

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование системы СВЧ-предионизации на токамаке КТМ

УДК: 621.385.6:537.57:621.039.62

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	К.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник лаборатории экспериментальных физических установок ИАЭ РГП НЯЦ РК	Сарсембаев Е.А.			

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД	Сечин А.А.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель научно-образовательного центра на правах кафедры, НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2020 год

**Результаты обучения магистров  
направления 16.04.01 «Техническая физика»  
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
<b>P1</b>	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P2</b>	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P3</b>	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты.	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P4</b>	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> ( 2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P5</b>	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<b>P6</b>	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P7</b>	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии.	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.

<b>P8</b>	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P9</b>	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P10</b>	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P11</b>	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения.	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.
<b>P12</b>	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки (специальность) 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Кусаинову Ануару Толеугалиевичу

Тема работы:

Исследование системы СВЧ-предионизации на токамаке КТМ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	52-46/с от 21.02.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.10.2020 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования служит система СВЧ-предионизации.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ литературных источников по методам предионизации; исследование свч-предионизации; раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».</p>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист.</li> <li>2. Abstract.</li> <li>3. Актуальность.</li> <li>4. Токамак КТМ.</li> <li>5. Расчет магнитного тороидального магнитного поля токамака КТМ.</li> <li>6. Расчет электронно-циклотронного резонанса в камере токамака КТМ.</li> <li>7. Номинальная мощность СВЧ-излучения.</li> <li>8. Источник СВЧ-излучения.</li> <li>9. Сборка и настройка магнетрона.</li> <li>10. Исследование параметров СВЧ-излучения в лабораторных условиях</li> <li>11. Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения экспериментов по контролю и получению СВЧ-излучения.</li> <li>12. Создание условия по моделированию электронно-циклотронного резонанса</li> <li>13. Расположение соленоида в вакуумной камере УМН-Э и ввод СВЧ-излучения через смотровое окно вакуумной камеры.</li> <li>14. Исследование параметров СВЧ-излучения в условиях ЭЦР.</li> <li>15. Экспериментальное получение резонансной СВЧ-предионизации на токамаке КТМ.</li> <li>16. Экспериментальные данные, полученные в ходе проведения экспериментов системы СВЧ-предионизации.</li> <li>17. Научное положение</li> </ol>

		18.Заключение
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)		
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна	
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович	
Раздел на иностранном языке	Утятина Янина Викторовна	
<b>Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>		
1. Казахстанский материаловедческий токамак 1.1 Основные подсистемы токамака КТМ 2. Методы преионизации		
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику		21.02.2020 г.

**Задание выдал руководитель/консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	к.т.н		
Начальник лаборатории экспериментальных физических установок ИАЭ РГП НЯЦ РК	Сарсембаев Е.А.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Кусаинов А. Т.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	<b>Б.П. Вейнберга</b>
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 20 %</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	21.02.2020 г.
---	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

<b>Исследование системы СВЧ-предионизации на токамаке КТМ</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Система СВЧ-предионизации</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– электробезопасность ГОСТ 12.1.038-82; – пожарная безопасность - ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84); – требования охраны труда при работе на ПЭВМ - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; – требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей - СанПиН 2.2.4.1329-03.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– повышенный уровень воздействия электромагнитного излучения; – воздействие электрического тока; – повышенный уровень шума.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– биологическое воздействие
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– электробезопасность; – пожарная и взрывная безопасность.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	21.02.2020 г.
--	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД	Сечин А.А.	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич		

## Реферат

**Выпускная квалификационная работа** 111 с., рис. 24, 15 табл., 28 источников, 1 приложение на английском языке.

**Ключевые слова:** предиионизация, сверхвысокая частота, токамак, магнетрон.

**Объект исследования:** система свч-предиионизации.

**Предмет исследования** – технические параметры системы СВЧ-предиионизации токамака КТМ.

**Цель работы:** разработка системы СВЧ-предиионизации на токамаке КТМ.

В процессе исследования системы СВЧ-предиионизации были проведены теоретические расчеты параметров и элементов системы СВЧ-предиионизации для токамака КТМ, исследованы параметры свч-излучения в лабораторных условиях с получением мощности свч-излучения.

В результате работы система СВЧ-предиионизации показала свою эффективность при проведении исследования на токамаке КТМ в среде аргона, результатом которого стало получение затравочных электронов в заданной области вакуумной камеры токамака КТМ на начальной фазе плазменного разряда и достижение тока плазмы до 10 кА и длительностью разряда до 20 мс.

**Область применения:** в исследованиях по физике плазмы токамака КТМ, для повышения стабильности формирования плазменного разряда на начальной его стадии.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Казахстанский материаловедческий токамак КТМ.....	17
1.1 Основные подсистемы токамака КТМ.....	19
2 Методы предыонизации.....	22
2.1 СВЧ-предыонизация на основе ЭЦР.....	22
2.2 Система нерезонансной ВЧ-предыонизации (ВЧ-разряд нерезонансного типа) .....	23
2.3 Гиротроны.....	24
2.4 Предыонизации на основе ультрафиолетового излучения.....	25
2.5 Электронная пушка и горячий катод.....	25
3 Исследование системы СВЧ-предыонизации на токамаке КТМ.....	27
3.1 Расчетные оценки параметров и элементов системы СВЧ-предыонизации ..	27
3.1.1 Расчет магнитного поля внутри камеры КТМ.....	27
3.1.2 Расчет электронно-циклотронного резонанса.....	28
3.1.3 Расчет номинальной мощности СВЧ излучения.....	29
3.1.4 Ввод СВЧ-излучения.....	32
3.1.5 Элементы волновода.....	34
3.1.6 Сборка и настройка магнетрона.....	35
3.2 Исследование параметров СВЧ-излучения в лабораторных условиях.....	39
3.2.1 Моделированию электронно-циклотронного резонанса.....	44
3.2.2 Исследование параметров СВЧ-излучения в условиях ЭЦР.....	47
3.3 Экспериментальное получение резонансной СВЧ-предыонизации на токамаке КТМ.....	53
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	61
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	62

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	62
4.1.2 SWOT-анализ .....	63
4.2 Планирование научно-исследовательских работ .....	66
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	66
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	67
4.3 Бюджет научно-технического исследования .....	71
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....	71
4.3.2 Специальное оборудование для научных работ .....	72
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	73
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	74
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	75
4.3.6 Накладные расходы.....	75
4.3.7 Расчет бюджетной стоимости .....	75
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	76
Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	79
5 Социальная ответственность .....	80
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	80
5.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	80
5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	82
5.2 Производственная безопасность.....	83
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов .....	83

5.2.2. Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя .....	85
5.2.3. Правила безопасности при работе с системой СВЧ-предионизации .....	86
5.3 Экологическая безопасность .....	87
5.4. Электробезопасность.....	89
5.5. Пожарная и взрывная безопасность.....	92
Выводы по разделу «Социальная ответственность» .....	95
Заключение .....	96
Список использованной литературы.....	98
Приложение А .....	101

## Введение

Источником энергии с неограниченным топливным ресурсом должен быть управляемый термоядерный синтез, проблемы которого решают многие лаборатории мира, включая лаборатории Казахстана. Такой источник, помимо неисчерпаемости ресурсов, будет минимально воздействовать на окружающую среду [1]. Перечислим некоторые потенциальные преимущества термоядерной энергетики:

- практическая неисчерпаемость ресурсов (запасов наиболее лимитирующего материала - лития - в земной коре хватит на тысячелетия, а в океане - на миллионы лет);
- значительно меньше активация конструкций, особенно выполненных из малоактивируемых материалов (V, Cr, Si, Al и другие);
- проще с ядерной безопасностью (количество топлива в плазме всего около 1 грамма);
- в blankets термоядерного реактора принципиально достижимы более высокие температуры, чем в реакторе деления, что может повысить к.п.д.;
- не возникает проблем с нераспространением ядерных материалов [2].

В настоящее время термоядерные установки типа «Токамак» с магнитным удержанием плазмы рассматриваются как основа для создания наиболее перспективных источников энергии.

Эксперименты на токамаках ведутся уже более 60 лет в различных лабораториях и научных центрах мира. Поскольку установка типа «Токамак» представляет собой сложную инженерную конструкцию, то для успешной работы этой установки требуется комплексное решение физических, технологических, инженерных задач. Опыт в решении таких задач, накопленный в результате полувековых исследований, позволил сформулировать основные принципы и

начать проектирование первого международного термоядерного экспериментального реактора - токамака ИТЭР.

Проект Международного экспериментального реактора - токамака ИТЭР является результатом этих широкомасштабных работ. ИТЭР станет первым большим шагом на пути практического использования энергии управляемого термоядерного синтеза. Основными проблемами термоядерных установок в настоящее время остаются стабильное удержание и нагрев плазмы, а также обеспечение чистоты плазмы. Для строящихся и проектируемых установок типа токамак требуются мощные системы дополнительного нагрева плазмы, такие как омический, высокочастотный и пучковый. Для нагрева плазмы используются такие технологии, основанные на источниках электромагнитного излучения – электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦР-нагрев) и ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦР-нагрев), а также нагрев пучком нейтральных атомов.

Сооружение токамака КТМ в Республике Казахстан является неотъемлемой частью широкой международной кооперации по созданию научно-технических основ термоядерной энергетики [1].

Одна из проблем, которую необходимо решить на начальной стадии разряда на токамаке КТМ – это ионизация газа и получение затравочных электронов в заданной области камеры. В мировой практике давно существует простой и надежный способ решения данной проблемы – это применение СВЧ-предионизации на частоте электронно-циклотронного резонанса. В качестве СВЧ-предионизации используют систему на основе мощных СВЧ-устройств, таких как магнетроны, клистроны, гиротроны и т.п.

Из литературных источников [3] известно, что при использовании СВЧ-предионизации на частоте электронно-циклотронного резонанса достигается ряд преимуществ по сравнению с омическим пробоем:

- Расширяется рабочая область давлений рабочего газа и величины рассеянных магнитных полей.
- Из-за резонансного характера ускорения частиц создаётся плазма с резко анизотропным распределением электронов по скоростям ( $V_{e\perp}^2 \gg V_{e\parallel}^2$ ). Поэтому нет необходимости в очень тщательной компенсации поперечных магнитных полей, которая требуется при пробое вихревым электрическим полем.
- Положение плазменного шнура с током контролируется местом выделения СВЧ мощности, что упрощает задачу управления положением плазмы на стадии пробоя.
- Уменьшается длительность пробоя и связанные с этим затраты магнитного потока.

**Объектом исследования** является резонансная система СВЧ-предионизации токамака КТМ.

**Предмет исследования** – технические параметры системы СВЧ-предионизации токамака КТМ.

**Целью исследования** разработка системы СВЧ-предионизации для токамака КТМ.

**Задачи исследования:**

- получение теоретических расчетов параметров и элементов системы СВЧ-предионизации для токамака КТМ;
- сборка и настройка магнетрона;
- исследование параметров СВЧ-излучения в лабораторных условиях;
- экспериментальное получение системы СВЧ-предионизации на токамаке КТМ.

**Актуальность работы** заключается в том, что для получения надежного пробоя на начальной фазе плазменного разряда на токамаке КТМ необходима система СВЧ-предионизации.

**Научная новизна** заключается в том, что система резонансной СВЧ-предионизации и экспериментальные данные по ее отработке будут обладать новизной.

**Практическая значимость работы:** разработана и апробирована система резонансной СВЧ-предионизации, которая обеспечит ионизацию и надежный «пробой» газа в заданной области камеры на токамаке КТМ. Приобретен уникальный опыт экспериментальных работ на высокотехнологичной научно-исследовательской установке, который будет использован в дальнейшем в исследованиях по физике плазмы токамака КТМ и в материаловедческих исследованиях на токамаке КТМ.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

система СВЧ-предионизации позволила сформировать затравочные электроны в заданной области вакуумной камеры токамака КТМ на начальной фазе плазменного разряда в среде аргона и достижение тока плазмы до 10 кА с длительностью разряда до 20 мс.

## 1 Казахстанский материаловедческий токамак КТМ

Казахстанский материаловедческий токамак КТМ представляет собой компактный токамак, в котором удачно сочетаются достоинства как низкоаспектных, так и классических токамаков.

Общий вид токамака КТМ представлен на рисунке 1. Аналогами данной установки являются действующие сферические токамаки NSTX, MAST (Великобритания), ГЛОБУС-М (Россия).



Рисунок 1 – Общий вид токамака КТМ

Казахстанский материаловедческий токамак построен в городе Курчатов Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан, создавался по Решению Президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаева в поддержку участия РК в качестве партнера России в программе ИТЭР (Международного экспериментального токамака - реактора), а также для развития в стране современной науки, и технологий, и подготовки высококвалифицированных научных, и инженерных кадров.

Цели токамака КТМ:

- проведение экспериментальных исследований и испытаний материалов и конструкторских решений защиты первой стенки, приемных диверторных пластин и узлов дивертора реактора - токамака;

- отработка методов снижения нагрузки на дивертор и различных способов тепло и энергоотвода от него;

- исследование влияний быстрой откачки диверторного объема и разработка методов предотвращения вне регламентного выхода внутрикамерных элементов из строя.

Вместе с материаловедческими работами на токамаке КТМ будет изучаться широкий круг плазмофизических задач, в числе которых:

- исследование процессов термоизоляции термоядерной плазмы в токамаках с аспектным отношением  $A=2$  и предельных ее параметров при мощном ВЧ-нагреве;

- исследование сценариев и механизмов эффективного ВЧ-нагрева и режимов не индукционного поддержания тока и другие [1,4,5].

Параметры токамака КТМ, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры токамака КТМ

Параметры	Значение
Большой радиус плазмы, R, см	90
Малый радиус плазмы, a, см	45
Аспектное отношение, A	2
Вытянутость сечения плазмы, k	1,7
Тороидальное магнитное поле на оси, $B_{то}$ , Тл	1
Ток плазмы, $I_p$ , кА	750
Длительность плато тока, $\Delta t_{пл}$ , с	до 5
Мощность дополнительного нагрева, вводимая в плазму, P, МВт	5
Расстояние от внешней поверхности экрана ВЧ-антенны до поверхности первой стенки камеры, см	6
Вытянутость камеры	2,7
Потоковая нагрузка на приемные диверторные пластины, МВт/м <sup>2</sup>	(2÷20)

### 1.1 Основные подсистемы токамака КТМ

Казахстанский материаловедческий токамак состоит из следующих основных частей и подсистем:

- вакуумной камеры из немагнитной нержавеющей стали толщиной (3÷5) мм, облицованной пластинами из графита для защиты первой стенки и снижения поступления примесей внутрикамерных элементов (диафрагм, пассивных витков стабилизации, магнитных зондов и другие), и обеспечивающей условия, необходимые для получения горячей плазмы;

- тороидальных магнитных катушек, служащих для создания продольного магнитного поля с индукцией 1 Тл;

- центрального соленоида - индуктора, создающего и поддерживающего вместе с системой ВЧ-нагрева ток в плазме (750 кА) в течение времени до 5 секунд;
- полоидальных магнитных обмоток, используемых как для поддержания равновесия плазмы в процессе разряда и управления формой шнура, так и тока в плазме;
- обмоток быстрого управления положением шнура и X-точки в камере;
- системы дополнительного ВЧ-нагрева плазмы (антенны и генераторы) с максимальной мощностью поглощаемой плазмой до 5 МВт, которая служит для увеличения температуры плазмы и мощности тепловых потоков в SOL и дивертор;
- диверторного устройства, воспринимающего потоки и плазмы из камеры, позволяющего изменять положение приемных пластин относительно X-точки, а также оперативно менять сами пластины;
- транспортно-шлюзового устройства, обеспечивающего без нарушения высокого вакуума в камере, съем и установку приемных диверторных пластин (различных конструкций и материалов);
- системы высоковакуумной откачки, газонапуска и пеллет-инфекции;
- системы прогрева, очистки и боронизации стенок камеры;
- системы технологических диагностик, позволяющих получать информацию о работе систем токамака;
- силовой опорно-поддерживающей конструкции;
- системы питания тороидальных катушек и полоидальных обмоток, обмоток равновесия, ВЧ-генераторов, систем газонапуска и пеллет-инжектора, диагностик и другое;
- инженерных подсистем, обеспечивающих работу токамака (вода, газоснабжение, электрическая сеть, местная вентиляция и другое);
- физических диагностик;
- информационно-измерительного комплекса;

- системы управления и защиты

Основные габаритные размеры токамака приведены в таблице 2 [1,5].

Таблица 2 – Габаритные размеры токамака КТМ

Параметры	Значение
Внешний диаметр установки, м	3,97
Диаметр основания подставки, м	4,81
Полная высота установки с подставкой, м	5,71
Высота подставки, м	2,03
Расстояние от основания подставки до центра экваториальных патрубков, м	3,6

## **2 Методы предионизации**

### **2.1 СВЧ-предионизация на основе ЭЦР**

Начальной фазой получения плазменного разряда на токамаке КТМ, как и на других токамаках, является омический пробой в вихревом электрическом поле. Он обеспечивается рядом условий в вакуумной камере токамака, включающих необходимые вакуум и давление рабочего газа, предионизацию, тороидальное электрическое поле, тороидальное магнитное поле и минимум рассеянных полоидальных магнитных полей (так называемое нуль-поле) в месте ожидаемого пробоя.

Из-за технических ограничений величины максимальной напряженности вихревого электрического поля в современных токамаках, предионизация используется в качестве обязательной части сценария разряда. Например, для ИТЭР напряженность вихревого электрического поля составляет около 0,3 В/м, что является недостаточной для самостоятельного пробоя газа. В качестве системы предионизации обычно используют сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) [6]. В условиях токамака КТМ может быть получена напряженность вихревого электрического поля 1-1,6 В/м, что является достаточным для самостоятельного пробоя газа. Тем не менее, применение предионизации позволяет снизить требуемое напряжение пробоя, что дает возможность эффективнее использовать запас потока центрального соленоида. Проведенные исследования [6,7,8] показали, что СВЧ-предионизация на основе ЭЦР существенно уменьшает требуемое для пробоя напряжение на обходе камеры и затраты потока центрального соленоида на начальной стадии разряда, а также расширяет интервал значений начальных давлений рабочего газа. При использовании данного вида предионизации подавляется процесс убегания

электронов. Резонансный сценарий пробоя позволяет использовать менее мощные, короткоимпульсные источники излучения, т.к. резонансные электроны набирают энергию в несколько кэВ за несколько десятков микросекунд при уровне вводимой мощности порядка нескольких киловатт, вследствие чего они способны эффективно и многократно ионизовать газ в токамаке. Однако имеется существенное ограничение на использование резонансной СВЧ-предионизации – это величина магнитного поля тороидальной катушки токамака. Необходимо учитывать факт, что СВЧ-предионизация создает не полностью ионизованную плазму [6]. Данный метод будет исследован на токамаке КТМ.

## **2.2 Система нерезонансной ВЧ-предионизации (ВЧ-разряд нерезонансного типа)**

Исследования по нерезонансной предионизации на основе ВЧ излучения (диапазон частот от 100 МГц до 1 ГГц – нижнегибридный диапазон) для получения пробоя на старте плазменного разряда показали свою возможность ионизации рабочего газа, как и при СВЧ-предионизации. ВЧ-предионизация обеспечивает снижение напряжения на обходе в момент старта разряда и на начальной стадии подъема тока, подавление явления убегания электронов, высокую проводимость полученной плазмы, равномерность заполнения камеры токамака плазмой, нерезонансный характер пробоя, а также возникновение генерации интенсивной группы высокоэнергичных ионов [9]. Главным достоинством метода является нерезонансный характер пробоя газа, который возможен в достаточно широкой области тороидальных магнитных полей и частот.

В случае использования нерезонансных частот требуются значительно более мощные источники с длительностью импульса в несколько миллисекунд. Следует отметить, что на действующих токамаках используется резонансная система

предионизации и только недавно начались исследования по нерезонансной системы предионизации для получения пробоя на старте плазменного разряда (работы на токамаке Глобус-М).

### 2.3 Гиротроны

Современные мощные гиротроны для термоядерных исследований генерируют излучение мощностью до 1 МВт с КПД 40–50% на частотах 30–170 ГГц в квазинепрерывных режимах с длительностями импульсов до тысячи секунд. Эти параметры достигаются за счет взаимодействия мощного потока электронов, движущегося по винтовым траекториям в сильном магнитном поле, с высокочастотными полями сверхразмерных цилиндрических резонаторов на частотах, близких к циклотронной частоте электронов. За счет высокой теплопроводности и очень малых диэлектрических потерь алмазные окна гиротронов способны пропускать СВЧ-излучение с мощностью более 1 МВт в непрерывном режиме [10].

Также существуют классические непрерывные гиротроны, которые работают на второй гармонике гирочастоты в соленоидах с масляным охлаждением. Мощность таких гиротронов составляет порядка 24-30 кВт, рабочая частота 24-30 ГГц, напряжение не превышает 25 кВ, ток катода равен 2,5 А. К их достоинствам следует отнести простоту, мобильность, малое время запуска. Недостатками являются ограничение по рабочей частоте и мощности, а также большие затраты мощности на создание магнитного поля в теплом соленоиде [10]. Максимальная величина магнитного поля в таком магните не превышает 0,7 Т. Поэтому данные гиротроны работают на второй гармонике циклотронной частоты.

## **2.4 Предионизации на основе ультрафиолетового излучения.**

Другим методом для предионизации является использование **ультрафиолетового излучения**. Достоинством этих устройств является: простота конструкции и невысокая стоимость. Существенные недостатки: для осуществления пробоя требуются более высокие напряжения; создают разряд только в небольших по размерам установках (маленькие токамаки), т.е. действуют в локальной области. Результаты проведенных экспериментов на токамаке GOLEM (Чехия) с использованием ультрафиолетовой лампы для предионизации показали свою неэффективность [11]. Т.к. маломощные ионизирующие источники создают ионизацию локально, то плотность образованного источником ионизованного потока может оказаться недостаточной для поддержания разряда в большом объеме.

## **2.5 Электронная пушка и горячий катод.**

Еще одним методом для предварительной ионизации является **электронная пушка (electron gun)**, которая по сравнению с ультрафиолетовым излучением оказалась более эффективной. Этот метод используется на токамаке ISTТОК (Португалия) и GOLEM (Чехия). Преимуществом этого метода является его простота и низкая стоимость изготовления. Принцип работы состоит в эмиссии электронов, которые впоследствии ускоряются электрическим полем. Основным недостатком является то, что требуется высокая напряженность электрического поля и низкое давление газа. Также само устройство устанавливается внутрь вакуумной камеры токамака, что может привести к нестабильности плазмы [12].

Горячий катод (hot cathode) является также источником электронов и используются в качестве предионизации. Принципиальное отличие горячего катода от электронной пушки состоит в том, что электроны не ускоряются за счет ускоряющего анода. Существует два типа горячего катода. В катоде с прямым нагревом нить накала (обычно вольфрам) является катодом и испускает электроны. В косвенно нагретом катоде нить нагревает отдельный металлический катодный электрод, который испускает электроны. Источник электронов с горячим катодом используется в таких токамаках как Alborz (Иран), TST-2 (Япония) и др. Стоит отметить, что данные токамаки являются небольшими по размерам установками [13,14,15]. Преимущества метода заключаются в простоте конструкции и низкой стоимости. Недостатком является установка горячего катода внутрь вакуумной камеры, что может привести к различным нарушениям плазмы, а также не распространенность данного метода предионизации. Стоит отметить, что электронная пушка и горячий катод для системы предионизации в основном рассчитаны на малые тороидальные магнитные поля и используются в не больших установках типа токамак.

## **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **Введение**

Основной целью данного раздела является оценка перспективности развития и планирования финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – исследования СВЧ-предионизации на токамаке КТМ, предназначенная для облегчения ионизации газа и получение затравочных электронов в заданной области вакуумной камеры. Благодаря данной системе будет приобретен уникальный опыт экспериментальных работ на высокотехнологичной научно-исследовательской установке, которая будет использована в дальнейшем в исследованиях по физике плазмы токамака КТМ и в материаловедческих исследованиях на токамаке КТМ. Научно-технической базы для проведения исследования стал филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК (институт атомной энергии

республиканского государственного предприятия Республики Казахстан, расположенный в г.Курчатов, а именно материаловедческий комплекс Токамака КТМ. С помощью исследовательского комплекса токамака КТМ будут решаться множественные инженерные и фундаментальные научные задачи.

#### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

##### **4.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие разработки:

- 1) Горячий катод
- 2) Электронная пушка

Детальный анализ необходим, т.к. каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Актуальность исследования	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Мощность	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
3. Простота конструкции	0,15	4	3	3	0,6	0,45	0,45
4. Простота изготовления	0,09	4	3	3	0,36	0,27	0,27
5. Эффективность работы	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
6. Безопасность	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Цена	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	5	4	0,4	0,4	0,32
4. Уровень проникновения на рынок.	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>45</b>	<b>42</b>	<b>39</b>	<b>4,53</b>	<b>4,08</b>	<b>3,82</b>

Расчет конкурентоспособности, определяется по формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i \quad (4)$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Согласно вышеприведенной таблице видно, что предлагаемая система (оборудование) имеет большую конкурентоспособность, чем ее аналоги. Это обуславливается более простой конструкции и эксплуатацией, высокую надежность и производительность, а самое главное экономическую составляющую по сравнению с другими конкурентными решениями.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации

проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>С1. Низкая цена оборудования.</p> <p>С2. Высокая эффективность оборудования.</p> <p>С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта.</p> <p>С4. Получение пробоя на начальной фазе плазменного разряда.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>Сл1. Риск выхода из строя оборудования.</p> <p>Сл2. Долгая подготовка оборудования при застое.</p> <p>Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Использование оборудования материаловедческого</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>Эффективность при проведении пусков, результатом которого</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>Использование новейшего оборудования для удовлетворения требований исследований,</p>

<p>комплекса токамака КТМ.</p>	<p>станет получение затравочных электронов в заданной области вакуумной камеры токамака КТМ на начальной фазе плазменного разряда и достижение тока плазмы.</p>	<p>также может уменьшить экспериментальную ошибку и предотвратить появление брака.</p>
<p><b>Угрозы</b> У1. Снижение стоимости разработок конкурентов. У2. Газификация вакуумной камеры при проведении экспериментов. У3. Недостаточная очистка вакуумной камеры тлеющим разрядом</p>	<p><b>Угрозы развития</b> У1С2. Несмотря на снижение стоимости исследования конкурентов, наши исследования имеют больше перспектив развития. У2С2. Наши продукты обладают лучшими механическими свойствами, являются более привлекательными мировом рынке.</p>	<p><b>Уязвимости:</b> Модернизация системы СВЧ-предионизации.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что преимущества НИР преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике

не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер 2 кат., научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер 2 кат.
	4	Выбор методов исследования	Инженер 2 кат.
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер 2 кат., научный руководитель
	6	Подготовка оборудования для эксперимента	Инженер 2 кат.

	7	Проведение эксперимента	Инженер 2 кат.
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер 2 кат.
	9	Обобщение и оформление полученных результатов	Инженер 2 кат. Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки. Оформление экономической, социальной и английской частей.	Инженер 2 кат.

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{min}i} + 2t_{\text{max}i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{min}i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожи}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ки.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где  $T_{кал}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{вых}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{пр}$  – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожг}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	1,8	3,4	2,6	4
3. Обзор научной литературы	-	6	-	10	-	7,6	7,6	11
4. Выбор методов исследования	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	4,8	7
6. Подготовка оборудования для эксперимента	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
7. Проведение эксперимента	-	15	-	20	-	17	17	25
8. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	12	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	5
10. Составление пояснительной записки		8		10	-	8,8	8,8	13
<b>Итого:</b>	7	59	15	84	10,2	69	68,5	102

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер 2 кат..

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.5)

Таблица 4.5 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	$T_{ki}$ · кал · дн.	Продолжительность работ																										
				февр			март			апр			май			июнь			июль			август			сентябр ь					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп 1	4	1																										
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп 1 Исп 2	4	1																										
3	Обзор научной литературы	Исп 2	11																											
4	Выбор методов исследования	Исп 2	6																											
5	Планирование эксперимента	Исп 1 Исп 2	7																											
6	Подготовка оборудования для эксперимента	Исп 2	9																											
7	Проведение эксперимента	Исп 2	25																											
8	Обработка полученных данных	Исп 2	18																											
9	Оценка правильности	Исп 1	5																											



Данная часть включает затраты всех материалов, используемых при исследовании СВЧ-предионизации.

Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	340	4	1 200
Картридж для лазерного принтера	3 490	1	3 490
Бумага формат А4	250	3	750
Диодная лампа	150	2	300
Водород Н <sub>2</sub> , 99,999%	24000	2	48000
Аргон Ar, 99,9998%	22500	2	45000
Итого:			98740

#### 4.3.2 Специальное оборудование для научных работ

В ходе выполнения НИР было приобретено дополнительное оборудование для проведения исследований. Общая сумма составила 44.6 тыс.руб. Все остальное использованное оборудование являлось собственностью Института атомной энергии.

При приобретении спецоборудования учтены затраты по его доставке и монтажу в размере 10% от его цены. Все расчеты по приобретению спецоборудования для исполнения НИР, приведены в таблице №5.

Таблица № 5 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Датчик СВЧ-мощности	2	20 700	41400
2	Рупорная антенна	1	3200	3200
<b>Итого:</b>				44 600

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата  $Z_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}. \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_m = Z_{мс} \cdot (1 + k_{пр} + k_o) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

– для инженера 2 кат.:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{np}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_o$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.7 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер 2 кат.
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.8 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{mc}$ , руб	$k_{np}$	$k_o$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{он}$ , руб	$T_p$ , раб.дн.	$Z_{осн}$ , руб
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	13,5	28988,6
Инженер 2 кат.	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	68,5	119402,4
Итого:								148391

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 28988,6 = 4348,3 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера 2 кат.:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 119402,4 = 17910,4 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где  $k_{дон}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,2 \cdot (28988,6 + 4348,3) = 6667,38 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,2 \cdot (119402,4 + 17910,4) = 27462,56 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 20% (СТ. 1, 166 НК РК).

### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр}, \quad (4.16)$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

### 4.3.7 Расчет бюджетной стоимости

Таблица 4.9 – Группировка затрат по статьям

1	2	2	3	4	5	6	7
Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Бюджетная стоимость
98740	44600	148391	22258,7	34129,94	348119,64	69623,928	417743,568

#### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{исп.}1} = \frac{417743,568}{600000} = 0,69;$$

$$I_{\text{исп.}2} = \frac{600000}{600000} = 1;$$

$$I_{\text{исп.}3} = \frac{527000}{600000} = 0,87;$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей ресурсоэффективности.

**Интегральный показатель ресурсоэффективности** вариантов выполнения НИР ( $I_{pi}$ ) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	0,15	4	4	3
2. Стабильность работы	0,2	4	4	4
3. Технические характеристики	0,2	5	5	3
4. Точность измерений	0,3	5	4	3
5. Ремонтнопригодность	0,15	5	4	5
ИТОГО	1	4,65	4,2	3,9

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,65$$

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 4,2$$

$$I_{p3} = 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 3,9$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}} \quad (20)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,9} = 5,1, \quad I_{исп.2} = \frac{4,2}{0,91} = 4,61, \quad I_{исп.3} = \frac{3,9}{0,91} = 4,28$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Сравнительная эффективность разработки

<b>№ п/п</b>	<b>Показатели</b>	<b>Текущий проект</b>	<b>Исп.2</b>	<b>Исп.3</b>
1	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,2	3,9
2	Интегральный показатель эффективности	5,1	4,61	4,28
3	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,81	0,78

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

## **Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими. Таким вариантом является результат проведенных исследований.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера 2 категории был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей.

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 417743,568 руб.

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы: значение интегрального показателя ресурсоэффективности научной разработки составляет: 0,69.

## **5 Социальная ответственность**

### **Введение**

Настоящая магистерская диссертация посвящена исследованию системы СВЧ-предионизации на токамаке КТМ. Исследования предполагают работу с источником СВЧ-излучения, с высоким напряжением и температурой. Объектом исследования является система СВЧ-предионизации предназначенная для получения пробоя на начальной фазе плазменного разряда на токамаке КТМ.

В экспериментальной части ВКР были проведены монтаж и настройка системы СВЧ-предионизации, проведены эксперименты с целью получения пробоя на начальной стадии плазменного разряда на токамаке КТМ в режиме омического нагрева с использованием рабочего газа водород.

Научно-технической базы для проведения исследований стал Филиал Института Атомной Энергии, Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

### **5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Весь рабочий персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала техник безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте

ответственным лицом (ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения).

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

К работе на системе СВЧ-предионизации допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы и имеющие не менее III группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – происходит 1 раз в квартал.

Проведение всех видов инструктажа оформляется в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании (ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты).

## 5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

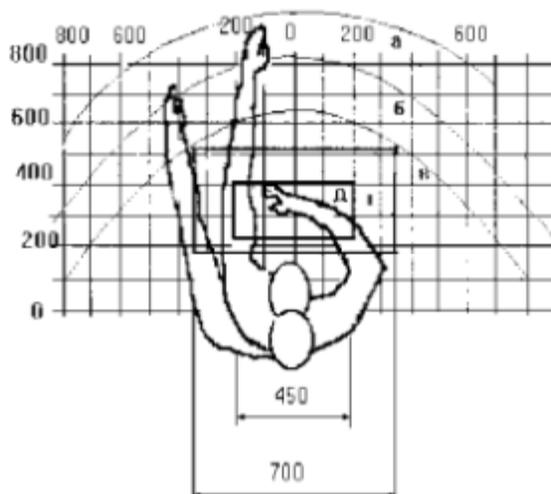


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно–поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов.

Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов**

Объектом исследования являются система СВЧ-преионизации, что представляет собой повышенный показатель электромагнитного излучения и опасность поражение электрическим током. Наиболее вероятные факторы воздействия представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Превышение уровня шума		+		ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [24].
2.Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [25].
3.Поражение электрическим током	+	+	+	ГОСТ 12.1.038–82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [26].
4. Пожаро и взрывоопасность		+	+	Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [27].

## **5.2.2. Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя**

В данном подразделе разрабатываются решения, обеспечивающие снижение влияния выявленных опасных и вредных факторов на работающих. Также предлагаются мероприятия, обеспечивающие безопасность технологического процесса и эксплуатации оборудования. Возможные опасные и вредные факторы указаны в табл.5.1.

### **1. Повышенный уровень шума.**

Шум – совокупность аperiodических звуков различной интенсивности и частоты. С физиологической точки зрения шум – это всякий неблагоприятный воспринимаемый звук. Шум ухудшает условия труда оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, компьютер, вентиляторы системы охлаждения. Уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях

вычислительных центров (ВЦ) может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы. Запрещается даже кратковременное пребывание человека в зонах, где уровень звука превышает 135 дБ в любой октавной полосе

## 2. Повышенный уровень воздействия электромагнитного излучения

Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может вызвать нарушение состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, болях в области сердца, изменениях кровяного давления и пульса. Основные средства защиты от ЭМИ – устройство экранов коллективного пользования (стационарные и переносные). Для ремонтного и дежурного персонала подстанций и воздушных линий электропередач предназначены индивидуальные экранизирующие комплекты. Они применяются при напряженности до 60 кВ/м, создаваемой электроустановками до 750 вольт.

2. Поражение электрическим током Мероприятия, обеспечивающие электробезопасность, описаны в разделе 5.4.

### **5.2.3. Правила безопасности при работе с системой СВЧ-предионизации**

Правила безопасности при работе с системой СВЧ-предионизации:

- к работе с системой СВЧ-предионизации допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр и не имеющие медицинских противопоказаний;
- производить работы с системой СВЧ-предионизацией разрешается персоналу, прошедшему специальную подготовку и проверку знаний по ПТЭ и ПТБ, прошедшему инструктаж по безопасности и охране труда при работе с системой СВЧ-предионизацией;

- оставлять рабочее место персоналу, участвующему в эксперименте, без разрешения руководителя (производителя) работ ЗАПРЕЩАЕТСЯ;
- эксплуатировать систему СВЧ-предионизации в режимах, не предусмотренных технической документацией, ЗАПРЕЩАЕТСЯ;
- укомплектовать помещение, в котором эксплуатируется система СВЧ-предионизации, основными и дополнительными средствами защиты;
- обеспечить персонал, участвующий в работах с системой предионизации, спецодеждой;
- не заглядывать в волновод при подачи высокого напряжения на магнетрон;
- не прикасаться к волноводу при подачи высокого напряжения на магнетрон;
- находиться не менее в 2-3-х (двух-трех) метрах от раструба волновода при подачи высокого напряжения на магнетрон;
- находиться в помещении персоналу, не участвующему в проведении работ с системой СВЧ-предионизации, ЗАПРЕЩАЕТСЯ;

### **5.3 Экологическая безопасность**

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Одной из составной части системы СВЧ-предионизации является магнетрон, который в свою очередь генерирует СВЧ-излучение. В данном разделе будет рассмотрен источник СВЧ-излучение – магнетрон.

Наиболее выраженным биологическим действием обладают поля СВЧ. Установлено, что сантиметровые и миллиметровые волны поглощаются кожей и, действуя на рецепторы, оказывают рефлекторное влияние на организм.

Дециметровые волны, проникая на глубину 10-15 см, могут непосредственно действовать на внутренние органы. Величина поля, создаваемого генераторами, характеризуется как напряженностью электрического поля, измеряемого в вольтах на метр (В/м), так и напряженностью магнитного поля – в амперах на метр (А/м). В качестве единицы измерения интенсивности облучения сантиметровых волн принята интенсивность, выраженная в величинах плотности потока мощности (величина энергии волн, падающей на 1 куб. см поверхности тела в секунду). Напряженность электромагнитных полей (ЭМП) в помещении зависит от мощности генератора, степени экранирования и наличия в помещении металлических покрытий и колеблется в широких пределах (10—500 Вт/кв. м), однако по мере удаления от источника падает.

В настоящее время доказано, что поглощенная организмом электрическая энергия может вызывать как термическое, так и специфическое биологическое действие. Интенсивность последнего нарастает с увеличением мощности и длительности действия ЭМП, причем выраженность реакции в основном находится в зависимости от диапазона радиочастот, а также от индивидуальных особенностей организма. Интенсивное облучение сначала вызывает тепловой эффект. Влияние микроволн большой интенсивности связано с выделением тепла в биообъекте, что приводит к нежелательным последствиям (нагрев органов и тканей, термическое поражение и т.п.). В то же время при ЭМП ниже допустимого определяется своеобразное специфическое (нетермическое) действие, выражающееся в явлении возбуждения в блуждающем нерве и синапсах. При воздействии токов высокой (ТВЧ) и сверхвысокой (СВЧ) частот отмечается накопление биологического эффекта, в результате чего возникают функциональные изменения нервной и сердечно-сосудистой систем, нарушения в организме под действием различных диапазонов. Воздействие радиоволн малой интенсивности имеют также неодинаковую направленность. Экспериментально установлены особая

чувствительность нервной системы, затем миокарда, наличие дистрофических изменений в семенниках и отставание в развитии животных.

Один из наиболее эффективных способов защиты от негативного воздействия электромагнитного излучения является применение специальных приборов, которые позволяют нейтрализовать данное излучение и максимально минимизировать его негативное воздействие на организм человека. Принцип действия данных приборов основан на наведении противо-ЭДС, которая способствует снижению негативного воздействия на организм человека нежелательных электромагнитных излучений.

Максимальное сокращение времени пребывания в зоне действия электромагнитного излучения является одним из наиболее эффективных способов защиты организма от негативного воздействия электромагнитного излучения. Особенно актуален данный вопрос для работников электроэнергетических предприятий, где уровень электромагнитного излучения максимальный [28].

#### **5.4. Электробезопасность**

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10 мА, постоянного – 50 мА, безопасное напряжение 12 В. В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли,

токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия. При работе на ПЭВМ существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям в время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Источником поражения электрическим током могут быть незащищенные и неизолированные электропровода, поврежденные электродвигатели, открытые коммутаторы, не заземленное оборудование и др. Проходя через живые ткани, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействия. Это приводит к различным нарушениям в организме, вызывая как местное поражение тканей и органов, так и общее поражение организма. Самый опасный – переменный ток частотой 50-60 Гц.

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения 95 электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;

- изолирующие устройства и покрытия;

- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;

- устройства дистанционного управления;

- предохранительные устройства и др.

Для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

- защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования  $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$ ;

- раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;

- ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;

- полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;

- отключение всех источников питания установки общим рубильником.

При поражении работника электрическим током необходимо:

1. Освободить пострадавшего от действия электрического тока и оценить состояние пострадавшего;

2. Вызвать скорую медицинскую помощь или врача, либо принять меры для транспортировки пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение;

3. Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под действием тока, ему до

прибытия врача необходимо обеспечить полный покой и в дальнейшем медицинское наблюдение в течение 2-3 часов;

4. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимся дыханием, его следует ровно и удобно положить, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой, дать понюхать нашатырный спирт. Если пострадавший плохо дышит, необходимо сделать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца;

5. При отсутствии признаков жизни (отсутствие дыхания, пульса, реакции зрачка на свет) нельзя считать пострадавшего мертвым. Ему должна быть оказана первая медицинская помощь в виде искусственного дыхания и непрямой массаж сердца. Искусственное дыхание и непрямой массаж сердца следует делать непрерывно до прибытия врача;

6. Переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно.

### **5.5. Пожарная и взрывная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов. Помещение, в котором выполняется данная работа, по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В-4 (пожароопасное), т.е. включает в себя трудногорючие и горючие жидкости и твердые вещества, а также материалы (включая волокна и пыли),

обычные вещества и материалы, которые при смешивании в естественных условиях только горят. Возможные причины загорания:

- курение в не установленных местах;
- неисправность электроприборов;
- применение некалиброванных предохранителей;
- применение электропроводки с нарушенной изоляцией;
- разведение открытого огня вблизи строений;
- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- нарушение правил хранения огнеопасных веществ, материалов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т. п.

В здании имеются средства по тушению: противопожарные краны, огнетушители (углекислотные и порошковые, предназначенные для тушения электроустановок) и ящики с песком.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации. К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при

устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся: установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при работе с системой СВЧ-предионизации, проведен анализ вредных и опасных производственных факторов. Полученные результаты раздела «Социальная ответственность» содержат в себе основные рекомендации и указания, которые следует выполнять при разработке, изготовлении и исследовании системы СВЧ-предионизации.

## Заключение

В ходе работ по исследованию СВЧ-предионизации проведены и достигнуты следующие результаты:

1. Получены расчетные оценки необходимые для работы системы предионизации на токамаке КТМ: магнитные поля, частота электронно-циклотронного резонанса и номинальная мощность СВЧ-излучения.

2. Выбраны элементы системы резонансной СВЧ-предионизации: источник мощного СВЧ-излучения – импульсный магнетрон МИ-99А (частота излучения 9,6 ГГц, мощность импульсного излучения до 270 кВт) и алюминиевый прямоугольный волновод WR-112 (внутреннее сечение 28.5 x 12.6 мм, частотный диапазон пропускания СВЧ-излучения от 7 ГГц до 10 ГГц) для передачи электромагнитной волны от магнетрона в камеру токамака КТМ.

3. Проведено подключение и настройка магнетрона к высоковольтному источнику питания с получением СВЧ-излучения: достигнуты режимы генерации магнетрона длительностью до 1.4 мс, импульсная мощность СВЧ-излучения полученная расчетным путем составляет 62660 Вт (при максимальном КПД магнетрона 40 %).

4. Проведены экспериментальные работы по получению СВЧ-излучения в лабораторных условиях с контролем и получением параметров СВЧ-излучения. С помощью СВЧ-детектора Д5А-20 была измерена мощность СВЧ-излучения, которая составила 25 кВт, что хорошо согласуется с полученными данными по анодному току и напряжению магнетрона.

5. Проведен эксперимент по определению частоты излучения магнетрона путем создания условия ЭЦР. Эксперимент показал, что СВЧ-излучение магнетрона соответствует заявленным паспортным значениям – около 9,0 ГГц, а

также, что СВЧ-излучение длительностью 140 мкс и мощностью 25 кВт достаточно для выполнения условия ионизации остаточного газа при уровне вакуума  $10^{-1}$  торр.

б. Проведены экспериментальные работы по исследованию параметров СВЧ-излучения в условиях ЭЦР, а также фиксация свечения внутри соленоида с помощью оптоэлектронного датчика Hamamatsu. Полученные данные показали, что свечение внутри соленоида возникает при высоком вакууме от  $10^{-4}$  торр до  $10^{-5}$  торр и при достаточной мощности СВЧ-излучения. Также в ходе эксперимента выяснилось, что длительность свечения зависит не только от мощности СВЧ-излучения, но и от скорости рекомбинации.

Резонансная система предионизации показала свою эффективность и работоспособность при проведении экспериментов в среде аргона, результатом которого стало получение затравочных электронов в заданной области вакуумной камеры токамака КТМ на начальной фазе плазменного разряда и достижение тока плазмы до 10 кА и длительностью разряда до 20 мс. Проводимые контрольные разряды без системы предионизации не только не достигают пробойной конфигурации, но и не могут достичь возбуждения и ионизации рабочего газа (аргона), на что указывает диагностическое оборудование токамака КТМ – нет свечения газа по быстрой видеокамере и фотодетекторам, и как следствие отсутствует ток плазмы.

Результат исследования системы СВЧ-предионизации с применением в среде водорода показал, что параметры пробойной конфигурации не достигаются, и отсутствует ионизация рабочего газа, на что показывает диагностическое оборудование токамака КТМ. Это объясняется тем, что для достижения пробойных конфигураций для ионизации водорода требуется вложить существенно большую мощность СВЧ-излучения и высокую частоту. Дальнейшие исследования будут посвящены доработке и модернизации системы СВЧ-предионизации.

## Список использованной литературы

1. Азизов Э.А., Велихов Е.П., Тажибаева И.Л., Школьник В.С., Минеев А.Б., Филатов О.Г., Пивоваров О.С., Тухватулин Ш.Т., Шестаков В.П. - Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза, Алматы 2006 г.;
2. Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б. - Физико-технические основы УТС. Курс лекций, 2006 г.;
3. В.А.Беляков, А.А.Кавин, С.А.Лепихов, А.Б.Минеев, А.Д.Овсянников. ТОКАМАК: начальная стадия разряда. СПб.: Издательство «Лань», 2014.
4. Официальный сайт НЯЦ - URL: <http://www.nnc.kz>;
5. Кирнева Н.А. Современные исследования на установках «Токамак». – М.: МИФИ, 2008. – 188 стр.;
6. В.В. Дьяченко, М.М. Ларионов, С.И. Лашкул, Л.С. Левин. Бестоковый разряд в нижнегибридном диапазоне частот и его применение для предыонизации в токамаке. ВАНТ, Термояд. синтез. вып. 4, 1989.
7. Д.Г. Булыгинский, М.М. Ларионов, Л.С. Левин, О.В. Миклухо, А.И. Токунов, Н.В. Шустова. О влиянии способа предыонизации на режим разряда в токамаке. Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Ленинград, 1979.
8. Н.А. Кирнева Современные исследования на установках «Токамак». Учебное пособие. Москва 2008. Стр.151-152.
9. Хитров С.А. Методика создания плазмы и старта тока с помощью высокочастотной мощности нижнегибридного диапазона частот 900 МГц. Санкт-Петербург 2014.
10. Официальный сайт Гиком: <http://www.gycom.ru/products/pr7.html>
11. Веб-сайт: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2013>  
<http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2013>  
[2014/MartZak/index](http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2013)

12. Веб-сайт: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2014-2015/MatCveng/index>
13. Takase, Y., Ejiri, A., Ono, Y., Yamada, «Study of Wave Physics in High Beta Plasmas». National institute for fusion science, pag. 215, 2010.
14. R. Amrollahi, M. Ghasemi<sup>1</sup>, H. Sadeghi, D. Iraj, «Alborz tokamak system engineering and design». Fusion Engineering and Design, vol 141, pag. 91-100 2019.
15. S. Shahshenas, A. Mazandarani, R. Amrollahi, D. Iraj, «Alborz Tokamak Plasma Parameters Measurement at Pre-Ionization Stage by Double Longmuir Probes», 2015.
16. M. Gryaznevich, V. Shevchenko and A. Sykes. Plasma formation in START and MAST spherical tokamaks. NUCLEAR FUSION 46 (S573–S583). Received 16 December 2005, accepted for publication 7 June 2006 Published 17 July 2006. Online at [stacks.iop.org/NF/46/S573](http://stacks.iop.org/NF/46/S573).
17. Y.S. Bae, J.H. Jeong<sup>1</sup>, S.I. Park<sup>1</sup>, M. Joung, J.H. Kim, S.H. Hahn, S.W. Yoon, H.L. Yang, W.C. Kim, Y.K. Oh, A.C. England, W. Namkung<sup>1</sup>, M.H. Cho<sup>1</sup>, G.L. Jackson<sup>2</sup>, J.S. Bak and the KSTAR team. ECH pre-ionization and assisted startup in the fully superconducting KSTAR tokamak using second harmonic. NUCLEAR FUSION 49 022001 (5pp). Received 13 August 2008, accepted for publication 27 November 2008 Published 19 December 2008. Online at [stacks.iop.org/NF/49/022001](http://stacks.iop.org/NF/49/022001).
18. Панин И.С., Панченко Л.В. Импульсные магнетроны. Москва: Издательство Советское радио, 1966 г.
19. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд.2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006 – с. 35-41.
20. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. Москва: СОЛОН-пресс, 2003 – с. 8-15.
21. Расчет индуктивностей: справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин.– Л.: Энергоатомиздат, 1986.

22. Plasma formation in START and MAST spherical tokamaks / M. Gryaznevich, V. Shevchenko, A. Sykes // NUCLEAR FUSION 46 (S573–S583); Received 16 December 2005, accepted for publication 7 June 2006, Published 17 July 2006.– Online at [stacks.iop.org/NF/46/S573](http://stacks.iop.org/NF/46/S573).
23. Кислов А.Я., Лысенко С.Е., Ноткин Г.Е. Использование мощных гиротронов на токамаке T-10 // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 789–796.
24. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (с изменениями на 21 июня 2016 года).
26. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
27. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Инструкция по охране труда при хранении и эксплуатации газовых баллонов [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/120003924>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.05.2019).
28. Профессиональные болезни: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений, обучающихся по специальности 033300 «Безопасность жизнедеятельности» / авт.-сост. Т. Я. Биндюк, О. В. Бессчетнова. – Балашов: Николаев, 2007. – 128 с.

**Приложение А**  
(обязательное)

**Kazakhstan Materials Science Tokamak KTM**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Кусаинов Ануар Толеугалиевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	к.т.н, доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Утятина Янина Викторовна			

## Contents

1 Kazakhstan Materials Science Tokamak KTM .....	104
1.1 Main Subsystems of the KTM Tokamak .....	106
2. Preionization Methods.....	108
2.1 Microwave Pre-ionization.....	108
2.2 Non-resonant RF pre-ionization system (RF discharge of non-resonant type). 109	
2.3 Gyrotrons.....	109
2.4 Preionization on the Basis of the Ultraviolet Radiation.....	110
2.5 Electron Gun and Hot Cathode .....	110
References .....	112

## 1 Kazakhstan Materials Science Tokamak KTM

Kazakhstan materials science tokamak KTM is a compact tokamak that successfully combines the advantages of both low-aspect and classic tokamaks.

The General view of the KTM and its design are shown in Figure 1. analogs of this installation are operating spherical tokamaks NSTX, MAST (Great Britain), GLOBUS-M (Russia).



Figure 1 – General view of the KTM tokamak

Objective of the KTM Tokamak:

- carrying out experimental research and testing of materials and design solutions for the protection of the first wall, receiving divertor plates and units of the reactor diverter - tokamak;
- development of methods to reduce the load on the divertor and various methods of heat and energy removal from it;

- study of the effects of rapid pumping of the divertor volume and the development of methods to prevent the out-of-order failure of intra-chamber elements.

Along with material science work at the KTM tokamak, a wide range of plasma physics problems will be studied, including:

- investigation of the processes of thermal insulation of thermonuclear plasma in tokamaks with an aspect ratio of  $A = 2$  and its limiting parameters with powerful HF heating;

- research of scenarios and mechanisms of effective HF heating and modes of non-induction current maintenance and others [1,4,5].

The parameters of the KTM tokamak are given in Table 1.

Table 1 - Parameters of the KTM tokamak

Parameters	Value
Major plasma radius, R, m	0.9
Minor plasma radius, a, cm	0.45
Aspect Ratio, A	2
Vertical plasma elongation, k	1.7
Toroidal magnetic field, $B_{to}$ , Tл	1
Plasma current, $I_p$ , kA	750
Duration of the current plateau, $\Delta t_{pl}$ , sec	to 5
Additional heating power introduced into the plasma, P, MW	5
Distance from the outer surface of the RF antenna shield to the surface of the first chamber wall, cm	6
Chamber elongation	2.7
Flow load on the receiving divertor plates, MW/m <sup>2</sup>	(2÷20)

## 1.1 Main Subsystems of the KTM Tokamak

Kazakhstani materials science tokamak consists of the following main parts and subsystems:

- a vacuum chamber made of non-magnetic stainless steel with a thickness of (3 ÷ 5) mm, lined with graphite plates to protect the first wall and reduce the intake of impurities from intra-chamber elements (diaphragms, passive stabilization coils, magnetic probes, etc.), and providing the conditions necessary for obtaining hot plasma;
- toroidal magnetic coils serving to create a longitudinal magnetic field with an induction of 1 T;
- a central solenoid - an inductor that creates and maintains, together with the HF heating system, a current in the plasma (750 kA) for up to 5 seconds;
- poloidal magnetic windings used both to maintain the equilibrium of the plasma during the discharge and control the shape of the cord, and the current in the plasma;
- windings for quick control of the position of the cord and X-point in the chamber;
- systems for additional HF plasma heating (antennas and generators) with a maximum power absorbed by the plasma up to 5 MW, which serves to increase the plasma temperature and the power of heat fluxes in the SOL and divertor;
- a divertor device that senses flows and plasma from the chamber, which makes it possible to change the position of the receiving plates relative to the X-point, as well as to quickly change the plates themselves;
- a transport and sluice device that ensures, without breaking the high vacuum in the chamber, the removal and installation of receiving divertor plates (of various designs and materials);
- systems of high-vacuum pumping, gas filling and pellet-infection;

- systems for heating, cleaning and boronization of the chamber walls;
- systems of technological diagnostics that allow obtaining information about the operation of tokamak systems;
- power supporting structure;
- power supply systems for toroidal coils and poloidal windings, balance windings, HF generators, gas injection systems and pellet injectors, diagnostics, and more;
- engineering subsystems that ensure the operation of the tokamak (water, gas supply, electrical network, local ventilation, etc.);
- physical diagnostics;
- information and measuring complex;
- control and protection systems

The main overall dimensions of the tokamak are shown in Table 2 [1,5].

Table 2 - Overall dimensions

Parametrs	Value
Installation outer diameter, m	3.97
Stand base diameter, m	4.81
Full installation height with stand, m	5.71
Stand height, m	2.03
Distance from the base of the stand to the center of the equatorial branch pipes, m	3.6

## 2 Preionization Methods

### 2.1 Microwave Pre-ionization

Due to technical limitations of the maximum vortex electric field strength in modern tokamaks, pre-ionization is used as a mandatory part of the discharge scenario. For example, for ITER, the vortex electric field strength is about 0.3 V/m, which is insufficient for independent gas breakdown. As a preionization system, ultrahigh-frequency (microwave) radiation is usually used under conditions of electronic cyclotron resonance (ECR) [6]. Under the conditions of a KTM tokamak, a vortex electric field strength of 1-1.6 V/m can be obtained, which is sufficient for independent gas breakdown. However, the use of pre-ionization reduces the required breakdown voltage, which makes it possible to use the flow reserve of the Central solenoid more efficiently. Studies [6,7,8] have shown that microwave preionization based on ECR significantly reduces the required breakdown voltage at the chamber bypass and the flow costs of the Central solenoid at the initial stage of discharge, and also extends the range of values of the initial working gas pressures. When using this type of preionization, the process of electron escape is suppressed. The resonant breakdown scenario allows the use of less powerful, short-pulse radiation sources, since resonant electrons gain energy of several Kev in a few tens of microseconds at an input power level of the order of several kilowatts, as a result of which they are able to effectively and repeatedly ionize the gas in a tokamak. However, there is a significant limitation on the use of resonant microwave preionization-this is the magnitude of the magnetic field of the toroidal tokamak coil. It is necessary to take into account the fact that microwave preionization does not create a fully ionized plasma [6]. This method will be tested on the KTM tokamak.

## 2.2 Non-resonant RF pre-ionization system (RF discharge of non-resonant type)

Studies on non – resonant preionization based on RF radiation (frequency range from 100 MHz to 1 GHz-lower hybrid range) for obtaining a breakdown at the start of a plasma discharge have shown that it is possible to ionize the working gas, as in the case of microwave preionization. RF pre-ionization reduces the bypass voltage at the start of the discharge and at the initial stage of current rise, suppresses the phenomenon of electron escape, high conductivity of the resulting plasma, uniform filling of the tokamak chamber with plasma, non-resonant nature of the breakdown, and the generation of an intense group of high-energy ions [9]. The main advantage of the method is the non-resonant nature of gas breakdown, which is possible in a fairly wide range of toroidal magnetic fields and frequencies.

When using non-resonant frequencies, significantly more powerful sources with a pulse duration of several milliseconds are required. It should be noted that the current tokamaks use a resonant pre-ionization system and only recently began research on a non-resonant pre-ionization system to obtain a breakdown at the start of a plasma discharge (work on the Globus-M tokamak).

## 2.3 Gyrotrons

Modern high-power gyrotrons for thermonuclear research generate radiation with a power of up to 1 MW with an efficiency of 40-50% at frequencies of 30-170 GHz in quasi-continuous modes with pulse durations of up to a thousand seconds. These parameters are achieved due to the interaction of a powerful flow of electrons moving along helical trajectories in a strong magnetic field with high-frequency fields of super-sized cylindrical resonators at frequencies close to the cyclotron frequency of electrons. Due to the high thermal conductivity and very low dielectric losses, diamond Windows

of gyrotrons are able to transmit microwave radiation with a power of more than 1 MW in a continuous mode [10].

There are also classical continuous gyrotrons that operate on the second harmonic of the gyro frequency in oil-cooled solenoids. The power of such gyrotrons is about 24-30 kW, the operating frequency is 24-30 GHz, the voltage does not exceed 25 kV, the cathode current is 2.5 A. Their advantages include simplicity, mobility, and short start-up time. The disadvantages are the limitation on the operating frequency and power, as well as the high power consumption for creating a magnetic field in a warm solenoid [10]. The maximum value of the magnetic field in such a magnet does not exceed 0.7 T. Therefore, these gyrotrons operate at the second harmonic of the cyclotron frequency.

#### 2.4 Preionization on the Basis of the Ultraviolet Radiation

Another method for preionization is the use of ultraviolet radiation. The advantage of these devices is their simplicity of design and low cost. Significant disadvantages: higher voltages are required for breakdown; they create a discharge only in small installations (small tokamaks), i.e. they operate in the local area. The results of experiments performed on the GOLEM tokamak (Czech Republic) using an ultraviolet lamp for preionization showed their inefficiency [11]. low-power ionizing sources create ionization locally, so the density of the ionized stream formed by the source may not be sufficient to maintain the discharge in a large volume.

#### 2.5 Electron Gun and Hot Cathode

Another method for pre-ionization is the electron gun, which is more effective than ultraviolet radiation. This method is used on the ISTTOK tokamak (Portugal) and GOLEM (Czech Republic). The advantage of this method is its simplicity and low

manufacturing cost. The principle of operation consists in the emission of electrons, which are subsequently accelerated by an electric field. The main disadvantage is that it requires a high electric field strength and low gas pressure. The device itself is also installed inside the tokamak vacuum chamber, which can lead to plasma instability [12].

Hot cathode (hot cathode) it is also a source of electrons and is used as a preionization. The principal difference between a hot cathode and an electron gun is that the electrons are not accelerated by an accelerating anode. There are two types of hot cathode. In a direct-heated cathode, the filament (usually tungsten) is the cathode and emits electrons. In an indirectly heated cathode, the filament heats a separate metal cathode electrode that emits electrons. A hot-cathode electron source is used in tokamaks such as Alborz (Iran), TST-2 (Japan), and others. It is worth noting that these tokamaks are small installations [13,14,15]. The advantages of this method are simple design and low cost. The disadvantage is the installation of a hot cathode inside the vacuum chamber, which can lead to various plasma disturbances, as well as the non-proliferation of this method of preionization. It is worth noting that the electron gun and hot cathode for the preionization system are mainly designed for small toroidal magnetic fields and are used in small tokamak installations.

## References

1. Azizov E.A., Velikhov E.P., Tazhibaeva I.L., Shkolnik V.S., Mineev A.B., Filatov O.G., Pivovarov O.S., Tukhvatulin Sh.T., V.P. Shestakov - Kazakhstan materials science tokamak KTM and issues of controlled thermonuclear fusion, Almaty 2006;
4. Official website of the NNC - URL: <http://www.nnc.kz>;
5. Kirneva N.A. Modern research at the "Tokamak" installations. - M.:MEPhI, 2008 .- 188 pages;
6. V.V. Dyachenko, M.M. Larionov, S.I. Lashkul, L.S. Levin. Current-free discharge in the lower hybrid frequency range and its application for preionization in a tokamak. VANT, Fusion. synthesis. no. 4, 1989.
7. D.G. Bulyginsky, M.M. Larionov, L.S. Levin, O. V. Miklukho, A.I. Tokunov, N.V. Shustov. On the influence of the preionization method on the discharge regime in the tokamak. Preprint of the P.I. A.F. Ioffe, Leningrad, 1979.
8. N.A. Kirneva Modern research at the "Tokamak" installations. Tutorial. Moscow 2008. pp. 151-152.
9. Khitrov S.A. Technique for creating plasma and starting current using high-frequency power in the lower hybrid frequency range of 900 MHz. St. Petersburg 2014.
10. The official website of Geekom: <http://www.gycom.ru/products/pr7.html>
11. Website: [http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2013 2014 /](http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2013%202014/) MartZak / index
12. Website: <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/FTTF/2014-2015/MatCveng/index>