

Статус работ по проекту 1.1.5.

«СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ДЛЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ И
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УСТАНОВОК
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И
ГЕНЕРАЦИИ ТОКА ПУТЕМ ИНЖЕКЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ВКЛЮЧАЯ ГЕЛИКОНЫ»

Авторы доклада

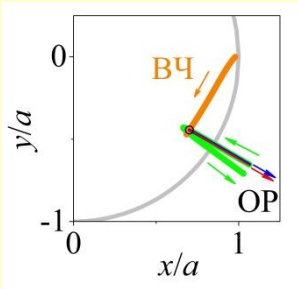
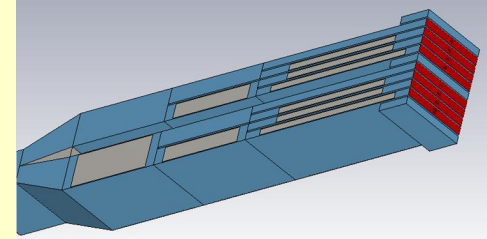
А.Д. Гурченко

В.В. Дьяченко

Докладчик

А.Н. Коновалов

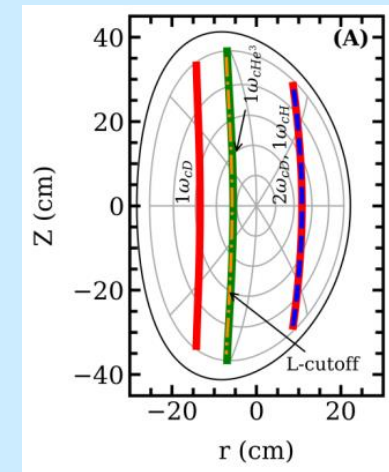
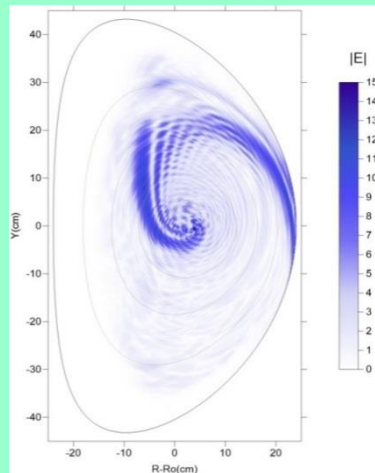
1. Разработка и изготовление **экспериментального образца модуля антенны на связанных волноводах (Multijunction Antenna)**, для генерации тока на мощность не менее 400 кВт. Для испытания антенны будет создан **макет системы СВЧ генерации тока** на частоте **2.45 ГГц** с полной мощностью не менее 400 кВт.



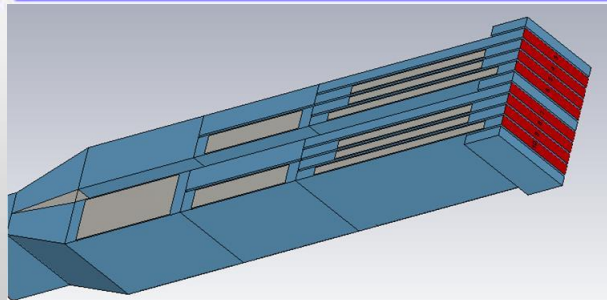
2. Разработка **диагностики СВЧ обратного рассеяния для мониторинга параметров волн промежуточного частотного диапазона**, использующихся для нагрева и генерации тока в плазме токамака с тестированием на ФТ-2.

3. Создание проекта **экспериментального образца модуля системы СВЧ нагрева плазмы и генерации тока** в сферическом токамаке Глобус-М2 с помощью геликонов на частоту не менее 100 МГц и мощностью 200 кВт.

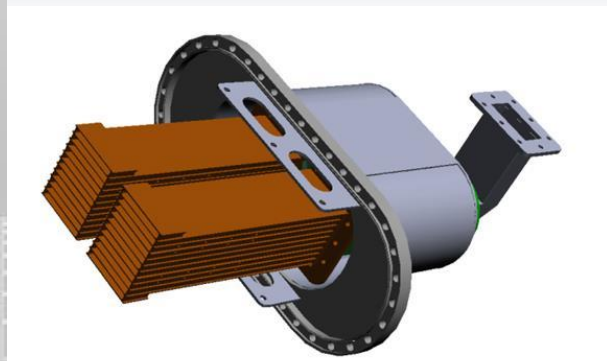
4. Разработка **нового сценария ионного циклотронного нагрева (ИЦН)**, экспериментальная апробация которого будет проведена на сферическом токамаке.



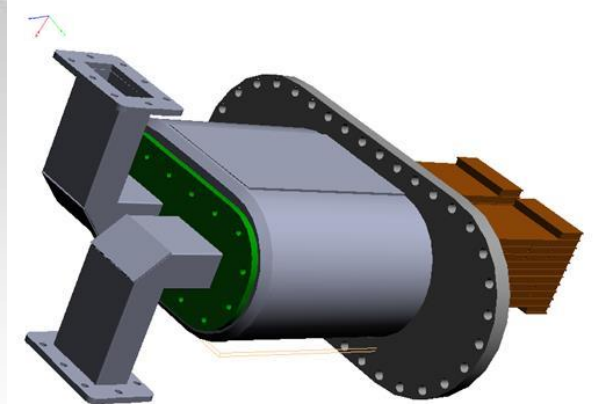
1. Экспериментальные модули МЖ-антенны и системы СВЧ генерации тока на частоте 2.45 ГГц с мощностью 400 кВт (Производство компонентов по подготовленным проектам)



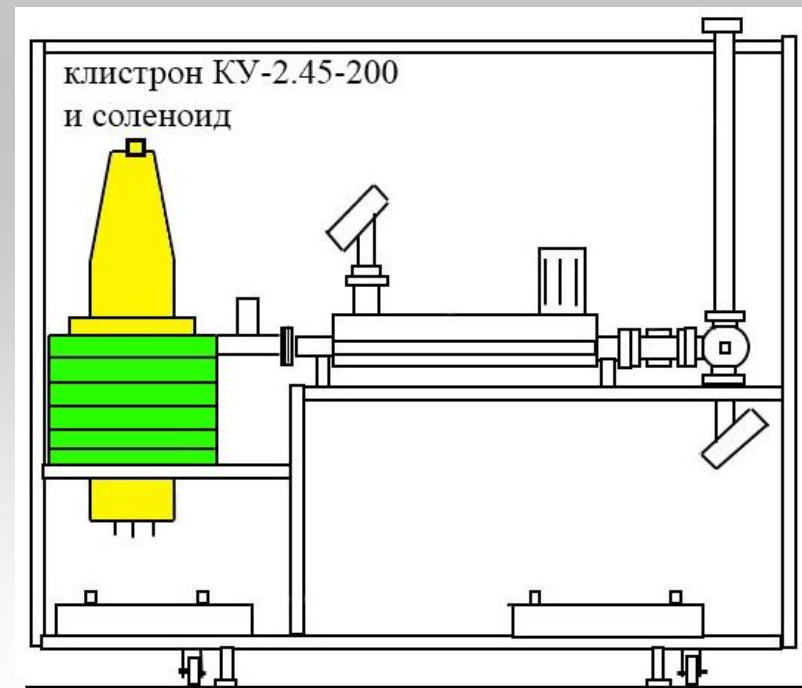
Разработана предварительная КД. Изготовлен макет модуля МЖ-антенны для проверки электрических характеристик. По договору с ООО «ПФ «ТРАВЕРС» проведена верификация электродинамической модели антенны и адаптация КД к условиям производства, ведется изготовление двух-антенного модуля для установки на токамак Глобус-М2.



Разработан проект модуля системы СВЧ генерации тока.



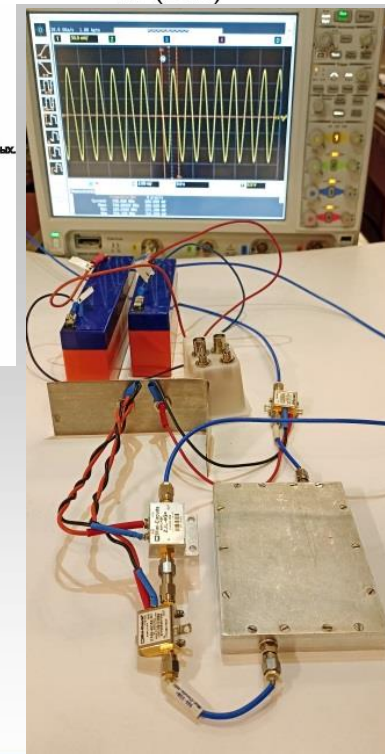
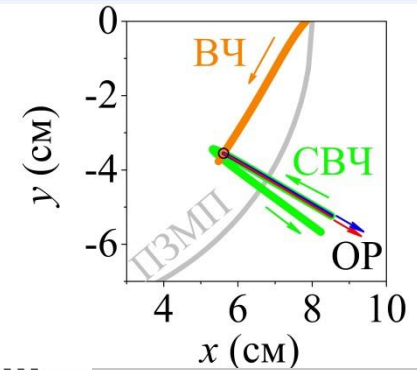
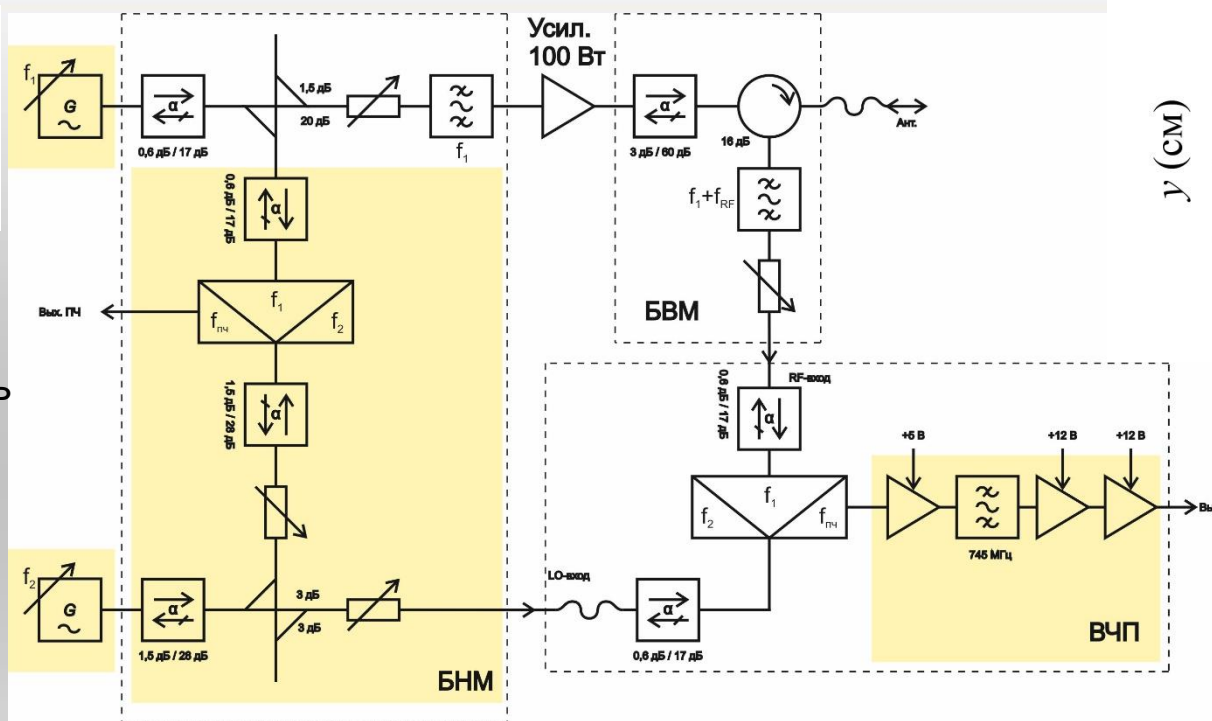
Проводится сборка монтажного шкафа для установки клистрона КУ-2.45-200, фокусирующего соленоида, ЗГ и усилителя (изготавливаются АО «НПП «ИСТОК» им. А.И. Шокина»), ферритового вентиля (АО «НИИ «Феррит-Домен») и прочих элементов.



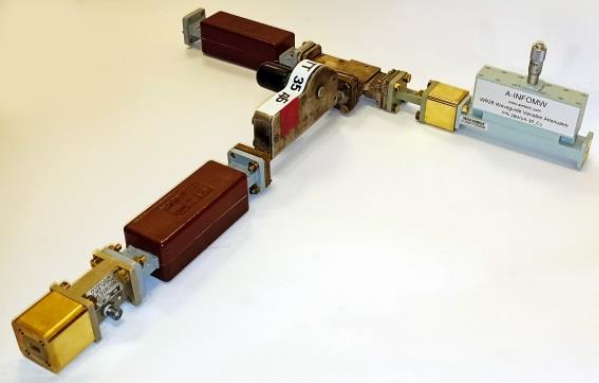
2. Диагностика СВЧ обратного рассеяния (ОР) для мониторинга параметров ВЧ волн (Разработка схемы, начало сборки)



Изготовлены: гетеродинный распределитель БНМ, блок усиления и фильтрации ВЧП, получен зондирующий генератор.



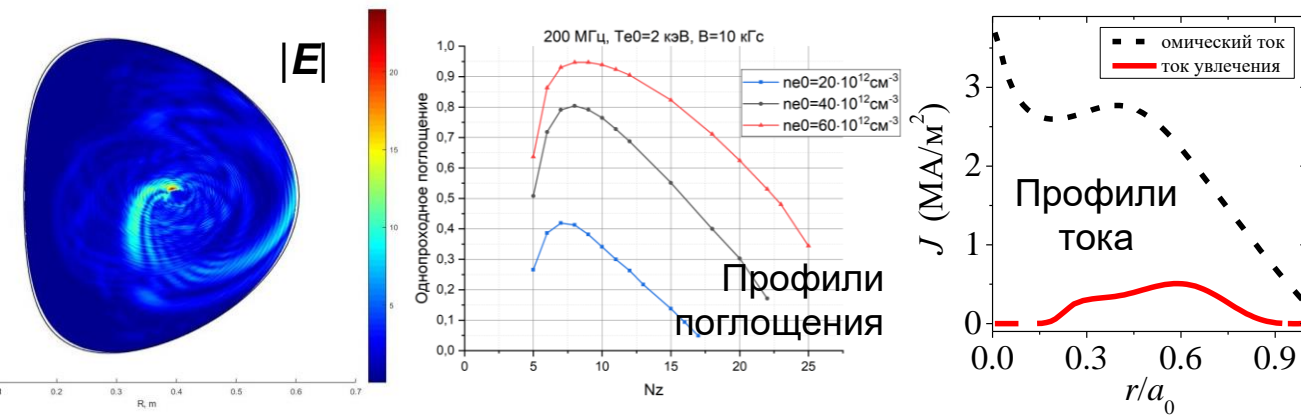
В соответствии с разработанными ТЗ ожидается поставка: широкополосного усилителя мощности (до 100 Вт), ряда СВЧ элементов, экранирующего бокса для ВЧП. На следующем этапе будут собраны: БНМ, БВМ и ВЧП.



3. Экспериментальный образец модуля системы СВЧ нагрева плазмы и генерации тока в Глобус-М2 с помощью геликонов (Расчеты поглощения и тока, разработка проекта модуля системы)

По сравнению с крупными токамаками традиционной геометрии, Глобус-М2 обладает меньшим магнитным полем и электронной температурой, а также большой вариацией продольного волнового числа геликона при распространении в токамаке. Проведены вариативные расчёты однопроходного

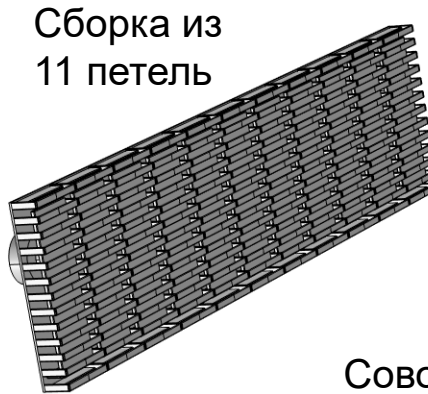
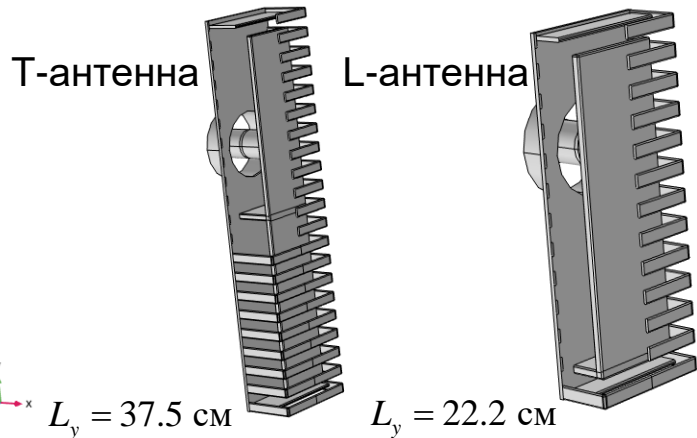
поглощения геликона с помощью полноволновых расчетов, а также генерации тока геликоном на основе методов лучевых траекторий и численного решения одномерного уравнения Фоккера-Планка.



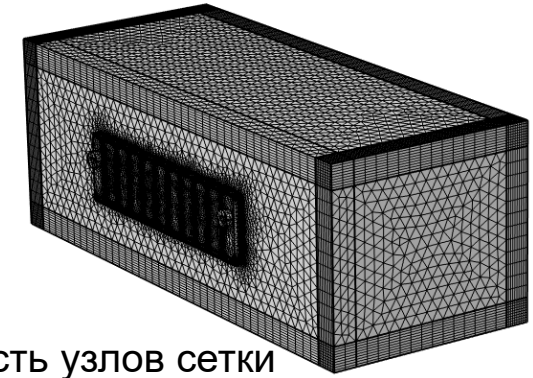
Согласно теоретическому анализу, высокий уровень поглощения геликона на Глобус-М2 ожидается для тороидальных замедлений антенны $N_\varphi = 4-10$. Для увеличения замещаемого тока, нарастающего квадратично с ростом продольной фазовой скорости геликона, следует обеспечить наличие в спектре антенны значений $N_\varphi = 2-4$.



3. Модуль антенны бегущей волны (АБВ) для системы нагрева плазмы и генерации тока в Глобус-М2 с помощью геликонов (Теоретический анализ и расчет АБВ)

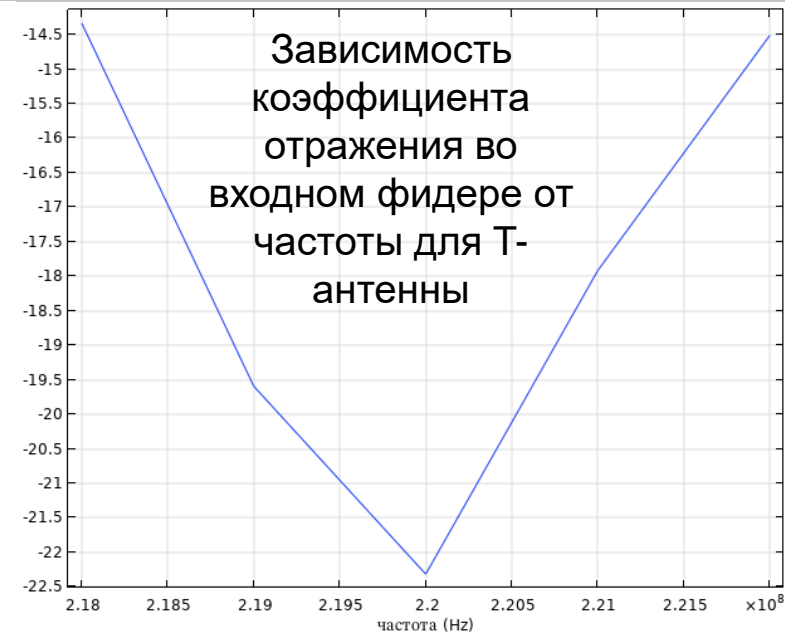
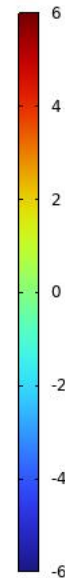
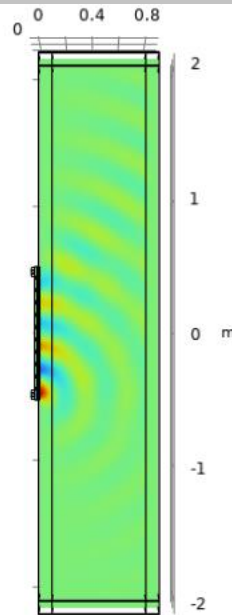


Расчетный объем с PML



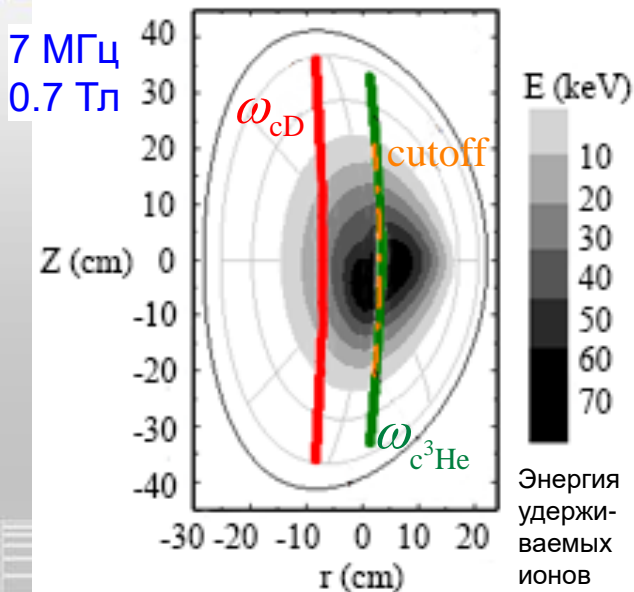
Совокупность узлов сетки для конечно-разностной схемы решения

Распределение E_y -компоненты электромагнитного поля излучения L-антенны в плоскости x-z ($y = 0$) при расчете для изотропной среды с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20$



4. Разработка нового сценария ИЦН

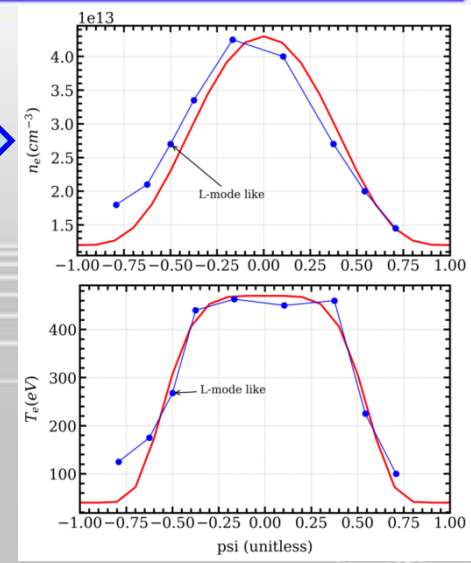
(Определение оптимальных условий эксперимента в ГЛОБУС-М2 для сценария ИЦН в плазме с тремя сортами ионов)



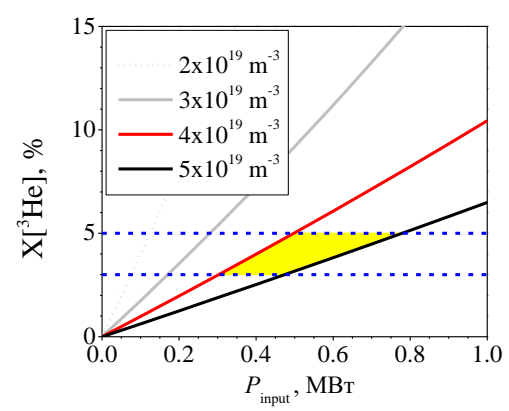
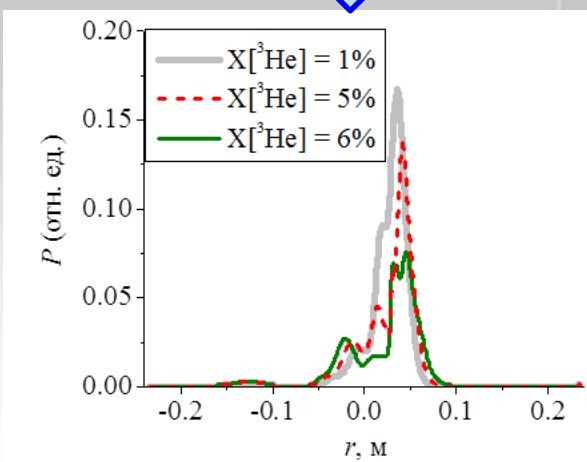
Выполнялся подбор:

- частоты и магнитного поля
- режимов разряда (профилей)
- парциальной концентрации 3He

Вариация режимов позволяет перераспределить уровень поглощаемой мощности между электронами и ионами, подняв ее относительную долю для ионов с 65% до 81%.



Влияние доли ионов 3He на радиальное распределение поглощаемой мощности БМЗ-волны



Минимальная парциальная концентрация 3He (необходимая для того, чтобы доля ускоренных ионов с $E < 80$ кэВ составляла 71%), в зависимости от мощности накачки.

Заключение

(1 из 3)

В ходе выполнения НИР все задания, запланированные на этап 3 (1-ая половина 2022 г.), полностью выполнены. В ходе выполнения проекта получены следующие основные результаты.

- Разработаны проекты экспериментальных образцов модуля МJ-антенны и модуля системы СВЧ генерации тока на частоту 2.45 ГГц и подводимую мощность 400 кВт. Подготовлена предварительная конструкторская документация и изготовлен макет антенны, проведена верификация физической модели антенны, выбрана технология и стартовало ее изготовление. Стартовало производство элементов для создания клистронного генераторного комплекса и элементов СВЧ тракта, включая клистрон, фокусирующий соленоид, ферритовый вентиль высокого уровня мощности, монтажный шкаф.
- Проведено теоретическое моделирование сценария ИЦН в плазме с тремя сортами ионов применительно к условиям сферического токамака. Определены оптимальные условия для эксперимента в сферическом токамаке Глобус-М2. Исследовано распределение поглощаемой мощности для различных частот накачки, а также для различных вероятных наборов параметров плазмы, характерных для установки Глобус-М2. Проанализированы значения парциальной концентрации гелия-3, достаточные для эффективного введения мощности при ИЦН.

Заключение

(2 из 3)

- Выполнено предварительное теоретическое моделирование генерации тока в плазме сферического токамака Глобус-М2 с помощью геликона. Для получения картины распределения электрического поля волны и профилей поглощенной мощности проведены подробные вариативные исследования распространения геликонов в плазме с помощью двумерного полноволнового кода. Разработан проект экспериментального образца модуля системы ВЧ-нагрева плазмы и генерации тока в сферическом токамаке Глобус-М2 с помощью геликонов на частоту 200 МГц и мощность 200 кВт при длительности импульса в несколько секунд.

- С помощью физического моделирования, использующего метод конечных элементов, выполнен анализ двух вариантов гребенчатой антенны бегущей волны для возбуждения геликона, состоящих из набора индуктивно связанных петель, конструктивно отличающихся формой и заземлением. Анализ выполнялся для антенны, приближенной к геометрии Глобус-М2, без учета его изогнутой топологии и наклона силовых линий магнитного поля, для частот от 200 МГц и изотропной среды с коэффициентом диэлектрической проницаемости 20. Подтверждена возможность использовать выбранную конструкцию для возбуждения бегущей и постепенно заглубляющейся в среду волны. Продемонстрирована необходимость конструктивной оптимизации элементов для уменьшения коэффициента отражения на входе антенны. Полученные компетенции будут использованы для разработки проекта антенны бегущей волны для анизотропной плазмы и для детальной геометрии Глобус-М2.

Заключение

(3 из 3)

- Разработан проект СВЧ-диагностики обратного рассеяния для контроля параметров ВЧ-волн, используемых для нагрева и генерации тока. Выполнен теоретический анализ минимально необходимого уровня мощности для реализации диагностики. Для проведения запланированных на следующие этапы испытаний диагностики на токамаке ФТ-2 оценён уровень ВЧ-шума и минимальный уровень зондирования на входе в плазму для 8 мм диапазона зондирования. Разработаны схемы волноводной и ВЧ-частей диагностики, сформированы технические задания на поставку и производство компонентов диагностики. Осуществлены сборки частей схемы.

- На каждом этапе НИР проведены патентные исследования. В отношении разрабатываемых объектов показано, что они соответствуют современному мировому техническому уровню и тенденциям развития соответствующих областей атомной энергетики. В отношении разрабатываемых объектов подтверждена их патентная чистота на территории РФ.

Доп. Слайд 1

