

**Выполнение 2 этапа проекта по теме  
«Поддержка и развитие уникального комплекса открытых плазменных  
ловушек для исследования физики удержания и нагрева термоядерной  
плазмы (Комплекс ДОЛ)»**

**Проект выполняется в рамках реализации федеральной целевой программы  
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития  
научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы», мероприятие  
3.1.1 «Поддержка и развитие уникальных научных установок»**

**Шифр заявки 2014-14-592-0001-1177**

Работы на 2 этапе исполнения Соглашения о предоставлении субсидии от 15 августа 2014 г. № 14.619.21.0003 (далее – Соглашение), проводились в соответствии с Программой развития УНУ «Комплекс ДОЛ» на 2014-2015 годы и составом работ и сроками, заданными в Плане-графике исполнения обязательств (ПГ) при выполнении работ. В ходе выполнения 2 этапа работ в период с 1 января по 30 июня 2015 г. выполнялись следующие работы (мероприятия):

- 1 Дооснащение объекта научной инфраструктуры необходимыми материалами, комплектующими.
- 2 Модернизация, содержание и ремонт оборудования.
- 3 Разработка и освоение новых методик исследований или измерений.
- 4 Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей.
- 5 Развитие внутренней и международной кооперации УНУ.
- 6 Развитие кадрового потенциала УНУ.

В ходе выполнения этих мероприятий на первом этапе были получены следующие результаты:

**В рамках мероприятия 1** на втором этапе работ (первое полугодие 2015 г.) предусматривалось приобретение необходимых материалов, комплектующих и оборудования с целью дооснащения УНУ согласно соответствующим разделам Программы развития УНУ. В связи с непоступлением средств субсидии в ИЯФ СО РАН в первой половине 2015 года и отсутствии возможности привлечения для осуществления закупок иных средств, кроме средств данной субсидии, дооснащение УНУ необходимыми материалами, комплектующими и оборудованием перенесено на второе полугодие 2015г.

**В рамках мероприятия 2** обеспечена безаварийная и надёжная эксплуатация и выполнение Программы научных исследований УНУ «Комплекс ДОЛ» в первом полугодии 2015 года.

Произведена модернизация системы регистрации пучково-спектроскопической диагностики на основе динамического эффекта Штарка. В результате обеспечена возможность измерений пространственных профилей напряженности магнитного поля с временным разрешением 100 мкс и выше. Опыт измерений с предыдущей версией оптической системы диагностики на основе динамического эффекта Штарка (MSE-диагностика) показал, что пространственные профили диамагнетизма плазмы имеют симметрию относительно магнитной оси системы. Поэтому, в модернизированной схеме, было принято решение расположить четыре линии наблюдения на радиусе, как показано на рис. 1. Относительное отверстие приёмной оптики увеличено до 0.15, что соответствует численной апертуре оптических волокон, используемых для транспортировки излучения, а также численной апертуре спектрометра. Таким образом, достигается согласование всей оптической системы и минимизация потерь света. Конструктивно, телескопы линий наблюдения 1 и 2, 3 и 4, попарно объединены в двух юстировочных модулях (см. рис. 1), обеспечивающих прецизионную настройку по углу в двух плоскостях в диапазоне  $\pm 5^\circ$ . Таким образом, имеется возможность направлять обе пары линий наблюдения на

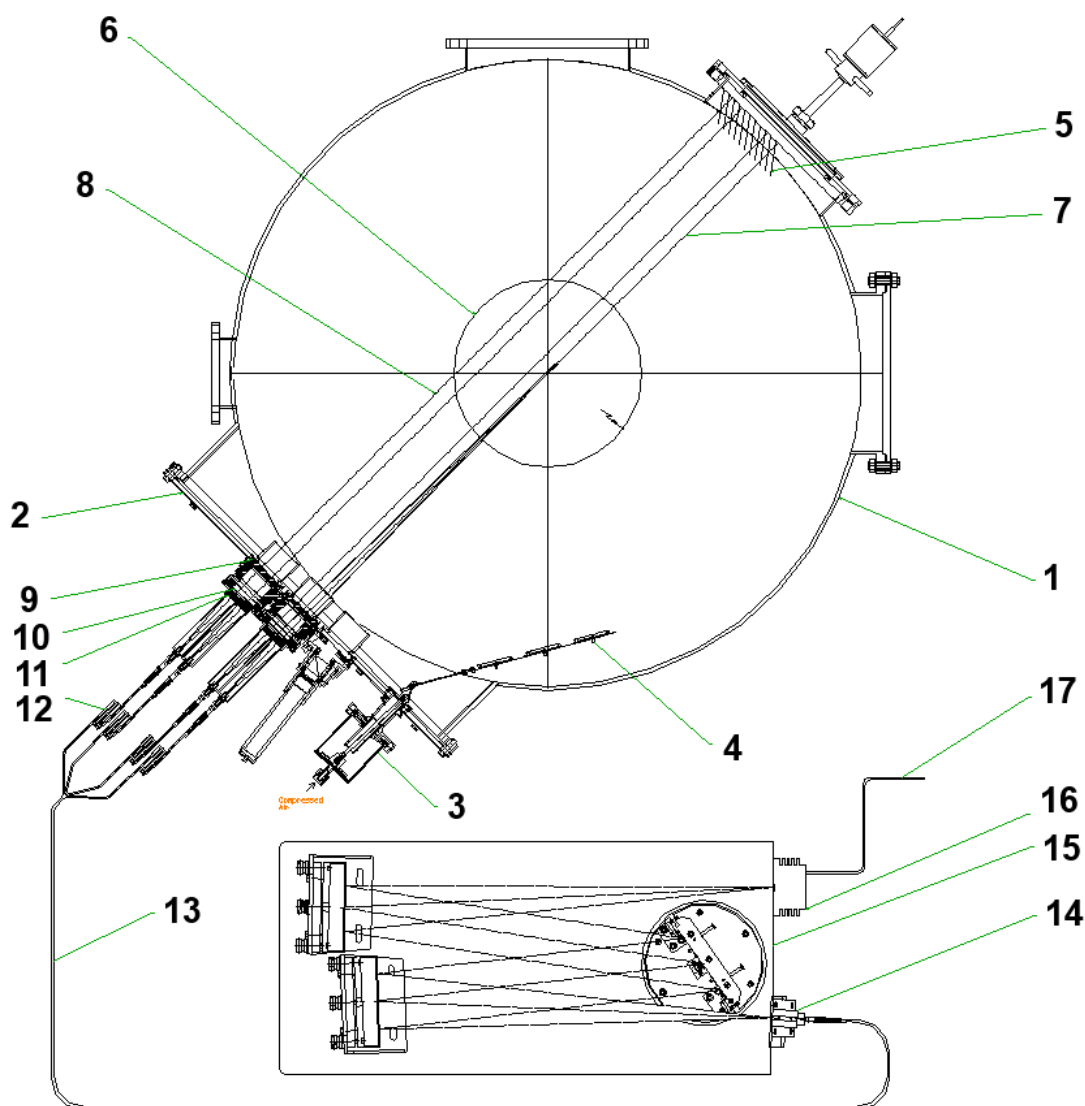
требуемый радиус независимо друг от друга. Каждая из пар линий наблюдения имеет собственный электрооптический затвор с открытой апертурой 45 мм. В данной версии затвора на основе жидкого кристалла (FLC) производства компании Micron время перехода между состояниями уменьшено до 50 мкс. Это позволяет получить разрешение по времени 100 мкс. При этом, возможность независимой настройки двух юстировочных узлов наблюдения позволяет совместить объекты наблюдения линий 1 и 3, 2 и 4. В такой геометрии, возможна регистрация двух кадров за «выстрел» установки ГДЛ формируя управляющие сигналы на каждый из затворов с заданным смещением по времени. Такая опция измерений в двух точках по времени и в двух пространственных областях является ценной возможностью получения дополнительной информации в эксперименте по изучению динамики быстрых ионов в ГДЛ.

На порте вакуумной камеры, расположенном напротив диагностического порта MSE, изнутри смонтирована пластинчатая оптическая ловушка (см. рис. 1) для уменьшения фона рассеянного излучения, попадающего в оптическую систему. Для защиты от напыления титана, периодически наносимого на внутреннюю поверхность вакуумной камеры ГДЛ в промежутках между «выстрелами», оптическая система снабжена управляемой заслонкой с пневматическим приводом.

В рамках модернизации, в спектрометр 15 установлена дополнительная цилиндрическая линза для компенсации астигматизма в поле изображения. Согласно контрольным измерениям, остаточный астигматизм составляет не более 40 мкм по всему полю. Благодаря этому, на светочувствительной ПЗС-матрице детектора 15 не происходит размывания и наложения спектров из соседних каналов.

Модернизированная MSE-диагностика позволила измерить радиальные профили диамагнетизма плазмы в ГДЛ в эксперименте по изучению альфвеновской микронеустойчивости быстрых ионов в марте-апреле 2015 г.

Максимальное разрешение по времени составило 100 мкс. При длительности экспозиции 500 мкс, была достигнута точность измерения магнитного поля  $2 \div 5\%$ .



**Рис. 1** Схема модернизированной оптической системы регистрации MSE-диагностики на газодинамической ловушке (ГДЛ): 1 – вакуумная камера ГДЛ, 2 – диагностический порт, 3 – пневматический привод защитной заслонки, 4 – заслонка, 5 – пластинчатая световая ловушка, 6 – поперечное сечение плазмы, 7 – линия наблюдения №1, 8 – линия наблюдения №4, 9 – юстировочный узел, 10 – быстродействующий электрооптический затвор на основе жидкого кристалла, 11 – фокусирующая линза оптического канала №4, 12 – одна из четырёх входных «ветвей» оптоволоконной сборки, 13 – оптоволоконная сборка, 14 – модуль входной щели спектрометра с закреплённым выходным торцом световода, 15 – спектрометр с дифракционной решёткой, 16 – ПЗС-камера, 17 – линия передачи данных.

В рамках мероприятия 2 продолжена модернизации системы дисперсионных интерферометров на установке ГДЛ, начатая на первом этапе выполнения проекта в 2014 году. Важной особенностью нового кристалла  $\text{LiGaTe}_2$ , предложенного для использования в оптической системе интерферометра, является то, что он положительный кристалл ( $n_e > n_o$ ) в отличие от используемого ранее  $\text{AgGaSe}_2$  кристалла, который отрицателен ( $n_e < n_o$ ). Это приводит к тому, что до преобразования частоты излучение первой гармоники распространяется в кристалле в виде необыкновенной волны, а соответственно излучение второй гармоники будет генериться в кристалле в виде обыкновенной волны. Для кристалла  $\text{AgGaSe}_2$  всё наоборот: излучение первой гармоники должно быть обыкновенной волной, а излучение второй гармоники будет необыкновенной волной. Эта особенность требует небольшой переделки оптической схемы интерферометра на уровне переюстировки зеркал, которая и была проведена на отчетном 2 этапе. Другие изменения в оптической схеме не требуются.

Кроме того, проведены исследования новых материалов ( $\text{CdTe}$ ,  $\text{TaGa}$ ) для разработки более эффективного устройства модуляции фазы второй гармоники – одного из критических узлов дисперсионного интерферометра, построенного по нашей схеме. Испытание новой электрооптической ячейки намечены на 3й этап выполнения работ по Соглашению.

Модернизирована система зондовых диагностик. Западный расширитель установки ГДЛ оснащен новой системой ленгмюровских, эмиссионных и магнитных зондов с целью измерения пространственного распределения потенциала плазмы, характерной энергии электронов и спектров колебаний электромагнитного поля. Данная система диагностик позволит исследовать ряд вопросов, связанных с продольной теплопроводностью и энергетическим временем жизни плазмы. Система состоит из двух идентичных зондов, способных перемещаться в продольном и радиальном направлениях с помощью специальных подвижных устройств. Зонды представляют собой малогабаритные петли

(диаметр петли  $\approx 8$  мм) из торированного вольфрама диаметром 0.11 мм. Петли закреплены на медных подводящих проводниках диаметром 0.6 мм, которые в свою очередь продернуты в два продольных отверстия керамической трубки, наружный диаметр которой составляет 3 мм. Такая конструкция позволяет пропускать через зонд ток и обеспечить прогрев зонда перед актом измерения. Прогрев до температуры  $\approx 600^\circ\text{C}$  необходим для очистки поверхности зонда, прогрев до температуры  $2000^\circ\text{C}$  используется при измерениях потенциала в режиме с высокой плотностью тока термоэлектронной эмиссии с поверхности зонда. Подвижные устройства позволяют перемещать соответствующие зонды в диапазоне 1200 мм в продольном направлении и 250 мм в радиальном.

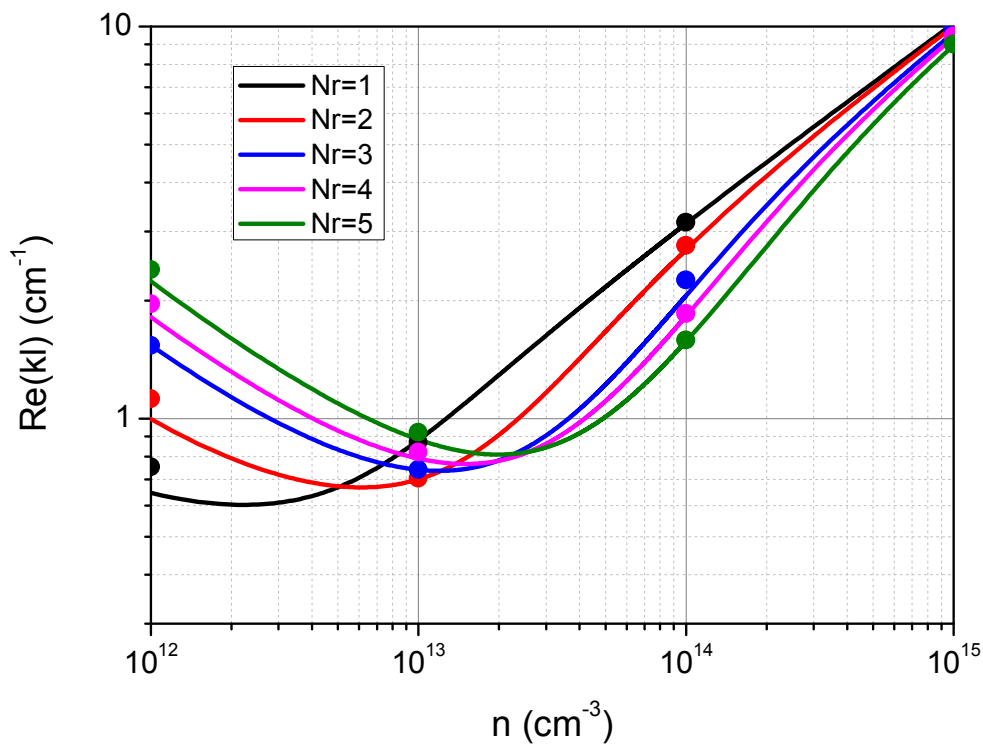
Наиболее существенным элементом созданной системы зондовых измерений является электронный модуль регистрации, который был разработан, изготовлен и отлажен в рамках выполнения отчетного 2 этапа. Модуль регистрации позволяет осуществлять прогрев зондов до температуры 600 или  $2000^\circ\text{C}$  и измерение серии вольтамперных характеристик зонда с временным разрешением 40 мкс (одна ВАХ за 40 мкс). Кроме того реализована возможность регистрации потенциала зонда в режиме без снятия вольт-амперных характеристик. Для оцифровки форм импульсов измеряемых сигналов тока и потенциала зонда использованы гальванически развязанные АЦП с диапазоном 12 бит и частотой оцифровки до 10 МГц. Данные АЦП также были изготовлены в ходе работ 2 этапа, они имеют аккумулятор в качестве источника питания на борту и связаны с интерфейсными модулями с помощью волоконно-оптической линии связи. Сам модуль регистрации тока и потенциала зонда также имеет аккумулятор на борту, что позволяет проводить измерения при подаче на поглотитель плазмы потенциала величиной до 1 кВ. На рисунке 2 представлена фотография смонтированного и отлаженного модуля регистрации с удаленным корпусом.



*Рис. 2 Фотография смонтированного и отлаженного модуля регистрации тока и потенциала зонда*

Создан новый источник низкотемпературной предварительной плазмы установки ГОЛ-3 на базе геликонного разряда на частоте 2.45 ГГц, отличающийся от применяемого ранее источника на базе сильноточного продольного разряда существенно меньшим количеством нейтрального газа в вакуумной камере в момент срабатывания. Инфраструктура установки ГОЛ-3 позволяет проводить исследования применимости геликонного разряда для генерации плотной (до  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>) плазмы в сильном магнитном поле (1-3 Тл). Такие исследования позволят дополнить существующую теорию геликонного разряда в плазме. Кроме этого, с практической точки зрения источник плазмы с высокой плотностью на основе геликонного разряда может быть востребован для проведения исследований по взаимодействию плазмы с поверхностью, стойкости материалов под действием предельных тепловых нагрузок, а также в технологических плазменных системах, требующих формирования потоков плазмы большой мощности. Для проведения указанных исследований в рамках работ по контракту установка ГОЛ-3 оборудована источником низкотемпературной плазмы на основе геликонного разряда, включающего в себя источник СВЧ излучения и антенный узел.

Предварительно в рамках задачи по созданию геликонного источника плазмы были проведены аналитические расчеты и прямое численное моделирование дисперсионных характеристик геликонных волн в плотной магнитоактивной плазме установки ГОЛ-3. Показано, что при выборе частоты ВЧ источника 2.45 ГГц геликонные волны могут эффективно возбуждаться и



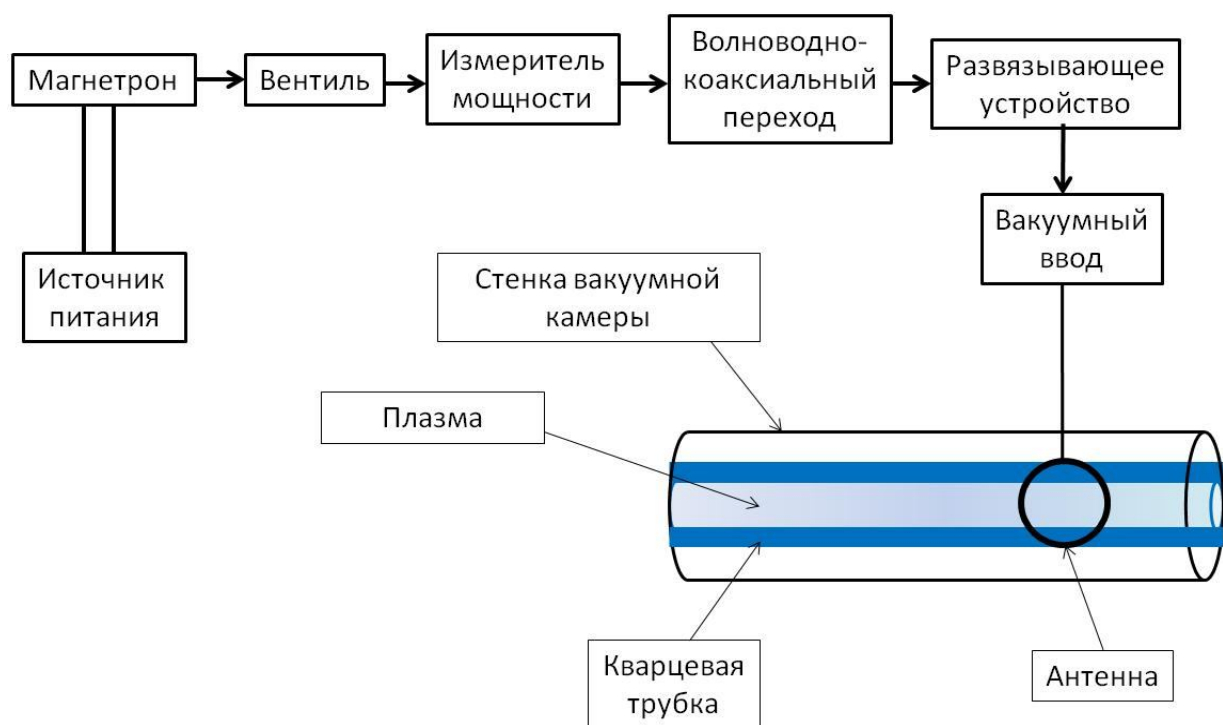
*Рис. 3* Зависимость постоянной распространения геликонных волн от плотности плазмы в поле  $B=3T$

распространяться вдоль плазменного столба. Выбранная частота позволяет использовать в качестве источника мощные, серийно выпускаемые промышленные магнетроны. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 3, где проведено прямое сравнение численного моделирования (дискретные точки) и аналитического расчета (сплошные кривые) постоянных распространения геликонных волн в однородном плазменном столбе радиусом 2 см в продольном магнитном поле 3 Т. Все волны имеют одинаковый азимутальный индекс  $m=+1$  и различаются количеством вариаций поля по радиусу  $Nr$ . Аналогичные расчеты были проведены для неоднородного по



радиусу распределения плотности плазмы и при различных граничных условиях на поверхности плазмы. Хорошее совпадение результатов, полученных двумя различными методами, позволило экстраполировать дисперсионные характеристики геликонных волн в область более высоких плотностей плазмы и большей величины продольного магнитного поля, при которых численное моделирование становится затруднительным (ввиду сильного увеличения требуемых вычислительных ресурсов).

Для создания источника низкотемпературной плазмы на основе геликонного разряда был разработан и изготовлен коаксиально-волноводный тракт, предназначенный для передачи СВЧ излучения от магнетрона к антенне, располагаемой на периферии плазменного столба (рис. 4).



**Рис. 4** Блок-схема геликонно источника плазмы.

Основными элементами тракта, для которых потребовалось проведение проектирования, расчетов и численного моделирования, являются:

1. Волноводно-коаксиальный переход, преобразующий  $TE_{10}$  волну прямоугольного волновода в  $TEM$  волну коаксиальной линии передачи;

2. Развязывающее устройство, представляющее собой коаксиальное дроссельное соединение и обеспечивающее электрическую и механическую развязку СВЧ источника и камеры плазменной установки;

3. Вакуумный ввод, предназначенный для ввода СВЧ мощности в вакуумную камеру установки.

По результатам проведенного численного моделирования и оптимизации были выработаны конструкторские решения для всех элементов тракта, обеспечивающие высокий уровень согласования и эффективную передачу СВЧ излучения от магнетрона к антенне. В качестве примера на рис. 5 приведен фрагмент трехмерной модели из программы численного моделирования для волноводно-коаксиального перехода и дроссельного соединения, а также соответствующий сборочный чертеж.

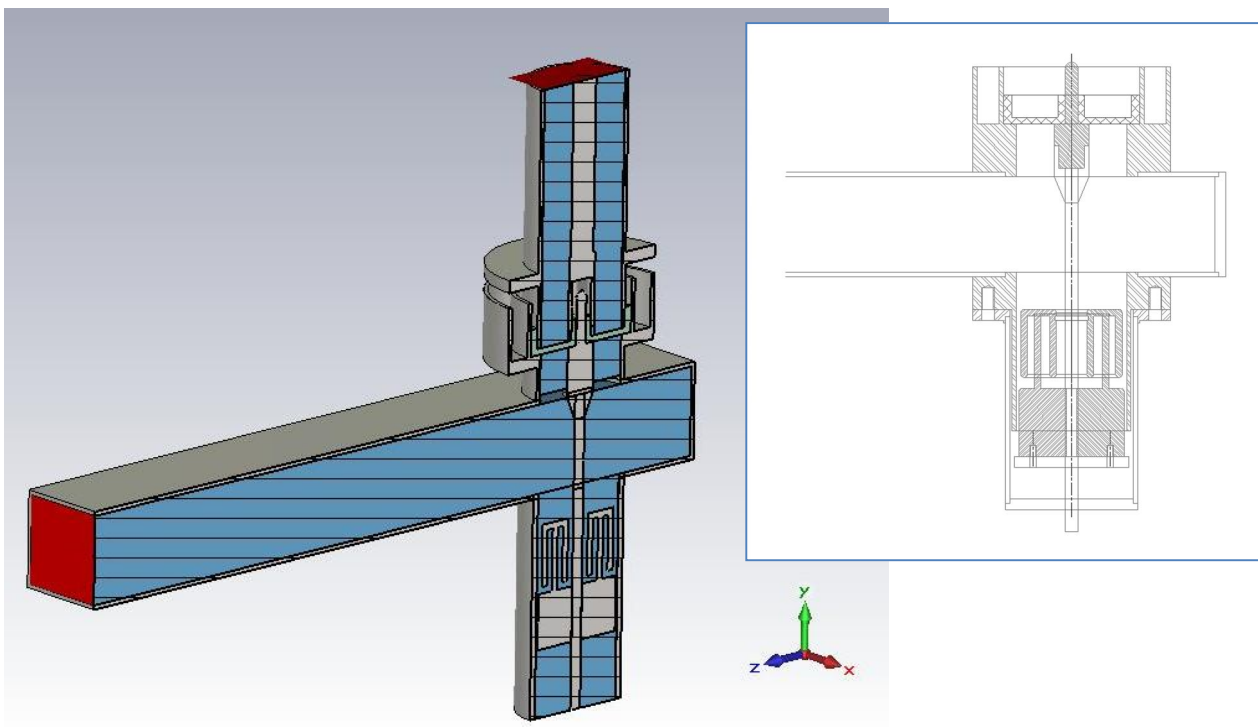


Рис. 5

**В рамках мероприятия 3 «Разработка и освоение новых методик исследований или измерений»** на втором этапе работ в первом полугодии 2015 году была разработана новая методика измерения пространственного распределения плотности потока частиц и энергии, а также электрического потенциала на поверхности торцевых поглотителей плазмы в открытой ловушке. Методика ориентирована на многоканальные измерения следующих величин, определяющих удержание частиц и энергии плазмы в направлении вдоль силовых линий магнитного поля (продольное удержание):

- распределения по поверхности поглотителя плотности мощности, выносимой потоком частиц плазмы, покидающих ловушку;
- распределения по поверхности поглотителя плотности тока ионов, покидающих ловушку;
- по поверхности поглотителя электрического потенциала;

Методика используется для проведения многократных измерений и выявления динамики определяемых физических параметров в течение длительности рабочего импульса ГДЛ (~10 мс), который с точки зрения метрологических параметров является редким однократным неповторяющимся процессом, обладающим естественной вариативностью в серии последовательных срабатываний установки.

В процессе разработки методики изготовлены основные элементы диагностической системы: пироэлектрические болометры и сеточные зонды; изготовлен и смонтирован на установке ГДЛ новый торцевой поглотитель плазмы с интегрированными в него диагностическими элементами.

Кроме того, на втором этапе работ в 2015 году разработана архитектура широкополосной многоканальной системы регистрации сигналов лавинных фотодиодов для диагностики лазерного рассеяния на основе smart-ADC, обеспечивающей надежное детектирование импульса излучения от 100 фотонов. На 2 этапе разработан и изготовлен прототип такой системы.

Продолжены работы по созданию измерителя потенциала плазмы на основе пучка тяжелых ионов и работы по созданию спектроскопической системы для изучения пространственного распределения нейтрального газа в расширителе ГДЛ и измерения скоростей частиц покидающих ловушку. На втором этапе было продолжено производство основных компонент данных диагностик.

**В ходе проведения мероприятия 4 «Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей»** на втором этапе проекта в первом полугодии 2015 году исследователи – участники работ на УНУ принимали участие в работе двух крупных международных конференций с целью повышения квалификации и распространения информации о возможностях УНУ:

- 42-й Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 9 - 13 февраля 2015 года в г. Звенигород Московской обл.;
- 42й Европейской конференции по физике плазмы (42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics) 22-26 июня 2015 года в г. Лиссабоне, Португалия

Кроме того, в 2015 году проводились визиты представителей УНУ в университеты и научные центры Российской Федерации и за рубежом с целью распространения информации о возможностях УНУ и заключения соглашений о сотрудничестве с пользователями УНУ.

**В ходе выполнения мероприятия 5 «Развитие внутренней и международной кооперации»** на втором этапе исполнения Соглашения (январь – май 2015 года) были подписаны или актуализированы договоры с 4 российскими организациями – пользователями о совместных научных исследованиях с использованием УНУ Комплекс ДОЛ.

В рамках заключенных соглашений проводились следующие совместные работы по Программе научных исследований на базе УНУ и исследования в интересах пользователей:

- Поисковое экспериментальное исследование процесса генерации плазмой излучения на частоте электронного циклотронного резонанса на установке ГДЛ.

- Экспериментальное исследование угловых характеристик мощного электронного пучка субмиллисекундной длительности, транспортируемого в магнитном поле на установке ГОЛ-3.

- Экспериментальные исследования и численное моделирование изменения характеристик мощного электронного пучка, получаемого в источнике с плазменным катодом, при его транспортировке в магнитном поле и прохождении пучка сквозь магнитную пробку на установке ГОЛ-3.

- Экспериментальное исследование свойств неорганических сцинтилляционных материалов при их импульсном облучении мощным потоком тормозного рентгеновского излучения высокоэнергетического релятивистского электронного пучка на установке ГОЛ-3.

**Мероприятие 8** было направлено на развитие кадрового потенциала УНУ и, прежде всего, на закрепление талантливой молодежи в науке и подготовку кадров высшей квалификации. В ходе 2015 года проводилась постоянная работа по организации практики и выполнения квалификационных работ для студентов 4 – 6 курсов Новосибирского государственного университета (НГУ) и Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) на установках Комплекса ДОЛ. Работы студентов, аспирантов и молодых ученых, выполненные на установках Комплекса ДОЛ были доложены на Международной научной студенческой конференции (апрель 2015г., Новосибирск) и ежегодной Конференции молодых ученых ИЯФ СО РАН.

Обязательства по этапу №2 Соглашения в первом полугодии 2015 года выполнены в полном объеме и в срок.