндуктивного поддержания тока при фиксированной величине тока плазмы определяется допустимой величиной и длительностью токов, текущих в полоидальных обмотках. В T-15 эти обмотки криорезистивные и охлаждаются жидким азотом. При заданной величине тока максимальная длительность импульса тока в обмотках управления определяется допустимой величиной выходной температуры азота. Как показали предыдущие эксперименты, максимальный перегрев азота, во избежание его закипания, не должен превышать 10 К. Перегрев существующих полоидальных обмоток ограничивает длительность импульса тока в плазме даже при неограниченных возможностях системы безиндуктивного поддержания тока. Расчетные зависимости максимально возможных значений токов в обмотках управления в зависимости от длительности их протекания показаны на рисунке 5.16. 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 с [32].

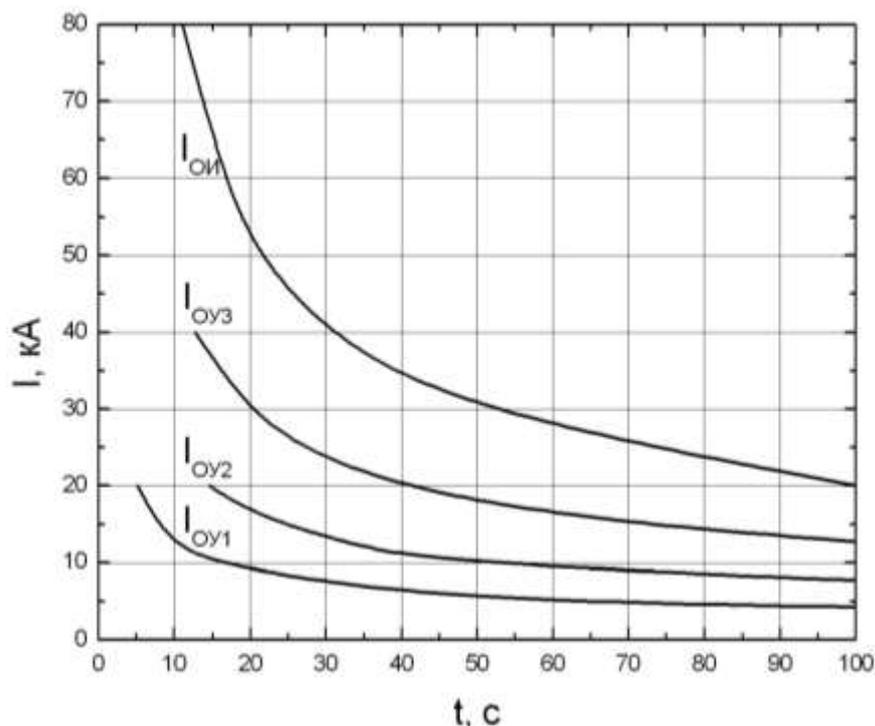


Рисунок 5.16 - Расчетные зависимости максимально возможных значений токов в обмотках управления в зависимости от длительности их протекания

В режимах квазистационарного поддержания тока плазмы тепловая энергия, вкладываемая в разряд, передается на внутренние элементы разрядной камеры и в дивертор. Если считать, что половина энергии, вложенной в разряд, уходит на диверторные пластины, а вторая половина — на внутрикамерные элементы, то в процессе импульса силовые секции камеры будут нагреваться со скоростью 0.14 град/МДж, защитные экраны камеры - со скоростью 1.5 град/МДж. Так, при уровне мощности 10 МВт падающей на поверхность камеры в течение 25 секунд силовые секции нагреются на 32° , защитные экраны камеры - на 370° , сифоны - на 80° , тепловая нагрузка на азотный уровень возрастет на 12 кВт, на гелиевый уровень, примерно на 100 Вт (рисунок 5.17 а, б). При пассивном охлаждении время остывания защитных экранов в существующей конструкции до первоначального уровня температур составит около 1.5 часов. Следовательно, поддержание равновесной диверторной конфигурации плазмы в течение более 100 секунд требовало замены криорезистивных обмоток на сверхпроводящие и установки водоохлаждаемой первой стенки камеры.

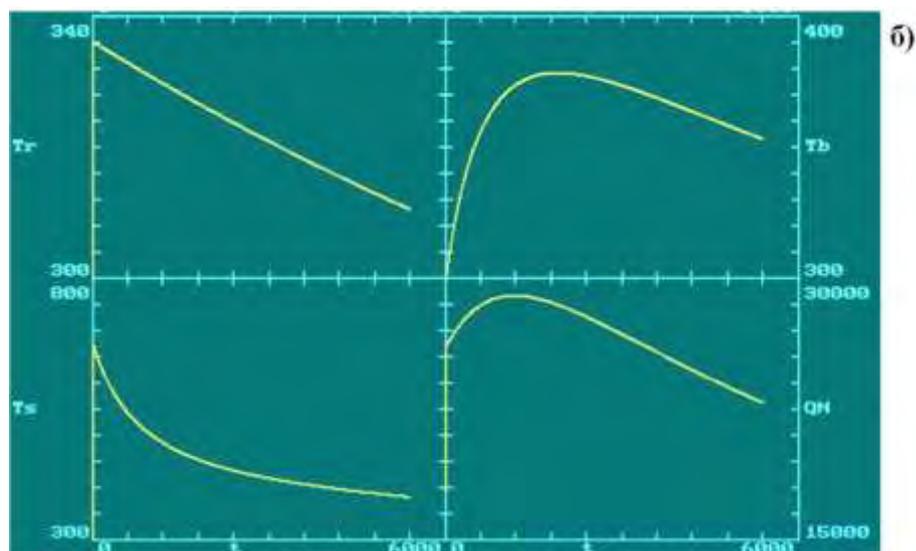
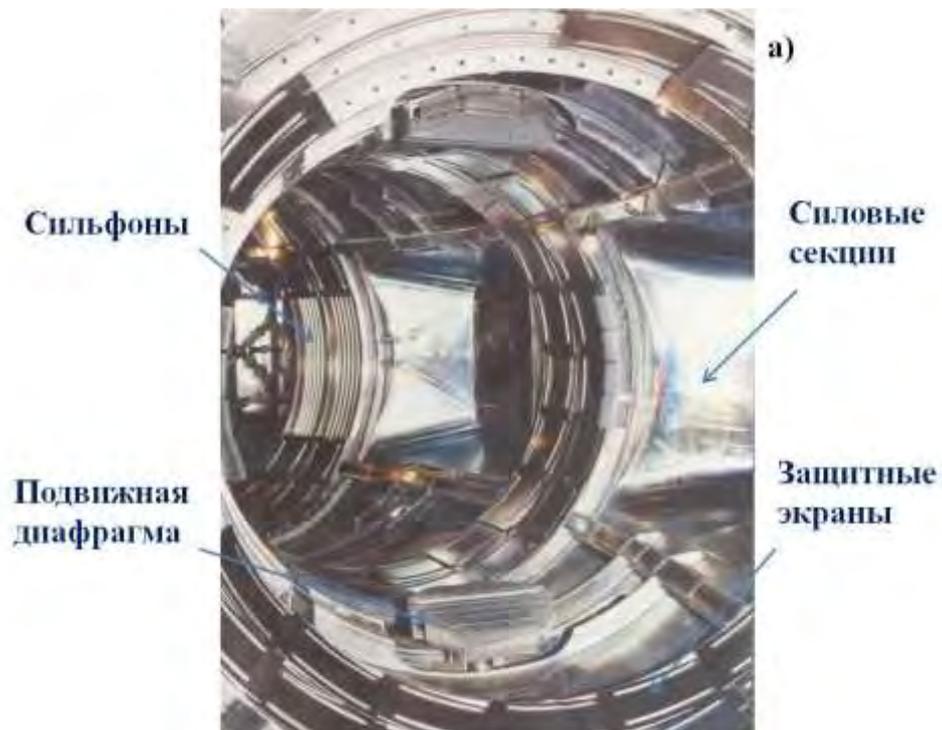


Рисунок 5.17 – а) внутрикамерные элементы; б) расчетные кривые температуры (T , К) нагрева и пассивного охлаждения внутрикамерных элементов при уровне падающей на поверхность камеры мощности 10 МВт в течение 25 с: T_r – температура силовых секций, T_s – температура защитных экранов, T_b – температура сильфонов. Q_N - тепловая нагрузки на ВАЭ (Вт)

5.2.4. Состав комплекса внутрикамерных элементов

Комплекс внутрикамерных элементов (ВКЭ) Т-15Д является сложным устройством, составные части которого объединены в единую сборку внутри вакуумной камеры.

Функционально комплекс ВКЭ Т-15Д состоит из четырёх основных устройств: системы дополнительных магнитных полей, приёмного диверторного устройства, первой стенки, системы электромагнитной и технологической диагностики.

Система дополнительных магнитных полей в свою очередь состоит из трёх функциональных частей: системы полоидальных магнитных полей, системы пассивной стабилизации плазменного шнура, системы активной стабилизации плазменного шнура.

Расположение внутрикамерных элементов показано на рисунке 5.18.

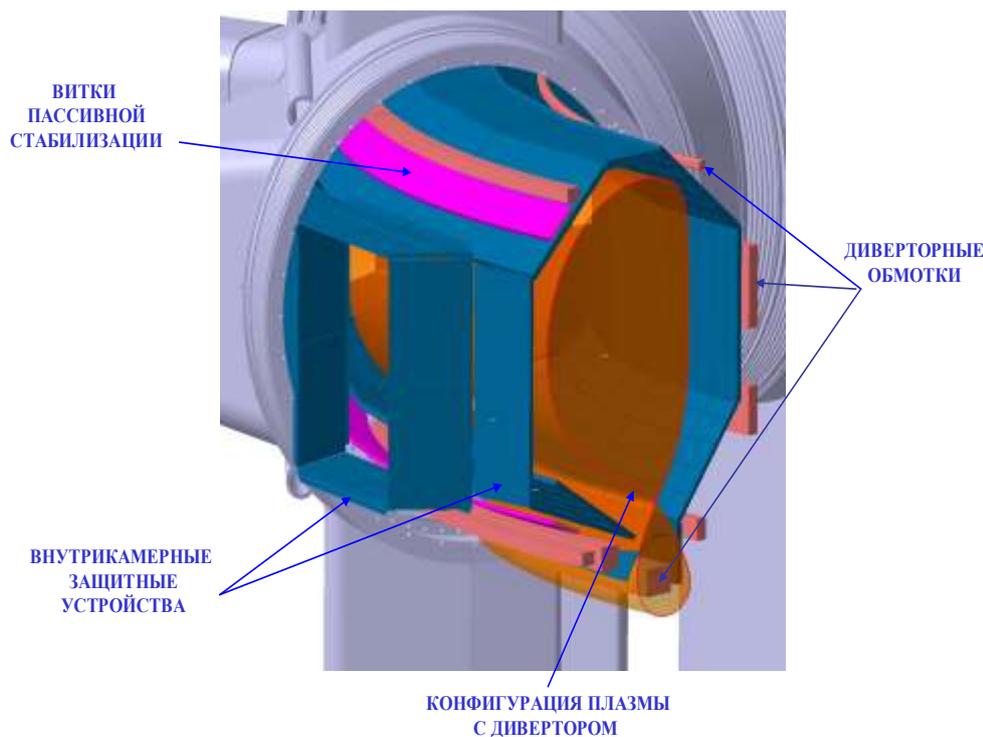


Рисунок 5.18 – Расположение внутрикамерных элементов

5.2.4.1. Модернизация магнитной конфигурации плазменного шнура

Диверторная конфигурация плазменного шнура предъявляет специфические требования к системе создания магнитных полей. Наиболее эффективные плазменные режимы получаются в магнитной конфигурации с высокими значениями вытянутости ($k > 1.5$) и треугольности ($\Delta > 0.3$) плазменного шнура и оптимизированного диверторного устройства. Для создания и управления диверторной сепаратрисной конфигурацией токамака Т-15Д с заданной вытянутостью и треугольностью была предусмотрена модификация существующей системы полоидальных магнитных полей. Система должна была включать тороидально направленные токопроводящие витки (в количестве шести), охлаждаемые водой, расположенные внутри вакуумной камеры токамака (рисунок 5.19). Для стабилизации плазмы относительно быстрых вертикальных смещений требовалась установка внутри вакуумной камеры токопроводящих витков пассивной и активной стабилизации. По два витка как пассивной, так и активной стабилизации расположены внутри вакуумной камеры на внешнем обводе тора (рисунок 5.19).

Дополнительно для создания и обеспечения равновесия плазменного шнура (рисунок 5.20) должна использоваться имеющаяся система полоидальных полей токамака Т-15. Равновесие плазменного шнура по большому радиусу обеспечивается тремя обмотками управления (ОУ1-3), расположенными с внешней стороны сверхпроводящей обмотки тороидального поля. Для организации разряда на начальной стадии и подавления быстрых возмущений равновесного положения должна использоваться имеющаяся быстродействующая обмотка управления по большому радиусу (седловые катушки), состоящая из 12 верхних и 12 нижних секций (ОВУП). Для автоматического регулирования положения плазменного шнура по вертикали предназначена обмотка управления положением по вертикали (ОГУП).

Основные параметры ЭМС Т-15Д и технические характеристики внутрикамерных диверторных обмоток ОД1-6 (PF1-6) представлены в Таблице 5.12 и Таблице 5.13.

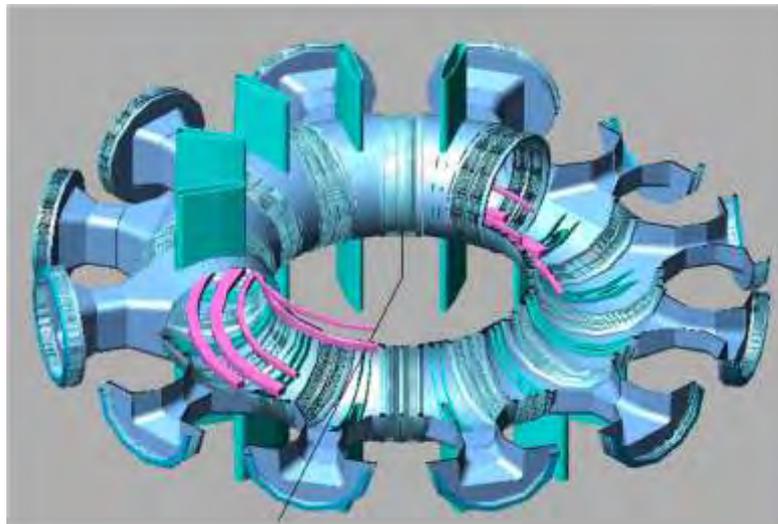


Рисунок 5.19 – Расположение диверторных витков в камере установки Т-15Д

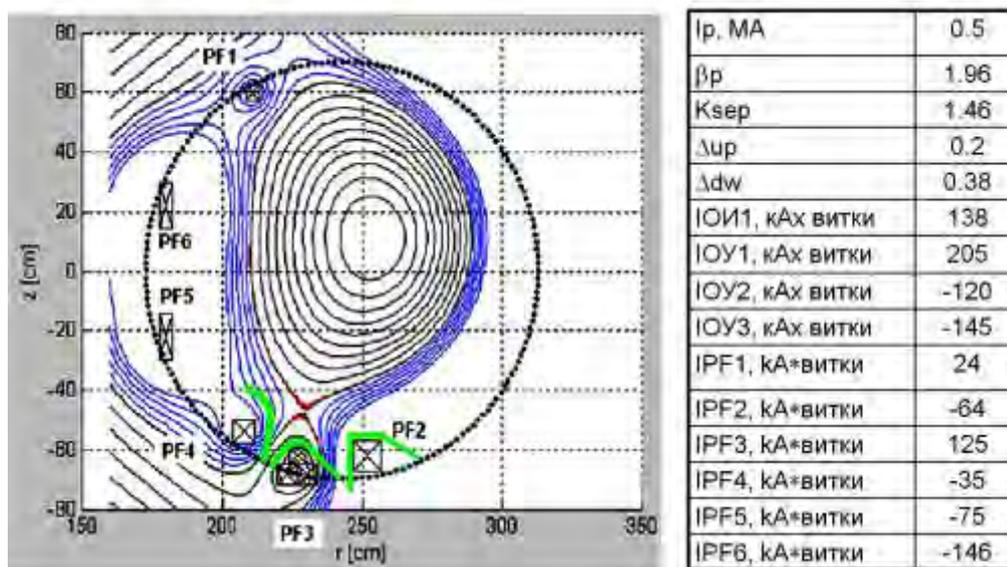


Рисунок 5.20 – Магнитная конфигурация с дивертором с учетом железного сердечника. Ток плазмы – 0.5 МА

Таблица 5.12 - Основные параметры ЭМС Т-15Д

Наименование параметров	Величина
Большой радиус плазменного шнура, м	2.5
Малый радиус плазменного шнура, м	0.39
Ток плазмы, МА	0.52
Длительность разряда, сек	30
Длительность паузы между импульсами, мин	20
Число катушек ОТП	24
Индукция тороидального магнитного поля на оси плазменного шнура, Тл	3.3
Максимальная неоднородность магнитного поля в центре плазмы, R=2.5 м, %	0.008
Максимальная неоднородность магнитного поля на краю плазмы, R=2.9 м, %	0.19
Число внутрикамерных обмоток	6
Число внутрикамерных активных обмоток	2
Число внутрикамерных пассивных витков	2

Таблица 5.13 - Технические характеристики диверторных обмоток

Катушка		ОД1	ОД2	ОД3	ОД4	ОД5	ОД6
Максимальный ток при равновесии А·витки, МА		0.085	-0.141	0.036	0.067	0.005	0.16
Макс. силы при равновесии, т/м	Радиал.	-0,66	-0,33	-0.44	1.03	-0.05	-1.49
	Верт.	0.33	0.58	-0.12	0.61	0.02	0.47
Макс. силы при срыве плазмы, т/м	Радиал.	-0.86	-0.79	-0.67	±0.93	-0.26	-1.3
	Верт.	0.43	0.74	0.16	-0.19	0.1	-0.59
Число витков		14	24	6	12	1	26
Средний радиус, м		1.78	2.3	2.063	2.573	2.055	1.78
Сечение проводника, мм ²		20x20, Ø12	20x20, Ø12	20x20, Ø12	20x20, Ø12	Ø30 x Ø 10.5	20x20, Ø12

Аналогично предложенному в проекте Т-15Д варианту конфигурации плазменного шнура, в настоящее время разработан проект WEST (W – for tungsten – Environment in Steady-state Tokamak) по созданию стенда, на базе токамака Tore Supra (Франция), в поддержку проекта ИТЭР для проведения

материаловедческих исследований работы в стационарном режиме приемных пластин дивертора, изготовленных из вольфрама [103].

5.2.4.2. Диверторное устройство

Создание вытянутой сепаратрисной конфигурации плазменного шнура требует установки специального диверторного устройства для приема потоков частиц и тепла. Диверторное устройство, располагаемое в нижней части вакуумной камеры, должно включать в себя приемные пластины и защитное покрытие стенки под дивертором. Дивертор должен обеспечивать:

- безопасный прием теплового потока из основной плазмы и защиту стенок вакуумной камеры от разрушения;
- контроль плотности основной плазмы;
- поддержание уровня примесей в основной плазме ниже уровня, соответствующего радиационному охлаждению центральных областей плазменного шнура;
- низкий поток нейтрального газа из диверторного объема в центральную плазму и область X-точки, не приводящий к ухудшению удержания основной плазмы.

Диверторные приемные пластины должны были воспринимать без потери работоспособности тепловые потоки большой удельной мощности (до 20 МВт/м²). 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.

5.2.4.3. Первая стенка

Условия работы первой стенки установки Т-15Д являются гораздо более мягкими, чем дивертора. Во-первых, она подвержена воздействию значительно

меньшим циклическим тепловым нагрузкам – плотность теплового потока на нее составляет всего около 0.2 МВт/м^2 . Во-вторых, этот поток является более или менее равномерным, т.е. воздействующим на всю поверхность первой стенки. Это обстоятельство является важным, потому что равномерная тепловая нагрузка означает отсутствие зон локального перегрева, вызывающих дополнительные, и иногда весьма сильные, напряжения в самом материале облицовки. Небольшая величина и равномерность воспринимаемого теплового потока позволяли применить при облицовке первой стеки Т-15Д достаточно крупные в плане облицовочные плитки.

Проведенные тепловые расчеты показали, что первая стенка может иметь механическое закрепление облицовки на охлаждаемой теплоотводящей подложке, с локально расположенными зонами теплового контакта с ней через «графлекс». Т.к. такой тепловой контакт не обеспечивает динамического равновесия между получаемым от плазмы теплом и его отводом на подложку, с течением импульса теплового нагружения температура облицовки повышается, а накопленное тепло отводится на подложку во время паузы. Из этого следует, что облицовочные плитки первой стенки должны иметь достаточную теплоемкость (быть достаточно толстыми), чтобы аккумулировать получаемое в импульсе тепло, оставаясь при этом не слишком горячими. Предполагалось изготавливать облицовку первой стенки установки Т-15Д из графита МПГ-8. Наиболее оптимальными представлялось использовать для облицовки первой стенки плитки со сторонами около $100 \times 100 \text{ мм}^2$ и толщиной порядка 20 мм. Теплоотводящая подложка должна быть изготовлена из нержавеющей стали и иметь приваренные к ней с обратной стороны трубки водяного охлаждения, которые должны располагаться как можно ближе к зонам теплового контакта с облицовкой через «графлекс».

Конструктивно, внутрикамерные защитные устройства (теплоотводящая подложка с графитовой облицовкой) образуют восьмигранную тороидальную оболочку (рисунок 5.18), каждая грань которой, кроме нижнего дивертора, в свою очередь, является замкнутой многогранной фигурой, образованной плоскими модулями (панелями). Зазоры между гранями защиты и между панелями каждой

границы на уровне $1.5 \div 2$ мм. При суммарной тепловой нагрузке на первую стенку 10 МВт (0.2 МВт/м^2) расход воды должен быть не менее $140 \text{ м}^3/\text{час}$ при подогреве воды не более 60°C .

5.2.5. Сценарии разряда

Расчеты основных сценариев разряда и плазменных параметров в установке Т-15Д [32] были проведены В.М. Леоновым с использованием транспортного кода ASTRA. Для описания процессов переноса использовался режим с Н-модой удержания. Три различных сценария отражали возможности работы Т-15Д в режимах с высокими характеристиками: режим с высокой плотностью плазмы (режим I); режим с низкой плотностью и полностью неиндукционным током (режим II); режим с полностью неиндукционным током и высоким значением нормализованной β_N (режим III). Эффективность генерации тока ЭЦ - волнами была оценена с использованием кода OGRAY [104]. Мощность нагрева 16 МВт для всех режимов (9 МВт НИ и 7 МВт ЭЦР). Результаты расчетов приведены в Таблице 5.14 и на рисунках 5.21-5.23.

Таблица 5.14 – Результаты расчетов параметров плазмы для трех режимов

Режим		I	II	III
I_p , МА		1	1	0.5
V , Тл		3.15	3.15	2.63
$n, 10^{19} \text{ м}^{-3}$		14.4 ($0.8 n_{Gr}$)	3.56 ($0.2 n_{Gr}$)	7.2 ($0.8 n_{Gr}$)
β_T , %		1.82	1.35	1.58
β_n , %		2.41	1.78	3.49
β_p		1.17	0.87	2.83
l_i		0.76	0.65	0.65
I_{oh} , %		75.3	0	0
I_{bs} , %		14.7	20.4	44.9
I_{CD} , %		10	79.6	55.1
$(I_{bs} + I_{CD})/I_\Sigma$		0.147	1	1
$t_E^{98,y2}$ [51], мс	H/ D	79/91	45/51	31/35

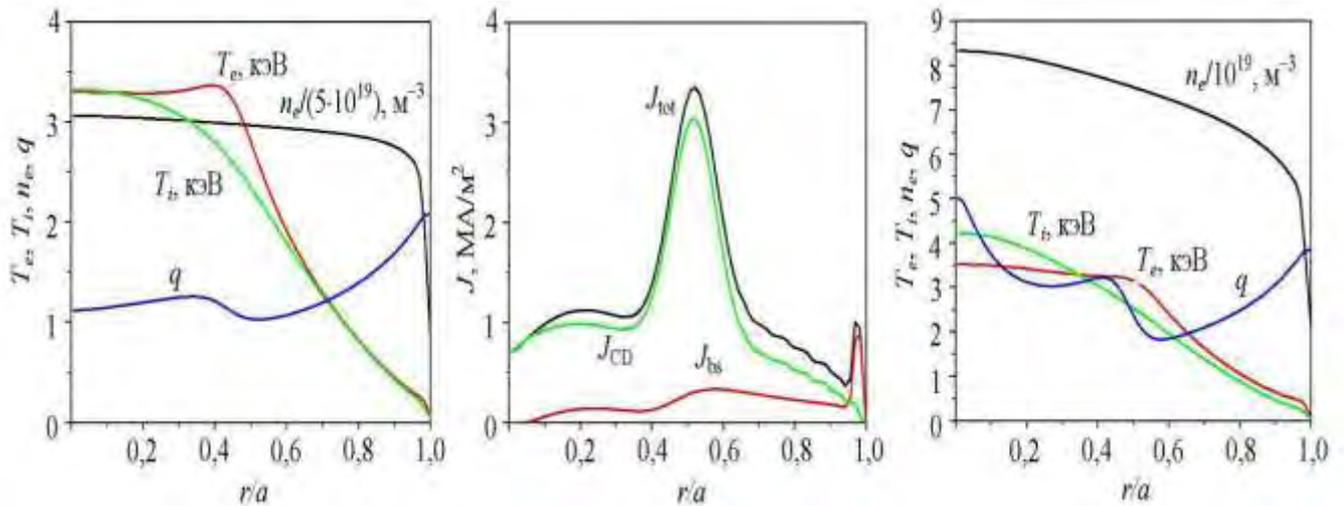


Рисунок 5.21 - Рисунок 5.22 - Рисунок 5.23 -
 Рассчитанные радиаль- Рассчитанные радиаль- Рассчитанные радиальные
 ные профили плотнос- ные профили полного профили плотности,
 ти, электронной и тока (J_{tot}), неиндукцион- электронной и ионной
 ионной температур и ного тока (J_{CD}) и температур и фактора
 фактора запаса бутстреп тока (J_{bs}) в запаса устойчивости в
 устойчивости в режиме I режиме II режиме III

Расчеты показали следующее:

1. 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 $T_e, T_i > 3 \text{ кэВ}$ в центральных областях (см. рисунок 5.21). Нормализованная β_N достаточно высока в этом режиме (Таблица 5.14) и близка к величине, принятой для ИТЭР. При более низкой плотности $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температура в центре шнура превышает 6 кэВ.
2. В токамаке Т-15Д возможна реализация квазистационарного режима с полностью неиндукционным током. Радиальные профили токов для неиндуктивного сценария показаны на рисунке 5.22. Режимы с полностью неиндукционным током могут быть реализованы при $I_p = 1 \text{ МА}$ при помощи генерации токов ЭЦ-волнами и нейтральной инжекцией при плотности плазмы $3.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Доля бутстреп-тока f составляет 0.2 в этом режиме.

3. Неиндукционные токи I_{CD} , генерируемые ЭЦ-волнами и НИ, позволяют осуществить управление профилем тока в широких пределах. В частности, возможно получение профилей тока с обратным широм и вариация минимума коэффициента запаса устойчивости $q_{мин}$ в широком диапазоне ($q_{мин} = 1 \div 2$).
4. Рисунок 5.23 демонстрирует возможности работы в режиме с полностью неиндукционным током и высокими значениями плотности ($0.8n_G$) и нормализованной $\beta_N = 3.46$. Такой режим, когда β_N превышает идеальный предел без стенки, мог использоваться для изучения устойчивости плазмы. Для поддержания стационарного режима с высокими β_N планировалось использовать ЭЦРН для управления неоклассическими тиринг-модами (NTM) [105], а также внутрикамерные катушки для подавления внешних винтовых мод [106], стабилизация которых стенкой камеры оказывается неполной из-за ее конечной электропроводности, так называемых Resistive Wall Modes (RWM).

Для определения пороговой мощности L-H перехода были проведены расчеты с использованием следующих скейлингов, принятых для оценок ИТЭР [53]:

$$P_{th}^{LH99(1)} = (2.84 \pm 0.254)n_e^{0.58 \pm 0.035} B_T^{0.82 \pm 0.031} R^{1.0 \pm 0.089} a^{0.8 \pm 0.066} M^{-1} \quad (5.2.1)$$

$$P_{th}^{LH99(2)} = (0.108 \pm 0.005)n_e^{0.49 \pm 0.03} B_T^{0.85 \pm 0.032} R^{0.84 \pm 0.016} M^{-1} \quad (5.2.2)$$

Результаты расчетов показаны на рисунке 5.24. Расчеты проводились для водородной ($M = 1$) и дейтериевой ($M = 2$) плазмы и для двух значений тороидального магнитного поля (3.15 Тл и 2.63 Тл). На рисунке показаны значения пороговой мощности, полученные по обоим скейлингам. Верхняя граница каждой из областей соответствовала скейлингу $P_{th}^{LH99(1)}$, нижняя — скейлингу $P_{th}^{LH99(2)}$. На основании приведенных оценок можно было сделать вывод, что H-мода в установке с дивертором будет получена, однако значение пороговой мощности оказывается довольно высоким. 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.

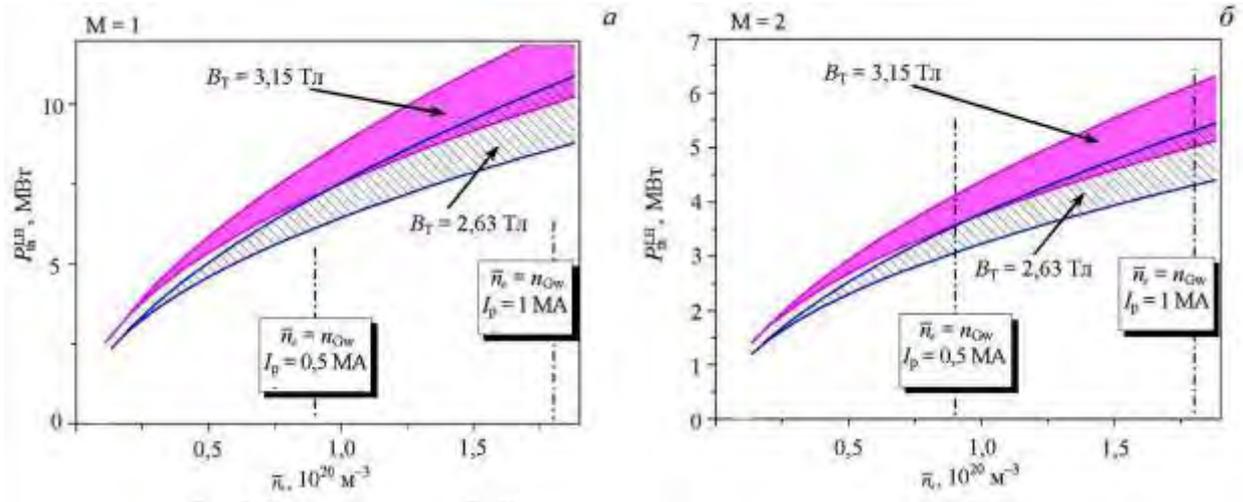


Рисунок 5.24 - Пороговая мощность L-N перехода для водородной (а) и дейтериевой (б) плазмы

5.2.6. Выводы к разделу 5.2

1. Разработан технический проект модернизации электромагнитной магнитной системы и внутрикамерных элементов установки Т-15 (установка Т-15Д), с целью создания диверторной конфигурации в существующей вакуумной камере Т-15. Плазменный шнур имеет большой радиус $R = 2.43$ м, малый радиус 0.42 м ($A=5.8$), вытянутость 1.45 и треугольность 0.25 .

2. Проведенные расчеты сценариев разряда показали, что 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 плотности $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ температура в центре шнура превышает 6 кэВ.

3. В токамаке Т-15Д возможна реализация квазистационарного режима с полностью неиндукционным током. 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 $3.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Доля бутстреп-тока

f составляет 0.2 в этом режиме.

4. Результаты расчетов пороговой мощности L-H перехода показали, что для режима с током 1 МА и при плотности, близкой к пределу Гринвальда, для достижения H-моды в водородной плазме необходима мощность дополнительного нагрева, превышающая 10 МВт.

5. Расчеты показали, 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 с. Для получения разрядов длительностью более 100 секунд необходима замена криорезистивных обмоток управления на сверхпроводящие и установки охлаждаемой первой стенки.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ТОКАМАКА Т-15МД

6.1. Физическое обоснование параметров токамака Т-15МД

6.1.1. Цели и задачи токамака Т-15МД

Проект компактного токамака с диверторной конфигурацией плазменного шнура (токамак Т-15МД) был реализован в 2009-2011 годах совместно НИЦ «Курчатовский институт» и АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова». Экспериментальная установка токамак Т-15МД (рисунок 6.1, 3-D формат) предназначена для решения широкого спектра физических проблем и развития технологий, необходимых для надежного обоснования параметров энергетического термоядерного реактора [36,107]. Токмак Т-15МД необходим для дальнейшего развития экспериментальных исследований, проводимых в Российской Федерации на установках токамак Т-10, Т-15, Т-11М, Туман-3 и Глобус-М. Установка будет оборудована системой дополнительного нагрева плазмы ($P_{\text{доп.}} \approx 20$ МВт) [110,111,112], обеспечивающей одновременное достижение высокой температуры ($T_i \sim T_e \sim 10$ кэВ) и плотности плазмы ($n_e \sim 10^{20}$ м⁻³), современной системой управления плазмой и технологическим оборудованием, а также оборудована современным диагностическим комплексом [121,123].

Одной из важнейшей составляющей проекта является накопление базы данных, необходимой для перехода к следующему шагу – стационарному термоядерному источнику нейтронов (ТИН) на основе токамака. В этом смысле установка Т-15МД, как основа концепции ТИН, может выполнить роль моста между уже созданными в России в последнее время компактными токамаками «Глобус-М» [16] и КТМ [108, 109] и проектируемыми стационарными нейтронными источниками. Наконец, на нём будут проводиться эксперименты в поддержку ИТЭР.

Установка Т-15МД позволит исследовать физические процессы в плазме с различным аспектным отношением $A=2.2\div 3$.

Экспериментальная программа установки Т-15МД охватывает широкий диапазон исследований по УТС, включая решение следующих задач:

- Возможность достижения высоких значений β_N , как путь к удешевлению ТЯР, при одновременном обеспечении высокой плотности и температуры.
- Управление профилем тока и давления, как путь к увеличению β_N и времени удержания τ_E .
- Возможность реализации режимов улучшенного удержания с внутренним и внешним транспортным барьером.
- Исследование неоклассического и идеального пределов по β и возможности их увеличения.
- Изучение возможности реализации режимов с высокими значениями β_N и n_e в условиях стационарного разряда с полностью неиндукционным током.
- Оптимизация дивертора и исследование влияния периферийной плазмы на глобальные характеристики плазменного разряда.
- Исследование вопросов вертикальной устойчивости плазмы.
- Исследование и алгоритмизация систем обратных связей для получения устойчивых режимов с высокими характеристиками.

Решение этих задач необходимо для выработки рекомендаций для построения ТЯР.

На предлагаемой установке возможно проведение и традиционных исследований по программе токамак, включая:

- Изучение электронного и ионного транспорта
- Изучение срывов
- Исследование турбулентности
- Исследование ИТЭР-подобных (по безразмерным параметрам) разрядов с уточнением зависимости от безразмерных параметров

- Исследование технологических вопросов ТЯР.

Для решения указанных задач на установке Т-15МД необходимо:

- Использовать системы дополнительного нагрева плазмы, разработанные для Т-10 и Т-15, с мощностью не менее $P = 15$ МВт, обеспечивающие нагрев как ионной (инжекция нейтралов, $P_{\text{ин}} = 9$ МВт) [110,111], так и электронной (на частоте электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), $P_{\text{ЭЦР}} = 7$ МВт, $f = 112$ ГГц) компонент [111]. Создать системы дополнительного нагрева плазмы с использованием ионно-циклотронного (ИЦР) [112] и нижегибридного (НГ) нагрева [111].
- Обеспечить возможность генерации неиндукционного тока, равного току плазмы с помощью ИН, ЭЦР, ИЦР, НГ, а также управление профилем тока.

Модернизация установки Токамак Т-15 проводится в Отделении токамаков, Курчатовского ядерно-технологического комплекса, НИЦ «Курчатовский институт» с использованием инфраструктуры установок Т-10 и Т-15. Поэтому на выбор параметров установки Т-15МД в существенной степени влияют ограничения по энерго- и водопотреблению. Кроме того, важна стыковка электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака Т-15МД с имеющейся системой инжекции нейтралов и вновь проектируемыми системами дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока.

6.1.2. Выбор основных параметров установки Т-15МД

Привязка установки к имеющейся инженерной инфраструктуре площадки ИФТ (максимальная электрическая мощность, потребляемая от сети, величины напряжения и токов тиристорных преобразователей, параметры системы водоснабжения) во многом определяла параметры токамака. Использование мощного гиротронного комплекса фактически задавала величину тороидального магнитного поля в центре плазмы. Вторая гармоника частоты $f = 112$ ГГц соответствует значению тороидального магнитного поля на уровне $B_t = 2$ Тл. Такое значение тороидального поля и было принято в качестве базового.

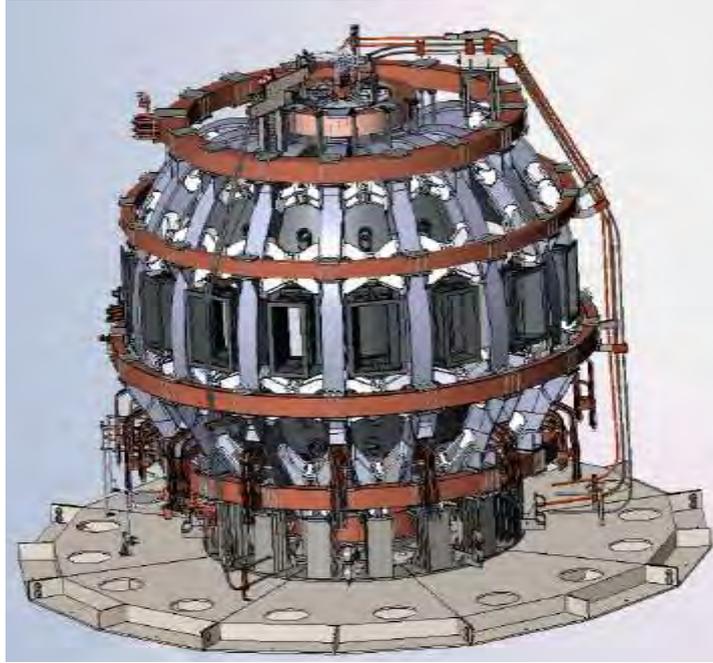


Рисунок 6.1 – Общий вид токамака Т-15МД

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

Важным элементом программы является исследование поведения плазмы с токами мегаамперного диапазона при достаточно длинном импульсе поддержания тока. Необходимо отметить, что в России в настоящее время нет работающих токамаков с током плазмы $I_p \geq 1$ МА и длительностью плато тока $\Delta t_{\text{плато}} \geq 1$ с. При указанных выше величинах дополнительного нагрева на уровне $10 \div 15$ МВт весьма желательно получение разрядов с длительностью несколько секунд, что соответствует скиновым временам установления профилей основных параметров плазмы.

Указанные выше особенности могут быть совмещены в установке, имеющей следующие особенности: одно- и двухнулевая (SN, DN) конфигурации

плазмы, со значениями аспектного отношения $A \sim 2$, вытянутостью плазмы по уровню 95% потока $k_{95} \approx 1.7 - 1.9$ и треугольностью $\delta_{95} \approx 0.3$. Основные геометрические размеры выбраны следующими: большой радиус тора $R_0 = 1.48$ м, малый радиус плазмы $a = 0.67$ м. Указанные параметры при значении магнитного поля на оси плазмы $B_{t0} = 2.0$ Тл определяют максимальную величину тока плазмы $I_p = 2$ МА.

Требуемый запас потока в центральном соленоиде $\Delta\Psi_{cs} = 6$ Вб.

Для полученных выше параметров модернизированной установки Т-15 предел Гринвальда для плотности плазмы n_e составляет $n_{e,G} = I_p/\pi a^2 \approx 1.4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. С некоторым запасом можно принять для максимального значения плотности плазмы $n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, которое близко к принятому в ИТЭР.

Указанные данные основных параметров токамака Т-15МД приведены в Таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Основные параметры токамака Т-15МД

Ток плазмы I_p , МА	2
Аспектное отношение A	2.2
Большой радиус тора R_0 , м	1.48
Малый радиус плазмы a , м	0.67
Вытянутость сечения k_{95}	1.7-1.9
Треугольность δ_{95}	0.3-0.4
Тороидальное поле на оси плазмы B_{t0} , Тл	2.0
Длительность плато разряда $\Delta t_{\text{плато}}$, с	5-10
Мощность нагрева плазмы $P_{\text{доп.}}$, МВт	≤ 20
Плотность плазмы n_e , 10^{20} м^{-3}	≤ 1
Предел Гринвальда для плотности $n_{e,G}$, 10^{20} м^{-3}	1.4
Суммарный запас потока $\Delta\Psi_{cs}$, Вб	6

Указанная в Таблице 6.1 длительность плато тока $\Delta t_{\text{плато}}$ соответствуют скиновым временам изменения профилей параметров в плазме с уровнем нагрева $10 \div 15$ МВт.

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

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

Основным методом нагрева и поддержания тока выбрана инжекция нейтралов [110,111]. Это связано как с освоенностью инжекторов с энергией нейтралов 80 - 100 кэВ, так и с необходимостью отработки режима протекания реакций синтеза при взаимодействии быстрых частиц пучка с плазмой (реакции на пучке). В результате даже при d-d реакциях в плазме с невысокой температурой (2 - 3 кэВ) возможна регистрация интенсивных потоков нейтронов, что важно для отработки ряда систем ТИН. Проектная мощность систем инжекции нейтралов 8 – 9 МВт. Важной составляющей проекта предполагается ЭЦР нагрев плазмы при уровне мощности $6 \div 7$ МВт [111].

При модернизации токамака Т-15 использовался опыт проектирования и изготовления токамака КТМ [108], сооружённого для республики Казахстан, а также проекта токамака Т-15М [31]. В свою очередь, при разработке токамака Т-15МД можно будет получить необходимый инженерно - технологический опыт для сооружения нейтронного источника. Достижение режима длительного неиндуктивного горения плазмы с высокими параметрами (β_N , $N_{y,2}$, q_{95} , k , δ , n/n_G) – важнейшая физическая задача токамака Т-15МД.

6.1.3. Физические сценарии разряда

При предварительной проработке физических сценариев разряда в модернизированной установке Т-15, т.е. временной эволюции параметров R , a , k , δ , n_e , I_p , напряжения на обходе U , сопротивления плазмы R_{PL} , энергетического времени жизни плазмы τ_E , значений полоидальной бэты плазмы β_P и нормализованной бэты β_N и ряда других параметров, были приняты следующие допущения:

- пробой плазмы производится при выходе тороидального поля на плато;
- положение области пробоя – вблизи внутреннего обвода плазмы, где больше значения вихревого электрического и тороидального магнитного поля;
- скорость подъема тока плазмы выбиралась в диапазоне $dI_p/dt \approx 1 - 2$ МА/с (при этом верхняя граница получена масштабированием $dI_p/dt \sim L_p^{-1} \sim R^{-1}$ из ИТЭР, нижняя – ростом резистивных потерь при медленном подъёме тока плазмы), концентрация плазмы на стадии подъёма тока выбиралась растущей вместе с током;
- после выхода плазменного тока на плато происходит включение источников нагрева плазмы.

6.1.3.1. Пробой и начальная стадия формирования плазменного шнура

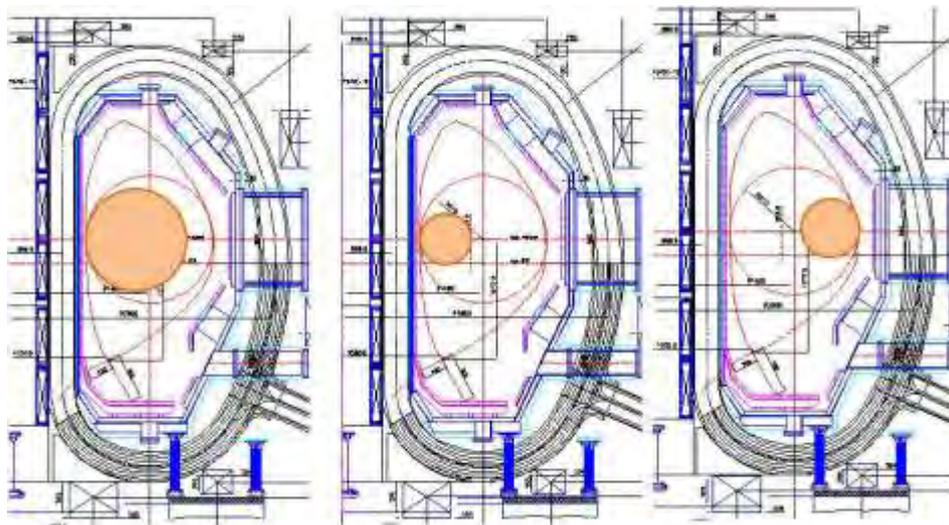
В проекте токамака Т-15МД [35] геометрические параметры зоны пробоя, приведённые в таблице 6.2, выбирались в соответствии с опытом проектирования системы формирования плазмы ИТЭР [113]. Также как и в ИТЭР в качестве основного выбран вариант старта разряда с внутреннего обвода тора (старт с внутренней стенки, большой радиус которой $R_{in,wall} \approx 0.8$ м). На рисунке 6.2 показаны три зоны пробоя внутри вакуумной камеры.

Отношение E_{bd}/p_{bd} в установке токамак Т-15МД составляет 600 В/м/Па, что больше обычно принимаемой границы пробоя без образования убегающих электронов в ходе развития лавины $E_{bd}/p_{bd} < 150$ В/м/Па [114]. Следует отметить,

что в экспериментах на токамаке JT-60U [115] за счёт аккуратной организации разряда граница пробоя без образования убегающих электронов отодвинута до $E_{bd}/p_{bd} < 600$ В/м/Па.

Таблица 6.2 - Геометрические параметры зоны пробоя в ИТЭР и Т-15МД

	ИТЭР	Т-15 Вариант 1	Т-15 Вариант 2	Т-15 Вариант 3
Номинальные параметры				
Большой радиус тора R, м	6.2	1.48	1.48	1.48
Малый радиус плазмы a, м	2	0.67	0.67	0.67
Вытянутость плазмы k_{95}	1.7	1.7-1.9	1.7-1.9	1.7-1.9
Объём камеры V_v , м ³	1000	30	30	30
Параметры зоны пробоя				
Большой радиус R_{bd} , м	5.65	1.28	1.06	1.90
Малый радиус a_{bd} , м	1.6	0.5	0.25	0.30
Вытянутость плазмы k_{95}	1	1	1	1
Объём зоны пробоя V_{bd} , м ³	290	6	1.3	3.4
Вихревое электрическое поле, В/м	0.3	0.5 - 0.8	0.5 - 0.8	0.5 - 0.8
Магнитное поле рассеяния, Гаусс	≤ 20	≤ 20	≤ 10	≤ 10
Начальное давление газа, мПа	1.2	1.5	0.8	0.8
Мощность ЭЦР подогрева, МВт	2	0.2	0.2	0.2



Вариант 1

Вариант 2

Вариант 3

Рисунок 6.2 - Положение зоны пробоя в вакуумной камере токамака Т-15МД

6.1.3.2. Оценка давления рабочего газа перед пробоем

Принято, что рабочим газом в установке токамак Т-15МД является водород (H), а основной примесью – углерод (C).

Оценим характерное значение тока плазмы на начальной стадии разряда для варианта «1» с большой областью пробоя. Значение тока плазмы в модернизированной установке токамак Т-15, при котором в зоне пробоя образуются замкнутые магнитные поверхности, составляет 10 - 20 кА. Уровень токов наводимых в камере на начальной стадии разряда (при напряжении на обходе 5 - 6 В и сопротивлении камеры в тороидальном направлении ($\sim 100 - 120 \mu\Omega$) составляет ~ 50 кА.

В установке токамак Т-15МД при токе плазмы $I_p = 50$ кА и значении малого радиуса $a = 0.5$ м предел Гринвальда по плотности плазмы составляет $n_{e,G} \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Ограничим значение плотности на этой стадии величиной $n_e = 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Отношение объёмов зоны разряда и камеры в модернизированной установке Т-15 $\alpha_v = V_{bd}/V_v = 0.15$ (см. Таблицу 6.2). В этом случае учёт эффекта «сгребания» газа из камеры в область разряда, приводит к оценке давления газа перед пробоем на уровне $p_{bd} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ (т.е. $\sim 1 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$). Указанному значению начального давления газа по аналогии с ИТЭР соответствует требуемая степень вакуума около $1.0 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$.

6.1.3.3. Оценка параметров E_{bd} и V_{str}

Условие пробоя вихревым полем имеет вид: $\alpha \cdot L \geq 1$, где α - первый коэффициент Таунсенда, $\alpha = 3.8 \cdot p_{bd} \cdot \exp(-94 p_{bd}/E_{bd}) [\text{м}^{-1}, \text{Па}, \text{В/м}]$; L – эффективная длина силовой линии из области пробоя до камеры, $L \sim 0.25 \cdot a_{bd} \cdot V_{t,bd}/V_{str}$. При заданных значениях a_{bd} и $V_{t,bd}$ условие пробоя приводит к связи между давлением p_{bd} , электрическим полем E_{bd} и уровнем рассеянных магнитных полей V_{str} .

Поскольку произведение $a_{bd} \cdot V_{t,bd}$ в установке Т-15МД примерно на порядок меньше, чем в ИТЭР (~ 1 Тл·м по сравнению с ~ 10 Тл·м в ИТЭР), то в модернизированной установке Т-15 требуются бóльшие значения вихревого электрического поля и, возможно, меньший уровень рассеянных полей.

Условие $\alpha \cdot L \geq 1$ может быть приведено к виду:

$$a_{bd} \cdot V_{t,bd} \cdot p_{bd} / B_{str} \cdot \exp(-94 \cdot p_{bd} / E_{bd}) > 1.05 \text{ [м, Па, В/м]}$$

Откуда при $a_{bd} = 0.5$ м, $V_{t,bd} = 2.3$ Тл, $p_{bd} = 1.5$ мПа получаем ограничение на уровень рассеянных магнитных полей в зоне пробоя $B_{str} < 15$ Гаусс.

При поле рассеяния в области пробоя ~ 10 Гаусс минимальное значение электрического поля на обходе тора составляет ~ 0.4 В/м.

Анализ начальной стадии разряда, что существенно для разработки последующего сценария разряда, показал:

- более предпочтителен старт разряда при уменьшенной зоне пробоя (вариант 2 с $a_{bd} = 0.25$ м). Этот вариант и принят для дальнейшей проработки физического и инженерного сценария разряда;

- для варианта 2 максимальный начальный запас потока при ограничении полей рассеяния на уровне 10 Гаусс (на границе зоны пробоя) при имеющихся ограничениях на источники питания составляет ≈ 3.45 Вб;

- запас потока к концу начальной стадии разряда (когда ток плазмы достигает уровня 40 – 50 кА) составляет примерно 3.25 Вб. С таких значений потока начинается стадия подъёма тока плазмы.

6.1.3.4. Стадия подъёма тока плазмы

Ток плазмы в токамаке Т-15МД целесообразно поднимать со скоростью $dI_p/dt \approx 1.5 \div 2$ МА/с. При такой скорости подъёма тока плазмы расчёты показывают на отсутствие убегающих электронов. Кроме того, скиновое время при подъёме плазменного тока близко к характерному времени подъёма тока и можно надеяться на отсутствие сильного скинирования.

Физические расчёты сценариев разряда были выполнены В.М. Леоновым с использованием кода ASTRA [94].

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

6.1.3.5. Параметры омического разряда на плато тока

На плато омического разряда плазмы принято, что значение концентрации плазмы $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Это значение ниже предела Мураками $n_e < 2V_t/qR$ ($\approx 1.1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$) и предела Гринвальда $n_e < I_p/\pi a^2$ ($\approx 1.4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$).

Как видно из рисунка 6.3 скорость подъёма тока составляет около 1.5 МА/с, длительность плато тока 1.5 с, резистивное напряжение около $0.7 \div 0.8 \text{ В}$. Средняя температура омической плазмы достигает 1.5 кэВ, а время удержания плазмы – 200 мс. Существенное затягивание импульса разряда возможно при переходе от омического к дополнительному нагреву плазмы и при генерации токов увлечения.

Величина мощности дополнительного нагрева плазмы, требуемая для перехода из L- в H-моду удержания плазмы, согласно базе данных ИТЭР, составляет $P_{\text{ном}} \approx 0.45 \cdot n_{20}^{0.75} \cdot V_t \cdot R^2 \approx 1.3 \text{ МВт}$. Другие расчеты мощности L-H перехода дают $P_{L \rightarrow H} = 1.5 \div 2 \text{ МВт}$ [116]. Поэтому при уровне мощности нагрева плазмы $10 \div 15 \text{ МВт}$ удержание плазмы в Т-15 МД должно соответствовать H-моду удержания.

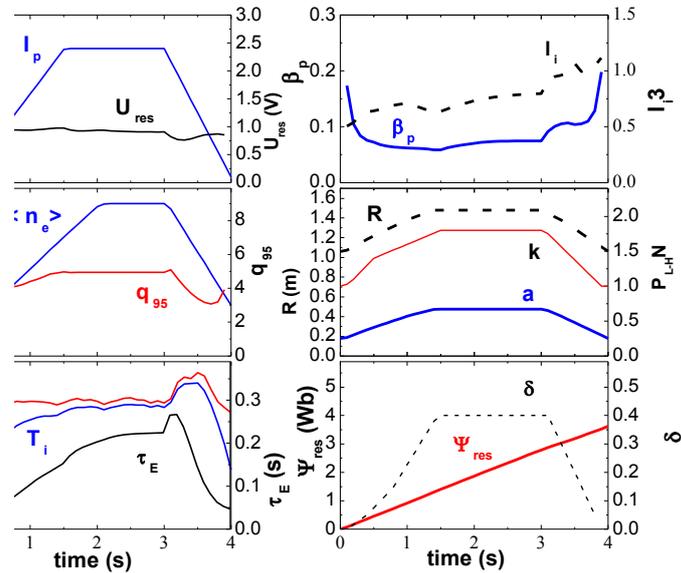


Рисунок 6.3 - Сценарий омического разряда в плазме токамака Т-15МД при концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

6.1.3.6. Параметры разряда при дополнительном нагреве плазмы

Дополнительный нагрев при уровне суммарной мощности 13 МВт (5 МВт ЭЦР и 8 МВт ИН) позволяют существенно снизить напряжение на обходе (до уровня $\sim 0.2 \text{ В}$), затраты потока (до 1.5 Вб) и резко увеличить энергосодержание плазмы, так что средняя температура плазмы достигает $2.5 \div 3 \text{ кэВ}$ (в центре плазменного шнура – более 5 кэВ).

Пробой и начало развития разряда целесообразно осуществить от внутренней стенки (ближе к центральному соленоиду) для увеличения пробойного электрического поля. Окончание разряда также происходит вблизи внутренней стенки.

Сценарий разряда с дополнительным нагревом плазмы в модернизированной установке токамак Т-15МД при базовом токе плазмы $I_p = 2 \text{ МА}$, суммарной мощности нагрева $P = 13 \text{ МВт}$ (8 ИН + 5 ЭЦР), концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и эффективном заряде плазмы $Z_{\text{eff}} = 1.6$ приведён на рисунке 6.4.

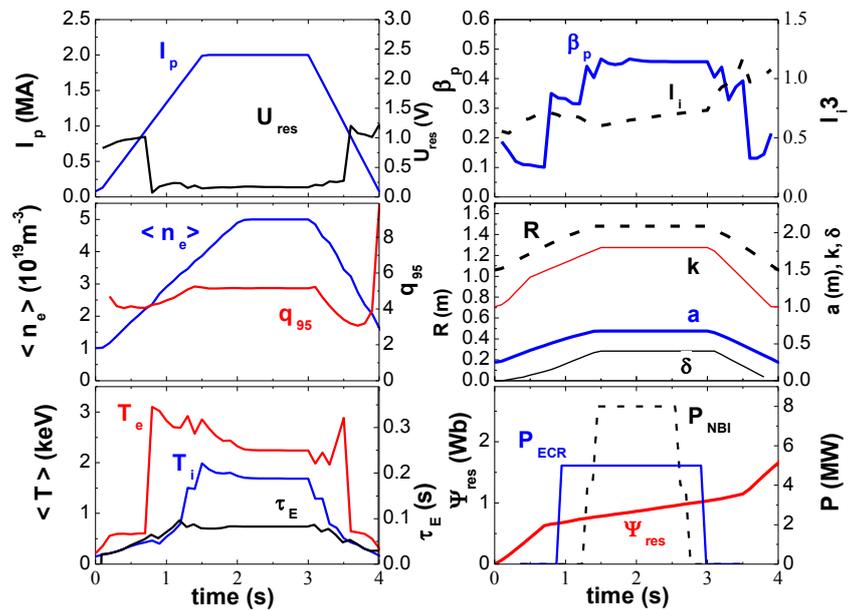


Рисунок 6.4 - Сценарий разряда с дополнительным нагревом (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) плазмы в модернизированной установке токамак Т-15МД при концентрации плазмы на плато разряда $n_e \approx 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

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

Первый из них – режим очень длинного импульса (20 с) с полным замещением омического тока (Рисунок 6.5). Анализ поведения плазмы в таком режиме является ключевым с точки зрения перспектив создания нейтронных источников на основе токамака. Для организации такого режима потребовалось уменьшение тороидального поля на оси плазмы до 1.5 Тл, снижение рабочего тока плазмы до 1 МА и концентрации плазмы до $0.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При этом из 13 МВт полной вкладываемой мощности: 5 МВт (ЭЦР) используются только для нагрева плазмы, а 8 МВт тангенциальной инжекции нейтралов – для нагрева и поддержания тока. Расчётный уровень неомических токов составляет 400 кА (бутстреп-ток) и 600 кА (ток увлечения при инжекции). Такой режим технически может быть осуществлён в рамках разработанной конструкции токамака.

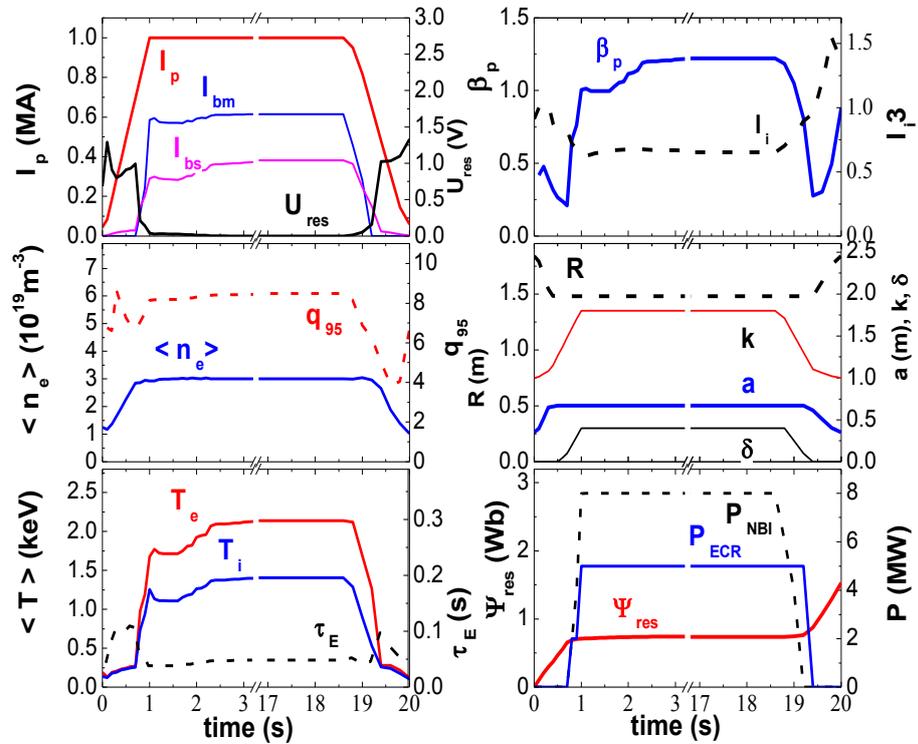


Рисунок 6.5 - Сценарий разряда с дополнительным нагревом (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) в установке токамак Т-15МД, с длинным импульсом и полным замещением омического тока.

Второй режим – с предельным током плазмы. В установке Т-15МД физические ограничения в принципе не запрещают рост тока плазмы на плато разряда с базового значения 2 МА до предельного для этой установки значения в 4 МА (для которого запас устойчивости на краю плазмы уменьшается до $q_{95} = 2.5$). Соответствующие временные зависимости для этого режима приведены на рисунке 6.6.

Вопрос технической реализации такого режима, в котором токи в полоидальных обмотках примерно вдвое превышают базовые значения (что требует перехода к новым преобразователям), предполагается решить на уже работающей установке в процессе её эксплуатации. Основные же конструктивные решения по установке приняты для базовых параметров, приведённых в Таблице 6.1.

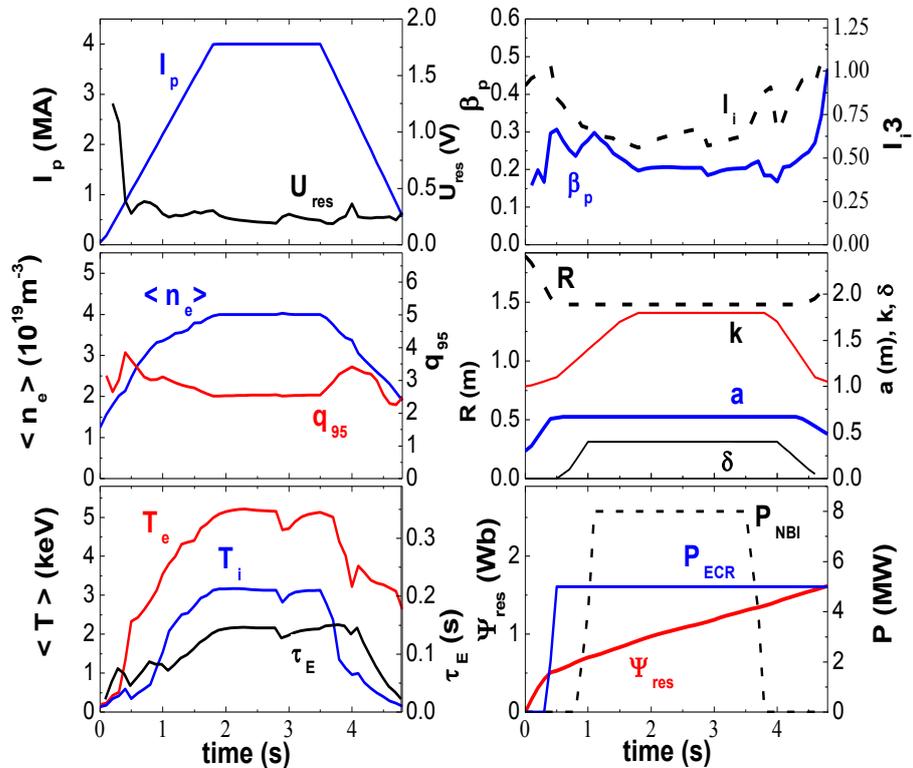


Рисунок 6.6 - Сценарий разряда с дополнительным нагревом (5 МВт ЭЦР + 8 МВт ИН) в установке токамак Т-15МД и током плазмы, увеличенным до 4 МА

6.2. Электромагнитная система

6.2.1. Состав и параметры ЭМС

Электромагнитная система (ЭМС) установки токамак Т-15МД предназначена для генерирования тороидальных и полоидальных магнитных полей [117,118,119].

В состав ЭМС Т-15МД входят:

- обмотка тороидального поля (ОТП), состоящая из 16 D-образных катушек;
- обмотка индуктора (ОИ), состоящая из трех катушек;
- шесть обмоток управления (ОУ1-6);
- обмотка горизонтального управляющего поля (ОГУП), состоящая из 4 катушек;
- опорные конструкции.

Электромагнитная система токамака Т-15 МД представлена на рисунке 6.7.

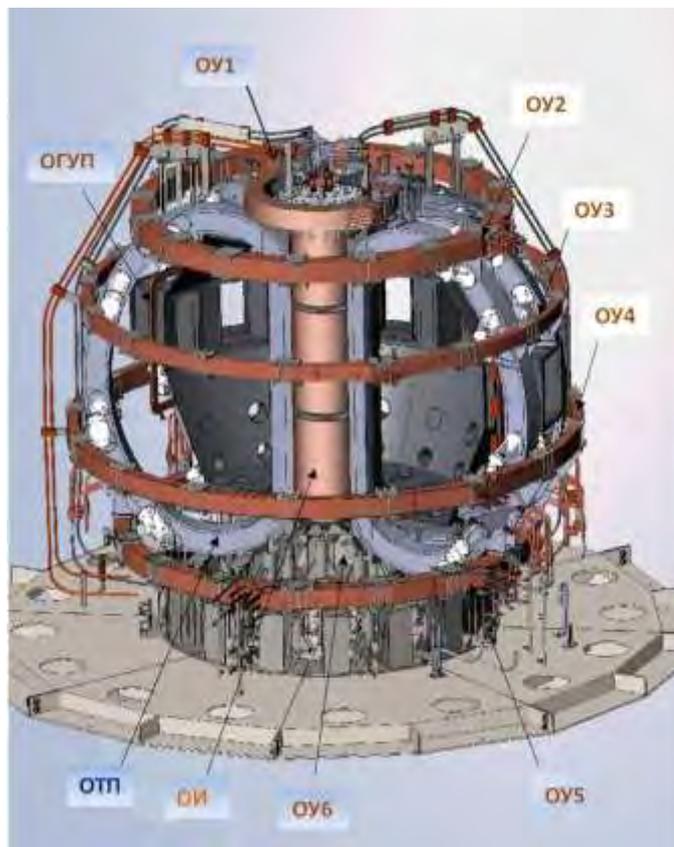


Рисунок 6.7 – Электромагнитная система токамака Т-15МД

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

На основании этих расчетов были определены основные параметры ЭМС, приведенные в Таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Основные параметры ЭМС токамака Т-15МД

Наименование параметров	Величина
Большой радиус плазменного шнура, м	1.48
Малый радиус плазменного шнура, м	0.67
Ток плазмы, МА	2
Длительность разряда, с	≤ 10
Длительность паузы между импульсами, мин	15
Число катушек ОТП	16
Индукция тороидального магнитного поля на оси плазменного шнура, Тл	2
Гофрировка тороидального поля на внешней границе плазмы, %	0.76
Число катушек обмотки индуктора	3
Число обмоток управления	6
Число катушек ОГУП	4
Перепад давления охлаждающей воды, МПа (кгс/см^2)	8
Суммарный расход охлаждающей воды, м ³ /час	82
Масса материала обмоток (меди и бронзы), т	100
Полная масса ЭМС, т	180

6.2.2. Опорные конструкции ЭМС

Установка Т-15МД будет расположена в экспериментальном зале существующей установки Т-15 на ее фундаменте. Планируется использовать имеющиеся опорные фермы Т-15. Отсутствие магнитопровода в токамаке Т-15МД приводит к необходимости оценки влияния полей рассеяния на расположенные вблизи токамака металлоконструкции.

Опорными конструкциями ЭМС являются: центральная ферма установки Т-15, опорная ферма установки Т-15, монтажная подставка, подставка ОТП.

Центральная ферма Т-15 будет использована для модернизированной установки с некоторой доработкой. В ней будут прорезаны пазы в зоне под нижними вертикальными патрубками вакуумной камеры для обеспечения доступа к ним и установки диагностического оборудования.

Кольцевая опорная ферма Т-15 также будет использована в ходе проведения модернизации. В ней необходимо срезать сварные швы между секторами, и

установить в местах стыковки секторов изоляционные прокладки. В обеих фермах сверлятся резьбовые отверстия для крепления монтажной подставки.

Монтажная подставка – это база, на которой собирается вся электромагнитная система, диагностическое оборудование, насосы вакуумной откачки камеры и т.д. Необходимость в ней обусловлена большим пустым промежутком между центральной и опорной фермами существующей установки Т-15. Монтажная подставка показана на рисунке 6.8. Подставка состоит из 8 секций, изолированных электрически друг от друга. В секциях подставки предусмотрены отверстия и люки для кабелей электропитания установки, подвода охлаждающей воды к коллекторам, обслуживания нижних вертикальных патрубков вакуумной камеры и т.д. Изготовленная, на заводе ЭФО АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова» конструкция монтажной подставки показана на рисунке 6.9.

Опора ОТП Т-15 представлена на рисунке 6.8. На ней устанавливаются катушки ОТП, вакуумная камера.

Опора имеет кольцевую форму и состоит из двух изолированных друг от друга частей. Опора позволяет установить и демонтировать обмотку управления ОУ6. В верхней части опоры имеются отверстия для крепления опор камеры. На опоре расположены съёмные отжимные болты для юстировки и корректировки катушек ОТП.

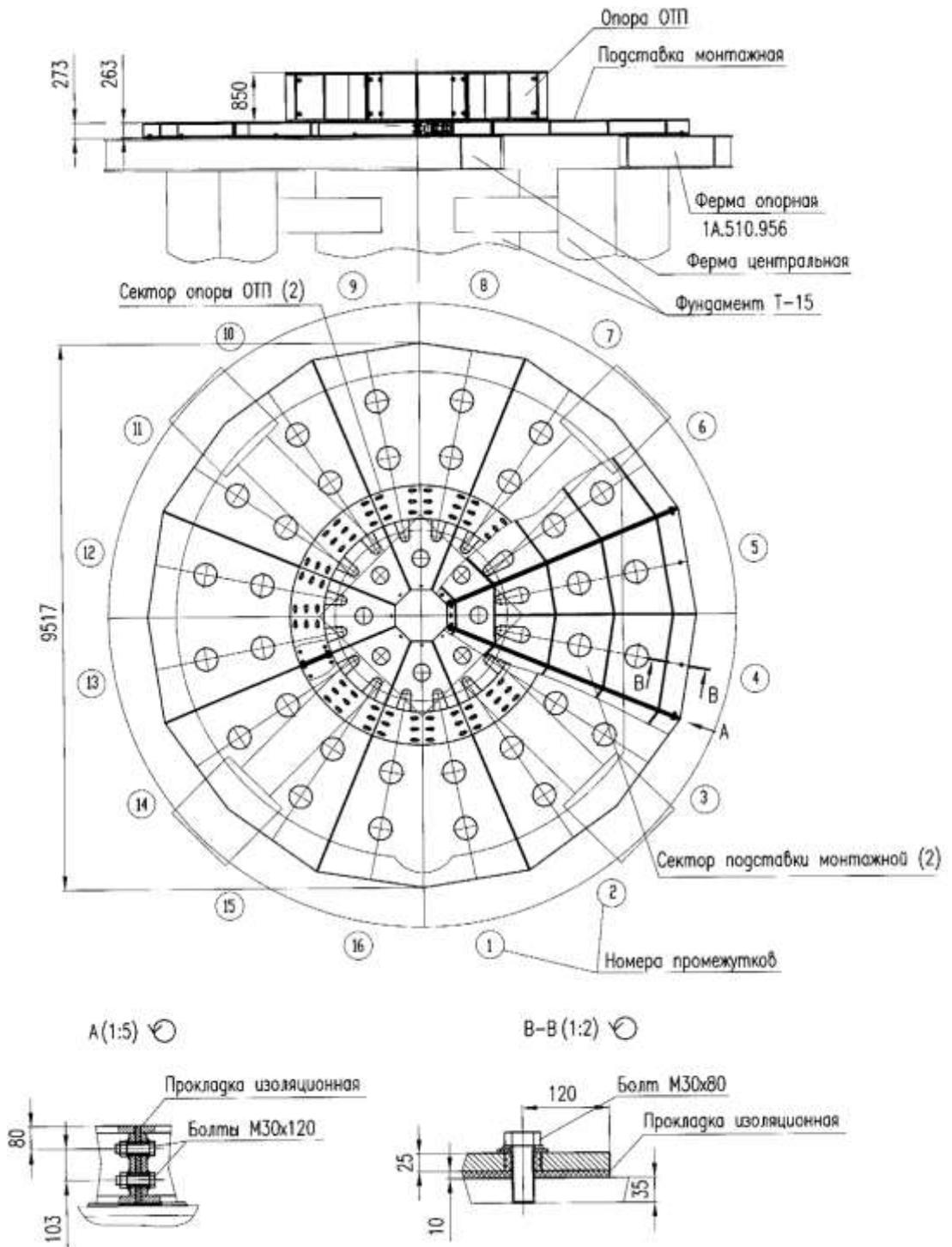


Рисунок 6.8 - Монтажная подставка



Рисунок 6.9 – Конструкция монтажной подставки (перевернута) на заводе ЭФО АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова»

6.2.3. Оценка влияния поля рассеяния на металлоконструкции зала Т-15МД

В модернизируемой установке токамак Т-15МД отсутствует центральный железный сердечник и внешний магнитопровод.

В установке Т-15 замкнутый магнитопровод, с одной стороны, играл положительную роль: существенно, более чем в 2 раза, увеличивал запас вольт-секунд, необходимых для подъема тока в плазме и его поддержание в течение разряда, и экранировал периферию установки от импульсных полей.

С другой стороны, наличие железа приводило к усложнению системы контроля и управления плазмой в течение разряда, а также к усложнению конструкции токамака в целом и доступа к его отдельным частям.

В расчетах, проведенных С.В. Цауном в ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» и Н.И. Дойниковым в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, получены оценки полей, индуцируемых в области развития разряда на его начальной стадии от наводимых во внешних контурах токов, а также токов в этих контурах установки при срыве тока плазмы.

В металлоконструкциях, расположенных под токамаком (рисунок 6.7), можно выделить два замкнутых электрических контура. Они находятся на

отметке $Z = -3.2$ м от центральной плоскости соленоида. Их сопротивления, измерения которых были выполнены в ИЯС РНЦ «КИ», составили $R_i = 1.7$ мОм и $R_e = 0.268$ мОм соответственно для внутреннего и внешнего контуров.

Из расчетов следует, что при начальной скорости роста тока плазмы:

$I_p = 1.2 \cdot 10^{-6}$ А/с на контурах индуцируется напряжение: $U = 6.1$ В, что приводит к установившимся в контурах токам: $i_i = 3.6$ кА и $i_e = 22.7$ кА и полям в области формирования разряда: $B_T \approx 4 \cdot 10^{-4}$ Тл и $B_Z \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Анализ начальной стадии разряда показал, что эффект металлических элементов конструкции пола незначителен на стадии инициации плазмы и им можно пренебречь.

6.2.4. Обмотка тороидального поля

Общий вид обмотки тороидального поля (ОТП) показан на рисунке 6.10. Основные параметры ОТП приведены в Таблице 6.4. ОТП состоит из 16-ти катушек D-образной формы. Форма катушек не является классически безмоментной. Форма катушек обусловлена размерами плазменного шнура, наличием дивертора, требованиями к гофрировке тороидального магнитного поля, требованиями инжекции.

Каждая катушка собирается из четырех секций (двух центральных и двух боковых) намотанных из серебросодержащего медного полого проводника с размерами 22.5×32 мм² и с отверстием $\varnothing 10.5$ мм (Рис. 6.11). Каждая катушка имеет 50 витков. Из-за того, что максимально возможная длина производимого фирмой LUVATA (Финляндия) проводника с указанными размерами только 11.4 м (11.4 м – средняя длина витков в катушке), то в каждой катушке имеется 50 соединений (спаев). Эта потребовало при изготовлении катушек проведения тщательных испытаний каждого соединения. Каждый паяный шов сначала опрессовывался водой давлением 4 МПа, а затем проверялся на герметичность путем надавливания газообразного гелия давлением 1.5 МПа и проверкой герметичности снаружи шва щупом с течеискателем.

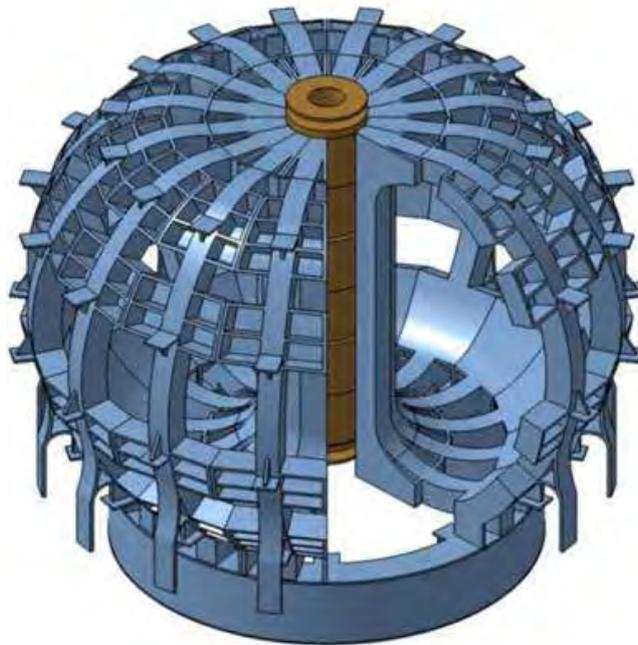


Рисунок 6.10 – Общий вид ОТП

Таблица 6.4 - Параметры ОТП установки токамак Т-15МД

Параметры	Значения
Число катушек	16
Число витков в катушке	50
Проводник	Труба медная серебросодержащая
Размеры проводника, мм	22.5 × 32 мм ² Ø10.5
Площадь поперечного сечения меди, мм ²	633.45
Длина проводника ОТП, м	9120
Масса проводника, кг	51416
Максимальный ток, кА	22
Максимальное напряжение на корпусной изоляции, кВ	2
Омическое сопротивление ОТП при 20°C, Ом	0.26
Собственная индуктивность обмотки, Гн	0.8
Число параллельных ветвей охлаждения	64
Максимальная температура проводника, °С	77
Расход охлаждающей воды, м ³ /час	43
Потери давления, атм	8

Витковая и корпусная изоляции выполнены из стеклослюдинитовой ленты и стеклоленты. Изоляция накладывается на проводник, секцию или катушку с

промазкой её эпоксидным компаундом, опрессовывается и запекается. Крайние секции после запечки витковой изоляции перед наложением корпусной изоляции механически обрабатываются для получения трапецеидальной формы на внутренней ноге.

Катушки ОТП устанавливаются в D-образные корпуса из нержавеющей стали, представляющие собой коробку, сваренную из отдельных частей, и боковую крышку, также состоящую из нескольких частей. Обмотка фиксируется в корпусе с помощью стеклотекстолитовых прокладок, которые устанавливаются на дно, боковые поверхности и под крышку на эпоксидном компаунде холодного отверждения. После чего подгоняется боковая крышка и осуществляется её приварка.

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

Для установки штифтов между корпусами катушек и межблочными структурами на заводе-изготовителе будет проведена контрольная сборка всей обмотки тороидального поля.

Выводные концы катушек расположены в их нижних частях. Выводные клеммы катушек соединяются между собой неохлаждаемыми шинами-перемычками. Рядом с ними расположены компенсирующие шины с обратным током. Каждая группа из четырёх катушек запитывается с помощью кабелей, подходящих снизу. Снизу также производятся подвод и отвод охлаждающей

воды. 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 не превышает 77 °С (рисунок 6.12).

Катушка ОТП после намотки и запечки в ООО «ГКМП» (г. Брянск) показана на рисунке 6.13, а на рисунке 6.14 показана катушка внутри D - образного корпуса.



Рисунок 6.11 – Проводник для ОТП

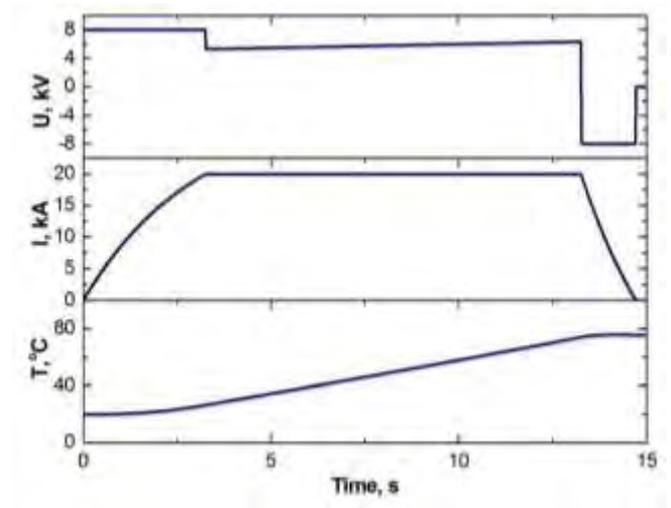


Рисунок 6.12 - Сценарии приложенного напряжения, тока в обмотке и расчетная кривая температуры нагрева



Рисунок 6.13 – Катушка ОТП после намотки и запечки



Рисунок 6.14 – Катушка ОТП внутри D - образного корпуса

6.2.5. Обмотка индуктора

Обмотка индуктора (ОИ) состоит из трех независимых катушек (151, 447 и 151 витков) [118], общий вид которой представлен на рисунке 6.15. Каждая катушка наматывается двумя параллельными проводниками трапециадальной формы (размеры $14.8 \times 15.5 \times 20 \text{ мм}^2$ с отверстием $\varnothing 8 \text{ мм}$), изготовленных из серебряно-медного сплава. Катушки не имеют одинаковое количество витков. Количество витков в центральной катушке увеличено, по сравнению с верхней и нижней для того, чтобы конструкционные зазоры между катушками отодвинуть от экваториальной плоскости ОИ для улучшения условий пробоа.

Между обмотками устанавливаются два стальных полукольца высотой 56 мм с изоляционными проставками. Выводные концы каждой из обмоток индуктора сбандажированы между собой, выведены вверх, закрепляются изоляционными колодками к стальным полукольцам и силовой структуре индуктора. Выводные концы расположены внутри индуктора равномерно через 120° . Трубки охлаждения обмоток индуктора также разделены на 3 зоны внутри индуктора и выводятся аналогично выводным концам в зонах между кронштейнами силовой структуры, но внизу индуктора.

Во время импульса тока на обмотки индуктора действуют вертикальные и радиальные силы. Жёсткость индуктора в вертикальном направлении из-за большой суммарной толщины изоляции мала. Для предотвращения появления вертикальных разрывающих усилий в изоляции все обмотки предварительно сжаты. Силовая структура индуктора представляет собой два торцевых фланца, каждый из которых состоит из шести изолированных друг от друга секторов, стянутых между собой изолированными болтами. Верхний и нижний фланцы стягиваются между собой предварительно напряженными составными по длине шестью шпильками М36 (общее усилие затяжки 90 т). На шпильках устанавливаются пакеты тарельчатых пружин, компенсирующих вертикальные силы, действующие на обмотки индуктора, (электродинамические и термомеханические) при протекании токов. Верхний фланец через изоляцию

устанавливается на верхнюю часть корпусов катушек ОТП в зоне арочного распора и прикрепляется 16 болтами М20 к катушкам ОТП. Шестнадцать болтов рассчитаны на общую нагрузку 120 т. Нижний фланец силовой структуры центрируется относительно катушек ОТП с помощью клинового устройства. Используются шпильки и болты повышенной прочности с пределом текучести не хуже 400 МПа. Параметры обмотки индуктора приведены в Таблице 6.5.

Катушки запитываются независимыми системами питания. Запас магнитного потока в центральном соленоиде $\Psi_{\text{ои}}$ приблизительно 6 Вб ($I_{\text{ои}} = \pm 40$ кА). Сценарий тока в центральной катушке обеспечивается четырьмя тиристорными преобразователями (± 40 кА, 3 кВ). Если понадобится увеличить напряжение на обходе для пробоя, дополнительное сопротивление будет включено в электрическую цепь центральной катушки в инверторном режиме (вывод тока).

Индуктор, изготовленный в ООО «ГКМП», показан на рисунке 6.15.

Таблица 6.5 - Параметры обмотки индуктора

Параметр	Величина		
	ОИ1	ОИ2	ОИ3
Число витков в обмотке	151	457	151
Проводник – труба медная серебросодержащая, мм	Трапеция 20 × 14.8 8 × 15.15, ∅ 8		
Средняя длина витка, м	2.11		
Длина проводника катушки, м	638	1928	638
Масса меди, кг	1420	4290	1420
Максимальный ток, кА	±40	±40	±40
Омическое сопротивление обмотки, мОм	11	34.3	11
Собственная индуктивность обмотки, мГн	2.8	24.8	2.8
Число параллельных ветвей охлаждения	4	4	4
Расход охлаждающей воды, м ³ /час	3.4	1.8	3.4
Потери давления, МПа	0.8	0.8	0.8



Рисунок 6.15 – Индуктор в ООО «ГКМП»

6.2.6. Обмотки управления

Электромагнитная система установки Т-15МД включает в себя шесть обмоток управления (ОУ) и четыре катушки обмотки горизонтального поля ОГУП. Обмотки спроектированы с расчётом на перегрев не более чем на 60°C и возможности охлаждения их за период между импульсами 15 мин. Параметры обмоток даны в Таблице 6.6.

Все обмотки управления ОУ1-6 представляют собой катушки, собранные из двухслойных секций, намотанные полыми медными проводниками. Изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты и стеклоленты с эпоксидным связующим. В зонах крепления к катушкам ОТП обмотки имеют силовые крепления (сектора-каркасы) из нержавеющей стали толщиной 15 – 20 мм, равномерно распределённые по обходу обмотки, под секторами-каркасами изоляция обмоток усилена стеклотекстолитовыми и резиновыми прокладками, предохраняющими их от возможных механических повреждений.

Обмотки управления ОУ1, ОУ2, ОУ3, ОУ4 и ОУ5 крепятся снаружи к корпусам обмотки тороидального поля. Обмотка ОУ6 укладывается в основную опору модернизированной установки Т-15. Подвод тока к обмоткам управления осуществляется кабелями. Все обмотки управления охлаждаются дистиллированной водой.

Четыре катушки ОГУП имеют рамочную форму и крепятся к корпусам ОТП на наружном обводе в пространстве между ОТП и вакуумной камерой. Каждая катушка ОГУП имеет 10 витков, намотанных медным полым проводником.

Таблица 6.6 - Технические параметры обмоток управления

Параметр	ОУ1	ОУ2	ОУ3	ОУ4	ОУ5	ОУ6	ОГУП
Число катушек	1	1	1	1	1	2	4
Число секций в катушке	5	5	4	5	5	6	1
Число витков в катушке	100	100	48	60	80	432	10
Размеры медного проводника, мм ²	22 × 22 Ø10.5	23.5 × 23.5 Ø8,8	22 × 22 Ø10.5	23.5 × 23.5 Ø8.8		23.5 × 23.5 Ø8.8	18 x 18 Ø8
Средняя длина витка, м	5.47	14.6	19.1	20.4	16.5	4.67	12
Максимальный ток, кА	15	12	15.5	17	17	20.5	10
Число параллельных	5	10	8	10	10	12	1
Расход воды, м ³ /час	1.2	4.3	1.9	4.3	4.8	5.7	1.4
Температура нагрева проводника за импульс, °С	53	32	61	37	41	61	60

Обмотки управления, изготовленные на заводах ЭФО АО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова» (ОУ1, ОУ2 и ОУ6) и ООО «ГКМП» (ОУ3, ОУ4, ОУ5, ОГУП) представлены на рисунке 6.16.



Рисунок 6.16 – Обмотки управления ОУ1-6 и катушки ОГУП

6.2.7. Сценарий токов в обмотках управления

На основании сценариев развития плазменного разряда выполнены расчёты равновесных плазменных конфигураций и получены зависимости токов в обмотках полоидального поля [35].

Формирование плазменного разряда происходит в круглом сечении на внутреннем радиусе вакуумной камеры с $R = 1.06$ м и $a = 0.25$ м [119]. К моменту $t = 1.76$ с ток плазмы достигает максимального значения $I_{pl} = 2.0$ МА и

формируется однонулевая диверторная конфигурация. Сценарий токов полоидальной системы приведен на рисунке 6.17.

Начальное распределение токов в обмотках управления определялось с учётом возможностей системы питания и необходимостью обеспечить минимальное поле рассеяния в зоне формирования разряда с большим радиусом $R = 1.06$ м и малым радиусом $a = 0.25$ м.

Эволюция формы плазмы, рассчитанная по коду DINA [118,120] показана на рисунке 6.18.

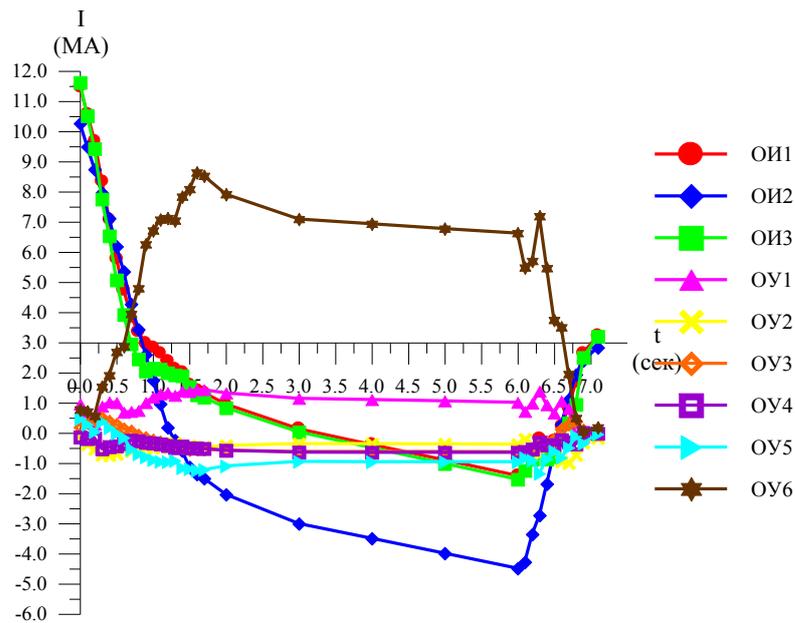


Рисунок 6.17 - Сценарий токов в обмотках управления ОУ1-6 в одновитковом приближении [35]

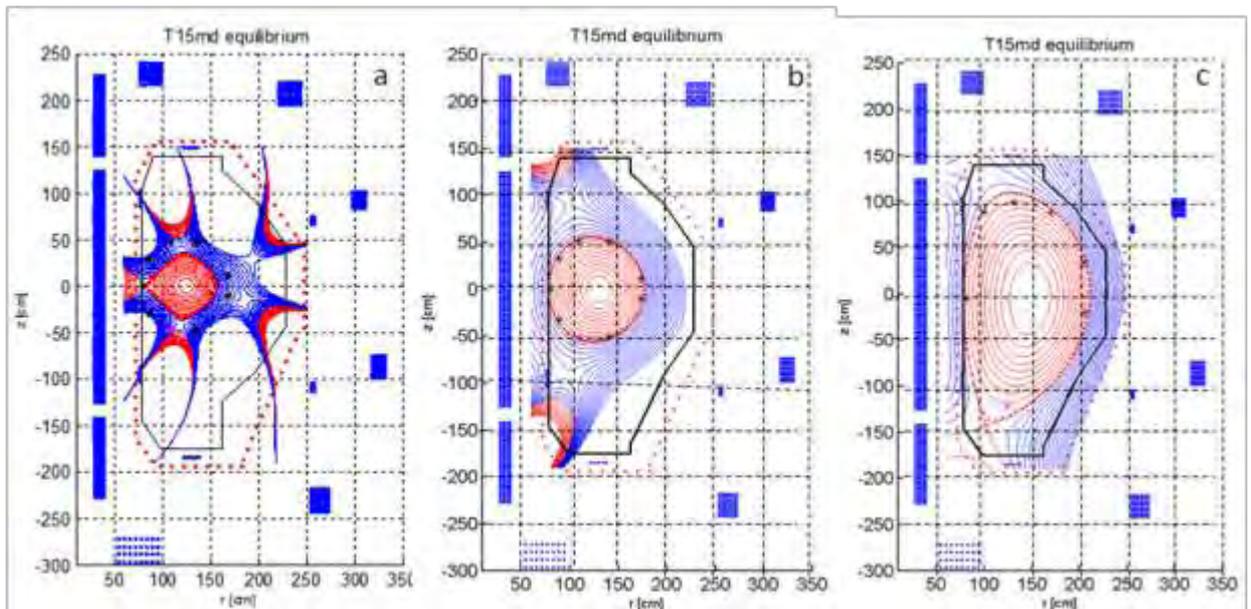


Рисунок 6.18-Сценарии эволюции плазмы: а) $t=0.5$ мс, $I_{pl}=500$ А; б) $t=50$ мс, $I_{pl}=58$ кА; в) $t=1.76$ с, $I_{pl}=2$ МА

6.3. Вакуумная камера установки Т-15МД

6.3.1. Назначение и технические характеристики

Вакуумная камера (ВК) модернизированной установки Т-15 является одной из основных систем токамака и предназначена для получения в ней плазмы с термоядерными параметрами, размещения внутрикамерных элементов и диагностик. Технические характеристики ВК приведены в Таблице 6.7. Общий вид вакуумной камеры в 3-D формате показан на рисунке 6.19.

Таблица 6.7 - Технические характеристики ВК

Параметры	Величина
Количество полномасштабных циклов разряда плазмы за весь срок эксплуатации	5×10^4
Длительность разряда, с	≥ 5
Пауза между импульсами, мин	15
Количество срывов тока плазмы ($B_T \leq 2$ Тл, $I_p \leq 2$ МА)	5×10^3
Температура прогрева ВК, °С	220 ± 20
Предельное фоновое давление, Па	10^{-5}
Пиковая тепловая нагрузка на дивертор, МВт/м ²	10

Продолжение таблицы 6.7

Мощность теплоотвода с первой стенки, МВт/м ²	0.2
Минимальный зазор плазма - первая стенка в экваториальной плоскости установки: - на внутреннем радиусе, мм - на наружном радиусе, мм	30 150
Расстояние между X-точкой и защитным покрытием дивертора: - по наружной ветви сепаратриссы, м - по внутренней ветви сепаратриссы, м	0.5 0.25
Толщины стенки: - внутренний цилиндр, мм - внешний цилиндр, мм - конических и плоских элементов, мм	5 8 8
Внутренний размер камеры по вертикали, м	3.39
Площадь поверхности, обращенной к плазме, м ²	~150
Материал облицовки первой стенки	графит FP479
Объем вакуумной камеры, м ³	~ 47
Материал вакуумной камеры	нерж. сталь 321 ($\mu \leq 1.1$)

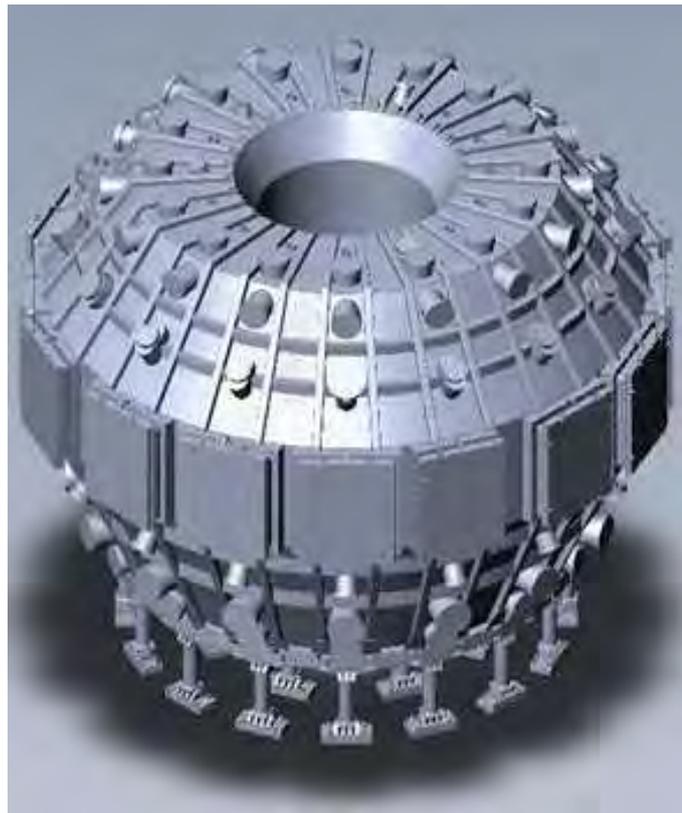


Рисунок 6.19 – Общий вид вакуумной камеры (3-D формат)

6.3.2. Состав, компоновка и конструкция ВК

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

Для обеспечения возможности монтажа совместно с обмотками тороидального поля (ОТП) ВК разделена на три монтажных модуля (половинка и две четвертинки). Единая тороидальная камера формируется внутри ЭМС на своих опорах, устанавливаемых на общую с ЭМС кольцевую подставку и изолированных от нее. При этом сварка модулей между собой возможна только из их внутренних полостей, так как ОТП в значительной мере перекрывает, а центральный соленоид полностью исключает доступ к внешней поверхности камеры. Кроме того, на внешних поверхностях модулей ВК имеются тороидальные и полоидальные ребра П - образного сечения, образующие силовые пояса ВК. Приварка ребер к оболочке ВК выполняется через промежутки между тороидальными катушками ЭМС до установки и приварки силовой структуры указанных катушек. Таким образом, монтажный модуль должен приходиться на монтаж со всеми фланцами и патрубками, вписывающимися во внутренний контур ОТП, с нагревателями и теплоизоляцией, с элементами системы диагностики, размещаемыми на внешней поверхности. Внутрикамерные элементы могут быть установлены после сварки монтажных модулей в единое целое.

Вакуумная камера имеет 16 экваториальных портов прямоугольного сечения ($400 \times 880 \text{ мм}^2$ - 8 шт., $400 \times 840 \text{ мм}^2$ - 4 шт. и $400 \times 720 \text{ мм}^2$ - 4 шт.), к которым пристыковываются экваториальные патрубки. Фланцевые соединения экваториальных патрубков обеспечиваются сваркой. На период пусконаладочных работ предусмотрена возможность уплотнения с помощью эластомерных уплотнителей.

В верхней и нижней части ВК имеются малые патрубки Ду40 и Ду63, которые привариваются к оболочке ВК. Сварные соединения выполняются изнутри ВК и позволяют выполнить 2 ÷ 3 цикла сварки-резки в случае демонтажа при ремонте ВК.

Все прочие патрубки Ду160, Ду200 и Ду250 снабжены заглушками, вместо которых в процессе эксплуатации устанавливаются удлинительные патрубки или иное оборудование. Фланцевые соединения всех патрубков ВК, кроме экваториальных, выполняются на металлическом уплотнителе типа conflat.

Внутренняя поверхность камеры снабжена рёбрами, на которые устанавливаются элементы защитного покрытия. Материал элементов – графит FR479.

В нижней и верхней частях ВК предусмотрены посадочные места для установки дивертора.

На внешнем и внутреннем обводах ВК на внутренних поверхностях конических оболочек и цилиндра предусмотрены кронштейны для установки верхних и нижних витков пассивной стабилизации. Витки пассивной стабилизации электрически соединены последовательно вертикальными перемычками. При этом шины перемычки изолированы от стенки ВК и друг от друга.

Геометрия экваториальных патрубков определяется требованиями к вводу пучков нейтральной инжекции:

- 1) просвет патрубка по нормали к оси пучка – $300 \times 800 \text{ мм}^2$;
- 2) пучки нейтралов вводятся тангенциально к плазменному шнуру по радиусу (прицельный параметр):

$$r = R_0 - a / 2 = 1.48 - 0.67 / 2 = 1.145 \text{ м},$$

где R_0 – большой радиус плазмы,

$a = R_0 / A = 0.67 \text{ м}$ – малый радиус плазмы,

$A = 2.2$ – аспектное отношение.

Инжекторы будут присоединены к экваториальным патрубкам, которые располагаются в 11, 13, 15-м секторах ВК.

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

6.3.2.1. Оболочка ВК

Тороидальная оболочка ВК имеет цилиндроконическое поперечное сечение, средняя часть которого образована двумя соосными цилиндрами, а верхняя и нижняя части – усеченными конусами и кольцевыми потолком и днищем соответственно. По условиям монтажа в неразъёмные катушки ОТП оболочка должна состоять из трех модулей.

Для обеспечения точности изготовления оболочка ВК изготавливается в два этапа.

На первом этапе изготавливается замкнутая тороидальная оболочка со всем необходимым оребрением, с приваркой экваториальных портов, необходимых патрубков, кронштейнов для установки устройства пассивной стабилизации и т.д. Проводятся вакуумные испытания, в т.ч. на прогретой камере ($T=220\text{ }^{\circ}\text{C}$).

На втором этапе ВК разрезается на монтажные модули. Весогабаритные характеристики модулей позволяют осуществить транспортировку железнодорожным или автотранспортом. Монтаж в НИЦ «Курчатовский институт» выполняется с помощью мостового крана.

Кольцевое днище оболочки ВК усилено радиальными ребрами, на которых равномерно расположены 16 площадок для приварки опор ВК.

Материал оболочки ВК – 321 немагнитная ($\mu = 1.0 \div 1.1$) нержавеющей сталь с удельным сопротивлением материала $\rho_{ss} = 71 \div 75\text{ мкОм}\cdot\text{см}$.

6.3.2.2. Элементы защитного покрытия ВК

На рёбрах оболочки ВК, обращённых внутрь камеры, установлены элементы защитного покрытия. Каждый элемент представляют собой пластину из графита FP479 толщиной 20 мм с оправой из стали 12X18H10T, с помощью

которой пластина крепится к ребрам. Модульный принцип конструкции и универсальные узлы крепления оправы позволяют устанавливать элементы различной конфигурации. Конструкция крепления элементов защитного покрытия позволяет выполнить их замену при эксплуатации или ремонте со вскрытием ВК на атмосферу.

Элементы защитного покрытия образуют сплошную поверхность на внутреннем цилиндре и витках пассивной стабилизации. На наружном обводе камеры элементы защитного покрытия устанавливаются между экваториальными патрубками и на перемычке устройства пассивной стабилизации.

Защитное покрытие в верхней части ВК, которое обеспечивает восприятие тепловой нагрузки при работе с двухнулевой магнитной конфигурацией, состоит из 16-ти элементов первой стенки, имеющих водяное охлаждение. Элемент первой стенки представляет собой подложку из стали 12X18H10T, к которой крепятся элементы защитного покрытия из графита FP479 толщиной до 25 мм. Подложка из стали 12X18H10T имеет на внутренней стороне систему каналов прямоугольного сечения, через которые прокачивается охлаждающая вода. Обеспечение водой каждого из элементов первой стенки осуществляется через два патрубка Ду 63 в потолке ВК.

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

6.3.2.3. Опорная структура ВК

В функции опорной структуры входят:

- восприятие силы тяжести ВК, электромагнитных и других возможных внешних воздействий;
- центрирование ВК относительно ЭМС.

Опорная структура ВК обеспечивает возможность температурных перемещений ВК без возникновения опасных механических напряжений в

элементах конструкции ВК, при этом выдерживает электромагнитные нагрузки при срывах тока плазмы и сейсмические воздействия.

Опорная структура ВК состоит из 16-ти опор, размещенных в тех же секторах ВК, что и экваториальные патрубки.

Температура ВК при работе и омическом прогреве может достигать $220 \pm 20^\circ\text{C}$, что вызывает тепловые перемещения на 5 – 6 мм опорных зон камеры, удаленных от центра на 1750 мм. Периодические тепловые радиальные деформации камеры не должны нарушать ее центрирование относительно ЭМС. Это достигается установкой ВК на расположенные по окружности пластинчатые опоры, упруго работающие на изгиб. Пакет пластин сварен с верхним и нижним башмаками. Верхний башмак состоит из двух частей, соединенный цилиндрическим шарниром, который существенно увеличивает долговечность упругой опоры, упрощая картину деформаций пластин. Верхний башмак приваривается к днищу ВК, а нижний к опорной балке во время монтажа последней.

В нижнем башмаке установлена стеклотекстолитовая прокладка, изолирующая вакуумную камеру от опорной балки.

Опорная структура ВК обеспечивает надежное крепление ВК к подставке ЭМС и электрически изолирована от последней на напряжение 1 кВ.

6.3.2.4. Витки пассивной стабилизации

Витки пассивной стабилизации предназначены для уменьшения скорости ухода плазмы по вертикали.

Витки пассивной стабилизации представляет собой тороидально направленные токопроводящие витки с межвитковой перемычкой, которые размещаются на внутреннем и внешнем обводах внутри оболочки ВК. Витки имеют электрический разрыв в тороидальном направлении.

В месте тороидального электрического разрыва концы витков соединены между собой в полоидальном направлении перемычкой, которая представляет

собой параллельные шины, наложенные одна на другую с изоляцией между ними. Перемычка электрически изолирована от ВК. Шины перемычки коммутированы таким образом, чтобы суммарный ток верхнего и нижнего витков был равен нулю.

Поперечное сечение каждого из витков и шин перемычки - прямоугольное ($20 \times 200 \text{ мм}^2$).

На поверхности витков и перемычки, обращенные к плазме, установлены элементы защитного покрытия.

Материал витков и шин перемычки – медь с удельным сопротивлением $0.033 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ при температуре 220°C .

6.3.2.5. Дивертор

Дивертор модернизированной установки токамак Т-15 должен воспринимать без потери работоспособности тепловые потоки удельной мощностью до $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Максимальная температура поверхности приёмных пластин дивертора во время разрядного импульса не должна превышать 1000°C .

Система охлаждения дивертора должна обеспечить снижение температуры поверхности пластин до значения 220°C за время не более 15 минут после плазменного импульса.

Дивертор располагается в нижней и верхней частях вакуумной камеры.

Дивертор представляет собой кольцевую структуру из 16 секторов.

Внутренние приёмные пластины расположены на конусной части дивертора. Толщина пластин 25 мм. Габариты пластин $\sim 100 \times 110 \text{ мм}^2$. Крепление пластины к подложке осуществляется винтами с наружной стороны пластины. Для улучшения теплопередачи между подложкой и приемной пластиной уложена прокладка из граффлекса. Между головкой винта и планкой предусмотрена пружинная шайба, позволяющая сохранить усилие предварительного натяга резьбового соединения при изменении температуры деталей в процессе эксплуатации.

Внешние пластины дивертора расположены на плоской части подложки. Толщина пластин 25 мм. Размеры пластин от 70 мм до 150 мм. Крепление пластин выполнено аналогично креплению внутренних пластин.

Опора представляет собой оребренную несущую конструкцию, выполненную из стали 12Х18Н10Т. Верхняя часть опоры выполнена в виде охлаждаемой подложки, на которой закрепляются пластины. Каналы охлаждения в подложке образуют параллельные ветви. В нижней части подложки к каналам подходят трубки, соединяющие каналы с двумя коллекторами.

Прогрев приёмных пластин до 400 °С осуществляется с помощью кабеля типа КНМСНХ, закреплённого на нижней поверхности подложки.

Для напуска в вакуумную камеру нейтрального газа и для установки датчика давления используются два патрубка Ду16 на вакуумной камере.

Для контроля температурных характеристик элементов дивертора установлены термопары, представляющие собой термостойкий кабель КНМСС (ХК). Термопары расположены по оси сектора внутри графитовых пластин. Всего 35 термопар. Расстояние между термопарами ~ 30 мм.

На той же оси сектора предусмотрена установка диагностических электрических зондов.

Диагностический зонд диаметром 40 мм расположен на радиусе 1160 мм. Предусмотрено перемещение зонда на расстояние 370 мм от наружной поверхности графитовой пластины. Малые диагностические зонды диаметром 5 мм выступают над поверхностью пластин, обращенных к плазме, на 2 мм. Расстояние между зондами ~ 30 мм, всего 33 зонда. Зонды, выполненные из графита, изолированы электрически от графитовых пластин и конструкции опоры.

В качестве проводов от зондов применен термостойкий кабель типа КТМС.

Выводы кабелей и проводов из вакуумной камеры выполнены через нижние вертикальные и горизонтальные патрубки вакуумной камеры.

6.3.2.6. Система омического прогрева

ВК оснащена системой омического прогрева, которая обеспечивает поддержание температуры на поверхности ВК – $220 \pm 20^\circ\text{C}$ в режимах подготовки камеры к работе.

Система управления прогревом обеспечивает поддержание требуемой температуры камеры.

В состав ВК входят электронагреватели, термопары и теплоизоляция.

Прогрев ВК осуществляется с помощью кирс-кабеля, проложенного по всей поверхности камеры. В качестве электронагревателя используется кабель КНМСНХ, наружным диаметром 6 мм и сопротивлением 1 Ом/м. Отрезки кабеля длиной ~ 7 м укладываются с шагом 80 мм на наружной поверхности камеры. Требуемая мощность прогрева оболочки камеры составляет примерно 40 кВт. Максимальная мощность существующей системы прогрева – 300 кВт.

Равномерность подъёма и поддержания температуры на поверхности камеры обеспечивается включением и выключением электронагревателей на соответствующих участках. Параметры кабеля определены в расчете на использование существующей системы питания установки Т-15. Напряжение питания равно 90 В.

Для контроля температуры на поверхности камеры и самого нагревателя в пределах укладки каждой ветви установлена пара термопар, представляющих собой термостойкий кабель КТМС (ХА). Для обеспечения надежности работы установки в целом предусмотрены резервные термопары в одном из поперечных сечений камеры.

Внешняя поверхность ВК, кроме внутреннего цилиндра, закрыта теплоизоляцией, которая состоит из отдельных матов, что позволяет легко их демонтировать в случае необходимости. Маты представляют собой термостойкий чехол, заполненный минеральной ватой. Теплоизоляционные маты укладываются на поверхность ВК в два слоя. Первый слой теплоизоляции укладывается в

промежутках между силовыми ребрами ВК, а второй слой – поверх рёбер с перекрытием стыков в первом слое теплоизоляции.

Температура на поверхности теплоизоляции не должна превышать 40 °С.

6.3.2.7. Система электромагнитной диагностики

Система электромагнитной диагностики (СЭМД) модернизированной установки Т-15 предназначена для измерения основных электротехнических параметров плазмы (ток, напряжение на обходе, магнитные поля); непрерывного анализа магнитогидродинамической (МГД) активности плазмы; контроля за величинами магнитных полей и токов в обмотках магнитной системы установки; определения положения и формы плазмы для систем управления и физической диагностики; измерения энергосодержания плазмы.

Датчики СЭМД располагаются внутри вакуумной камеры (ВК) установки (под защитной облицовкой первой стенки, на внутренней поверхности оболочки ВК) и на внешней поверхности оболочки ВК. По причине того, что датчики СЭМД используются в различных системах установки, а также для повышения надежности, часть датчиков дублируется и размещается в двух секторах вакуумной камеры.

6.4. Планы по вводу токамака Т-15 МД в эксплуатацию

Все элементы электромагнитной системы и вакуумная камера будут изготовлены и испытаны к концу 2015 г. [121,122]. В ноябре-декабре 2015 г. будет осуществлена контрольная сборка электромагнитной системы на заводе с целью сопряжения 16 тороидальных катушек между собой путем фиксации межблочной структуры и проверка технологии сборки полоидальных катушек обмотки индуктора.

В 2015-2016 гг. будут осуществлены демонтаж установки токамак Т-15 и подготовка зала для монтажа модернизированной электромагнитной системы и вакуумной камеры в 2016-2017 гг.

В 2017 г. установка должна быть подключена к технологическим системам (электропитание, водоснабжение), произведена наладка всех систем совместно с установкой и осуществлен физический пуск в омическом режиме.

В 2018-2020 годах будут введены в работу системы дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока.

6.5. Выводы к главе 6

1. Разработан проект модернизированного токамака Т-15 (Т-15МД) – прототипа термоядерного источника нейтронов.
2. Токамак Т-15МД имеет параметры: большой радиус плазменного шнура - 1.48 м, малый радиус – 0.67 м, вытянутость – 1.9, тороидальное магнитное поле на оси шнура – 2 Тл, ток плазмы – 2 МА, длительность импульса – 10 с, мощность дополнительного нагрева – 20 МВт.
3. Необходимая мощность дополнительного нагрева плазмы для осуществления L-H перехода составляет $1.0 \div 1.5$ МВт.
4. Неиндукционный ток плазмы 1 МА может поддерживаться в течение 30 секунд.
5. Полоидальная магнитная система может создавать одно- и двух нулевые диверторные конфигурации с аспектным отношением $2.2 \div 3$.
6. Дивертор может воспринимать тепловую нагрузку 10 МВт/м^2 .
7. Все элементы электромагнитной системы и вакуумной камеры будут изготовлены до конца 2015 года. Физический пуск модернизированного токамака Т-15 планируется осуществить в 2017 году, а в 2018-2021 гг. - ввод систем дополнительного нагрева плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание и ввод в эксплуатацию крупнейшего в мире токамака Т-15, обладающего уникальной сверхпроводящей обмоткой тороидального поля на основе ниобий – оловянного проводника с циркуляционным охлаждением, потребовало детального исследования совместной работы всех технологических систем установки для выработки технических решений и рекомендаций по созданию токамаков со сверхпроводящей электромагнитной системой, как для изучения стационарных плазменных режимов, так и в перспективе для термоядерных и гибридных реакторов.

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.

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.

Второй целью работы являлась разработка токамака с диверторной конфигурацией плазменного шнура для решения актуальных задач термоядерного синтеза и будущих гибридных систем. 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 катушки СОТП 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. Установлено, 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), ТРХ (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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИАЭ – Институт атомной энергии

РНЦ – Российский научный центр

НИЦ – Национальный исследовательский центр

ИЯС – Институт ядерного синтеза

ИФТ – Институт физики токамаков

НИИЭФА – Научный исследовательский институт электро - физической аппаратуры

ГКМП – группа компаний машиностроения и приборостроения

ФЦП – Федеральная целевая программа

ГК – Государственная корпорация

НТС – научно-технический совет

РАН – Российская академия наук

Минобрнауки – Министерство образования и науки

УТС – управляемый термоядерный синтез

ТЯР – термоядерный ядерный реактор

ТИН – термоядерный источник нейтронов

ДВАО – долгоживущие высоко активные отходы

ИТЭР – международный экспериментальный термоядерный реактор

ДЕМО – демонстрационный реактор

ЭМС – электромагнитная система

СОТП – сверхпроводящая обмотка тороидального поля

ОУ – обмотка управления

ОИ – обмотка индуктора

ОГУП – обмотка горизонтального управляющего поля

ОВУП – обмотка вертикального управляющего поля

ОИН – обмотка индукционного нагрева

НАЭ – наружный азотный экран

ВАЭ – внутренний азотный экран

СТНЭ – сверхпроводящий токонесящий элемент

ЛСТЛ – лента стеклолаковая

БКГТВ – блок криогенных и токовых вводов

ОК – опорная колонна

ОЦ – опорный цилиндр

МВК – модуль вакуумной камеры

ОВК – оболочка вакуумной камеры

СКО – система криогенного обеспечения

МО – маслоочистка

НО – низкотемпературная очистка

ОГ – ожижитель гелиевый

БКГТВ – блок криогенных и токовых вводов

БАВ – блок азотных вводов

СТА – система термостатирования азота

СИМС – стенд по исследованию магнитных систем

СЭП – система электропитания

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент черноты

P – давление

R – большой радиус тора

a – малый радиус тора

A – аспектное отношение

h – энтальпия

\dot{m} – массовый расход

I – ток

I_c – критический ток

I_p – ток плазмы

j – плотность тока

B_T – тороидальное поле

S – площадь поперечного сечения проводника

ρ, ρ^σ – удельное электрическое сопротивление

ρ^v – удельная плотность

c – теплоемкость

– коэффициент теплопроводности

α – коэффициент теплоотдачи

η – коэффициент динамической вязкости

$v_{\text{ф}}, v_{\text{ад}}$ – скорость распространения нормальной фазы

Re – число Рейнольдса

Nu – число Нусельта

Pr – число Прандтля

ЭЦР – электронно-циклотронный резонанс

ИЦР – ионно-циклотронный резонанс

СВЧ – сверхвысокочастотный

НГ – нижний гибрид

ИН – инжекция нейтралов

β – величина отношения газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля

β_N – нормализованная бэга

k_{95} – вытянутость сечения плазменного шнура по уровню 95% магнитного потока

– треугольность формы сечения плазменного шнура

n_e – плотность плазмы

q – величина запаса устойчивости плазменного шнура

τ_E – энергетическое время жизни

T_e – температура электронов

T_i – температура ионов

Ψ – величина запаса магнитного потока

l_i – внутренняя индуктивность шнура

U_{res} – резистивное напряжение

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года». Постановление Правительства Российской Федерации от 3 февраля 2010г. №50.
2. Азизов Э.А., Минеев А.Б. Об унификации подходов к выбору параметров токамаков и некоторых целях дальнейшего развития национальных термоядерных программ // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез», Вып. 3, 2010, С. 3-12.
3. Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза // Физика плазмы, 2010, т. 36, С. 307-346.
4. Bell M.G., McGuire K.M., Arunasalam V. et al. Overview of DT results from TFTR. // Nucl. Fusion, 1995, Vol. 35, No. 12, p. 1429.
5. Jacquinot J. and JET Team, JET results in D-T divertor plasmas // Nuclear Fusion, 1995, Vol. 38, No. 9, p. 1263.
6. Aymar R., Varabaschi P. and Shimomura Y. The ITER design // Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, 44, pp. 519-565.
7. Колбасов Б.Н., Борисов А.А., Васильев Н.Н. и др. Концепция демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО - С // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, С. 3-13.
8. Bagdasarov A.A., Cherkashin M.Yu.,...Hvostenko P.P. et al. Plasma experiments on T-7 superconducting tokamak // Proc. of the 10th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, 1981, vol.2, p.141.
9. 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.
10. Jacquinot J. Recent developments in steady-state physics and technology of tokamaks in Cadarache // Nucl. Fusion. 2003. Vol. 43. No. 12, p. 1583.

11. Zushi H., Nakamura K., Hanada K. et al. Steady-state tokamak operation, ITB transition and sustainment and ECCD experiments in TRIAM-1M // Nucl. Fusion, 2005. Vol. 45, No.10, p. S142.
12. Iiyoshi A., Fujiwara M., Motjima O., Ohyaabu N., Yamazaki K. Design study for the large helical device // Fusion Technology, 1990, Vol. 17, No. 1, pp. 169-187.
13. Motojima O., Ida K., Watanabe K.Y. et al. Overview of confinement and MHD stability in the Large Helical Device // Nucl. Fusion, 2005. vol. 45. p. S255.
14. Bojiang Ding, Guangli Kuang, Yuexiu Liu et al. Improved Mode by Lower Hybrid Current Drive on HT-7 Tokamak // 29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion Montreux, 17-21 June 2002 ECA Vol. 26B, P-4.056.
15. Gusev V.K., Ayushin B.B., Chernyshev F.V. et al. Overview of the Globus-M Spherical Tokamak Results // Proc. 21st Intern. Conf. on Fusion Energy 2006 (Chengdu, 2006). Vienna:IAEA. CD-ROM OV/P-3 file; <http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Meetings/fec2006pp.asp>.
16. Gusev V.K., Aleksandrov S.E., Alimov V.Kh. et al. Overview of results obtained at the Globus-M Spherical tokamak // Nucl. Fusion, 2009, Vol. 49, No. 10, p.104021.
17. Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Buzhinskij O.I. et al. Plasma-physical and electrophysical aspects of the compact stationary neutron source on the basis of a tokamak. // Plasma Devices and Operations, 2005, vol. 13, № 3, p. 167.
18. Azizov E.A., Arefiev Yu.P., Gladush G.G. et al. The concept of the volumetric neutron source on the basis of the JUST-T tokamak for minor actinides transmutation. // Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, p. 279.
19. Watkins M.L. Overview of JET Results // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Fusion Energy 2006 (Chengdu, 2006). Vienna: IAEA. CD-ROM OV/1-3 file; <http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Meetings/fec2006pp.asp>.
20. Riccardo V. On behalf of the ITER-like wall engineering design and manufacture team, engineering challenges of the ITER-like Wall // 18th PSI Conf. Toledo, Spain, May 2008, O-2.

21. T. Fujita and the JT-60 team. Steady state operation research in JT-60U with extended pulse length // Nucl. Fusion, 2006, Vol. 46, S3.
22. Matsukawa M. Engineering feature in the design of JT-60SA // Proc. 21st Intern. Conf. on Fusion Energy 2006 (Chengdu, 2006). Vienna:IAEA. CD-ROM FT/P7-5 file; <http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Meetings/fec2006pp.asp>.
23. Sakurai S., Higashijima S., Kawashima H. et al. Design and R&D of plasma facing components for JT-60SA and assessment of divertor performance // 18th PSI Conf. Toledo, Spain, May 2008, O-1.
24. Wan Y.X., Weng P.D., Li J.G., Gao D.M., Wu S.T. and the EAST Team. Progress of the EAST project in China // Proc. of the 20th IAEA Fusion Energy Conf. Vilamoura, Portugal, 2004, FT/3-3.
25. Gong X., Feng M., Shi B. et al. Plasma start-up and assessment of heat loads on limiters in the EAST Tokamak // 18th PSI Conf. Toledo, Spain, May 2008, O-9.
26. Yang H.L. and the KSTAR Team, KSTAR Project // Proc. of the 21st Intern. Conf. on Fusion Energy 2006 (Chengdu, 2006). Vienna:IAEA. CD-ROM FT/2-2.25 file; <http://wwwpub.iaea.org/MTCD/Meetings/fec2006pp.asp>.
27. Saxena Y. C. and SST-1 Team. Present status of the SST-1 project // Nucl. Fusion, 2000, vol. 40. p. 1069.
28. Gates D.A., Kessel C., J. Menard et al. Progress towards steady state on NSTX // Nucl. Fusion, 2006, 46, S22.
29. Gates D.A., Ahn J., Allain J. et al. Overview of results from the National Spherical Torus Experiment (NSTX) // Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 104016.
30. Progress in the ITER Physics Basis // Nucl. Fusion, 2007, vol. 47(Special Issue).
31. 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.
32. Альхимович В.А., Велихов Е.П., Вершков, ... 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.

33. Предложения по освоению технологии управляемого термоядерного синтеза (УТС) в Российской Федерации на 2010-2020 годы – Москва, 2010.
34. Поручение Правительства РФ от 12.08.2010 № П7-28262.
35. Алексеев А.Б., Арнеман А.Ф.,...Хвостенко П.П. и др. Установка Т-15МД // Технический проект 1А.518.571 ПЗ, Санкт-Петербург, 2010.
36. Azizov E.A., Belyakov V.A., Filatov O.G., Velikhov E.P. and T-15MD Team: Bondarchuk E.N., Dokuka V.N...Khvostenko P.P. et al. Status of Project of Engineering-Physical Tokamak // 23rd IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2010), Daejon, Korea Rep. of 11-16 October 2010, FTP/P6-01.
37. 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.
38. Беляков В.П., Глухих В.А., Кавун А.М., Кадомцев Б.Б. и др. Установка Токамак-15. Основные характеристики и программа исследований // Атомная энергия, 1982, т. 52, вып. 2, С. 101- 108.
39. Общая характеристика и состав комплекса. Электромагнитная система и вакуумная камера / Техническое описание комплекса Т-15, т.1, НИИЭФА, Ленинград, 1988.
40. Александров Ю.Н., Волобуева Н.М., Динабург Л.Б., и др. Результаты испытаний опорной колонны установки Токамак-15 // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1988), С. 138-139.
41. 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.
42. Черноплеков Н.А., Анашкин И.О., Иванов Д.П. и др. Задачи и результаты испытаний рабочих блоков СОПТ Т-15 // Атомная энергия, 1989, т. 67, вып. 3, С. 166 - 172.
43. Альхимович В.А., Александров Ю.Н., Анашкин И.О.,...Хвостенко П.П. и др.

- др. Испытания и сборка электромагнитной системы установки Токамак-15 // Препринт ИАЭ-5138/7, 1990.
44. 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.
 45. 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.
 46. 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.
 47. Ivanov Denis, Kolbasov Boris, Anashkin Igor, Khvostenko Pyotr et al. Operational Experience with Forced Cooled Superconducting Magnets // 27th Symposium on Fusion Technology, September 24-28, 2012 Liege (Belgium), Book of abstracts, p. 3.59.
 48. Butkevich I.K., Veremchuk S.I., Dukhanin Yu.I. et al. Cryogenic system of the T-15 tokamak device design and test results // Plasma Devices and Operations, Volume 2, Issue 1, 1992, pp. 47-59.
 49. Анашкин И.О., Иванов Д.П., Кикнадзе Г.И. и др. Результаты испытаний по захлаживанию модельных и полномасштабных экспериментальных катушек Т-15 на Курчатовском испытательном стенде // Препринт ИАЭ-4320/10, 1986.
 50. Bondarchuk E. N., Dinaburg L. B., Doinikov N. I...Khvostenko P.P. et al. Tokamak-15 electromagnetic system. Design and test results // Plasma Devices and Operations, Volume 2, Issue 1, 1992, p.1-25.
 51. 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 Всесоюз. конф. по

- инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1990), С. 124-125.
52. Дюжев В.Е. Анализ работы системы криогенного обеспечения термоядерной установки Токамак-15 (СКО УТ-15) в период 1990-1992 гг.// Препринт ИАЭ 5571/10, 72 с.
 53. ITER Physics Basis // Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, № 12, p. 2579.
 54. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака // М.: Энергоатомиздат, 1983, 184 с.
 55. Sakamoto Y. Proc. IX-th Int. Vacuum Congress, Madrid 1983, p. 716.
 56. Sakamoto Y., Ishibe Y., Yano K. et al. Electron cyclotron resonance discharge cleaning of JFT-2 Tokamak (Jaeri) // J. Nucl. Mater., 1980, 93-94, pp. 333-337.
 57. Sakamoto Y., Ishibe Y., Ishii S. et al. ECR discharge cleaning experiment in the JIPP T-II // J. Nucl. Mater., 1982, 111-112, pp. 485-488.
 58. 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.
 59. 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.
 60. 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 Symp. on Fusion Technology, Lisbon, Portugal, 16-20 September 1996, vol.1, p.515.
 61. 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.
 62. Aymar R. First Experiments on TORE SUPRA // 12th Int. Conf. on Plasma Physics and Contr. Fusion Res. (Nice, 1988), vol. 1, p.9.

63. ITER conceptual Design: Interrim Report, IAEA, Vienna, 1990.
64. Иванов Д.П., Кейлин В.Е., Ковалев И.А. и др. Исследование свойств и устойчивости сверхпроводящего токнесущего элемента установки Т-15 к импульсным полоидальным полям. Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Л., 1982, т.2, С. 94 - 103.
65. Анашкин И.О., Клименко Е.В., Лелехов С.А. и др. Исследование модельных катушек из сверхпроводника, предназначенного для обмотки токамака Т-15 // Атомная энергия, т.57, в.6, декабрь 1984, С. 401-404.
66. 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.
67. 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.
68. Дубасов В.Г., Желамский М.В., Трохачев Г.В. Устройство обнаружения нормальной фазы в сверхпроводящей обмотке тороидального поля установки Токамак-15 // Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Л., 1982, т.2, С.104-111.
69. Беляев С.Т., Краснов Ю.С., Платонов А.П. О разряде крупных сверхпроводящих электромагнитных систем // Препринт ИАЭ - 4891/1, Москва, 1989.
70. 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.
71. 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.
72. Fickett F.R. Proc. 4th Int. Conf. on Magnet Technology, 1972, Brookhaven,

- CONF – 720908, p. 359.
73. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Энергоатомиздат, 1985.
 74. 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.
 75. Альхимович В.А., Бритоусов Н.Н., Вертипорох А.Н.,...Хвостенко П.П. Результаты первых экспериментов на установке Т-15 // Сборник научных трудов ИАЭ, 1989, т.2, С. 3-7.
 76. 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.
 77. 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.
 78. 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.
 79. 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 Symposium on Fusion Engineering, Hyannis, 1993, October, vol.2, pp.1152-1157.
 80. 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.
 81. 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.
82. Журавлев А.Н., Иванов Д.П., Лелехов С.А. Влияние дефектов проводника на работоспособность сверхпроводящего магнита // Атомная Энергия, вып.4, 1990, С.250-253.
 83. Anashkin I.O., Chudnovsky A.N., Ivanov D.P., Khvostenko P.P., Posadsky I.A., Vertiporokh A.N. 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.
 84. Иванов Д.П., Лелехов С.А., Посадский И.А. и др. Влияние импульсных магнитных полей на устойчивость сверхпроводящего токонесущего элемента установки Т-15 // ВАНТ, 1979, серия Термоядерный синтез, в.2(4), С.123-131.
 85. Бондарчук Э.Н., Дойников Н.И., Костенко А.И. и др. О стабильности работы обмоток тороидального магнитного поля токамаков при срыве тока плазмы // ЖТФ, 1982, т.52, в.4, С. 668 - 674.
 86. Клименко Е. Ю., Мартовецкий Н.Н., Новиков С.И. Об устойчивости тока в СМС установки Т-15 при срыве тока плазмы // ЖТФ, 1985, т.55, в.6, с.1076-1083.
 87. 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.
 88. 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.
 89. 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.
 90. 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.
91. 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.
 92. Bondarchuk E.N., Dnestrovskij Yu.N., Leonov V.M. et al. Vertical MHD stability of the T-15M tokamak plasma // Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 4, pp. 219-227.
 93. Вознесенский В.А., Гасилов Н.А., Днестровский Ю.Н. и др. ТОКАМЕQ — код для расчета равновесия плазмы в токамаке // Препринт ИАЭ - 6208/7. М., 2001.
 94. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N., Dnestrovskiy A.Yu. et al. ASTRA An Automatic System of Transport Analysis in a Tokamak // Preprint IPP 5/42, Garching, 1991.
 95. Belyakov V.A., Lobanov K.M., Makarova L.P., Mineev A.B., Vasiliev V.I. Plasma Initiation Stage Analysis in Tokamaks with Transmak Code // Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, № 3, pp. 193-202.
 96. Alekseev, A.B., Arneman, A.F., Bondarchuk, E.N...Khvostenko P.P. et al. T-15M MAGNET SYSTEM // 22th Symposium on Fusion Technology, Helsinki, Finland, 9th–13th September, Book of Abstracts, 2002, p.279.
 97. 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 , p. 19-30 (12).
 98. Разработка технических мероприятий по обеспечению электропитания импульсной нагрузки РНЦ «Курчатовский институт» по ЛЭП 110 кВ от ТЭЦ-16 ОАО МОСЭНЕРГО// Отчет о НИР, МЭИ, кафедра «Электрические станции», М. 2002.
 99. 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.
100. Kaye S. M., Valovic M., Chudnovskiy A.N. et al. The role of aspect ratio and beta in H-mode confinement scaling // Plasma Phys. Control. Fusion, 2006. vol. 48. no. 5A, pp. A429-A438, 2006.
 101. Соколов М.М. Возможность применения измерительно - вычислительного комплекса Токамак-10 на других экспериментальных установках // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, С. 73-78.
 102. Вдовин В.Л., Смирнов В.П., Хвостенко П.П. и др. СЦЕНАРИИ И СИСТЕМА ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА В ТОКАМАКЕ Т-15 // XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 11-15 февраля 2008 года.
 103. Benoit F., Allegretti L., Aumeunier M.-H. et al. Implementation of a design and configuration management platform for fusion components on the Tore Supra WEST Project // Fusion Engineering and Design, Vol. 89, Issues 9-10, pp.1928-1932.
 104. Zvonkov A.V., Kuyanov A.Yu., Skovoroda A.A. and Timofeev A.V. Plasma Oscillations and Waves // Plasma Physics Reports, 1998. vol. 24. p. 389.
 105. Pustovitov V.D., Mikhailovskii A.B., Kobayashi N. et al. // Proc. of the 18th Intern. Conf. on Fusion Energy 2000 (Sorrento, 2000). Vienna IAEA. CD-ROM ITERP/07;
<http://www.iaea.org/programmes/ripc/physics/fec2000/html/node241.htm#54297>.
 106. Медведев С.Ю. Пустовитов В.Д. Моделирование стабилизации RWM системой с обратными связями в токамаке // Физика плазмы. 2004, т. 30, С. 963.
 107. 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.
 108. Azizov E.A., Dokouka V.N., Dvorkin N.Ya. et al. Kazakstan Tokamak for material testing // Plasma Devices and Operations, 2003, vol. 11, p. 39.

109. Azizov E.A., Velikhov E.P., Tazhibayeva I.L. et al. Kazakstan tokamak for materials testing (KTM) and fusion problems // Almaty, Kazakstan, 2006.
110. 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.
111. 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.
112. 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.
113. Gribov Y., Albanese R., Ambrosino G. et al. ITER-FEAT Scenarios and Plasma Position/Shape Control // Proc. of the 18th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 2000, Sorrento, Italy, ITERP/02.
114. Lloyd B., Jackson G.L., Taylor T.S. et al. Low Voltage Ohmic and Electron Cyclotron Heating assisted in DIII-D // Nuclear Fusion 31 (1991) p. 2031.
115. Kajiwara K., Ikeda Y., Seki M. et al. Electron cyclotron heating assisted startup in JT-60U // Nuclear Fusion 2005, v.45, No7, p. 694.
116. Днестровский Ю.Н., Данилов А.В., Днестровский А.Ю. и др. РЕЖИМЫ РАБОТЫ МОДИФИЦИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ Т-15 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 4, С. 45-63.
117. 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
118. 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.
119. 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.
120. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique // Journal of Computational Physics, 109, No. 2 (1993) pp.193-201.
121. Sushkov A.V., Azizov E.A.,...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.1-3.
122. 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, Сборник тезисов докладов, Москва, 2015, С. 68.
123. 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.