

**Выполнение 1 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

Работа по проекту, выполняемому при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от 15 августа 2014 г. № 14.619.21.0003 (далее – Соглашение), направлена на поддержку и развитие уникального комплекса открытых плазменных ловушек для исследования физики удержания и нагрева термоядерной плазмы (УНУ «Комплекс ДОЛ»). Целью работ является обеспечение высокого уровня параметров и характеристик действующих электрофизических пучково-плазменных и термоядерных установок в составе уникального Комплекса ДОЛ на уровне лучших мировых аналогов, для получения значимых научных результатов в различных областях исследований, а именно:

- удержание и нагрев термоядерной плазмы;
- генерация мощных атомарных, ионных и электронных пучков;
- генерация мощного субмиллиметрового излучения в пучково-плазменных и вакуумных системах;
- физическое материаловедение.

Работы на 1 этапе исполнения Соглашения 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 1 этапа работ в период с 15 августа 2014 г. по 31 декабря 2014 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 Метрологическое обеспечение функционирования УНУ.
- 5 Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей.
- 6 Расширение перечня оказываемых с использованием УНУ услуг.
- 7 Развитие внутренней и международной кооперации УНУ.
- 8 Развитие кадрового потенциала УНУ.

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

В рамках мероприятия 1 был уточнен перечень необходимых материалов и оборудования, рассмотрены коммерческие предложения различных поставщиков, подготовлены заявки на покупку материалов и оборудования, согласно уточненному перечню. Произведены закупки необходимых материалов и оборудования согласно уточненному перечню.

В рамках мероприятия 2 определен план работ по модернизации вакуумной системы установки ГДЛ. На первом отчетном этапе 2014 года подготовлены технические задания на разработку необходимых узлов и элементов вакуумной системы.

Проведены исследования нового нелинейного кристалла LiGaTe_2 в качестве более эффективного удвоителя частоты в схеме дисперсионного интерферометра. В оптической схеме дисперсионного интерферометра на ГДЛ для удвоения частоты CO_2 лазера используется кристалл AgGaSe_2 . В своё время это был

лучший кристалл для удвоения частоты CO₂ лазера на 10.6 мкм. Однако, в последнее время на рынке появился новый нелинейный кристалл LiGaTe₂. По сравнению с кристаллом AgGaSe₂ он обладает следующими преимуществами:

1. нелинейный коэффициент d больше на 20%;
2. показатель преломления n меньше на 3.5%;
3. больше теплопроводность.

Коэффициент преобразования d^2/n^3 у нового кристалла соответственно больше на 50%. Особенно следует подчеркнуть большую теплопроводность нового кристалла. Так как в схеме дисперсионного интерферометра используется непрерывное излучение, то из-за поглощения излучения в кристалле возникает тепловая линза, которая может привести к пробою кристалла и сильно уменьшает коэффициент преобразования излучения во вторую гармонику. Ещё одна важная особенность кристалла LiGaTe₂ то, что он является положительным кристаллом ($n_e > n_o$) в отличие от AgGaSe₂ кристалла, который отрицателен ($n_e < n_o$). Это приводит к тому, что для преобразования частоты излучение первой гармоники должно распространяться в кристалле в виде необыкновенной волны, а соответственно излучение второй гармоник будет генериться в кристалле в виде обыкновенной волны. Для кристалла AgGaSe₂ 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. Другие изменения в оптической схеме не требуются.

Модернизирована система управления, сбора и обработки экспериментальных данных установки ГДЛ. Приобретено новое оборудование для пультовой комнаты, расширены возможности локальной компьютерной сети.

Выполнен комплекс технических мероприятий по модернизации магнитной системы установки ГДЛ: Введена в строй дополнительная конденсаторная батарея, расположенная в специализированном технологическом зале КО8. В конденсаторном отсеке на многоэтажных стеллажах смонтированы 1000

конденсаторов ИК-6-150 (6 кВ, 150 мкФ) секциями по 100 штук. Секции попарно объединены в один стеллаж, таким образом, в отсеке установлено 5 стеллажей с конденсаторами. В целях безопасности все помещение, где находятся конденсаторы, организовано как высоковольтный блок с необходимыми блокировками (ручная механическая блокировка – РМБ, AZ – автоземлитель). В этом конденсаторном отсеке имеется два канала зарядки конденсаторов и поэтому все конденсаторы разделены на две группы секций с независимым срабатыванием тиристорных ключей, что дает дополнительную степень свободы в работе с магнитным полем ГДЛ.

К концу 2014 года проложены высоковольтные фидерные линии, соединяющие дополнительный конденсаторный бокс КО8 с установкой ГДЛ, предусмотрена коммутация существующей системы питания магнитного поля установки ГДЛ и нового источника – накопителя энергии, проведены мероприятия по проверке конденсаторов – накопителей энергии, начата работа по созданию высоковольтной системы питания для зарядки конденсаторных батарей и системы управления.

Проведены работы первого этапа по модернизации вакуумной системы установки ГОЛ-3. Проведена оптимизация состава закупаемого вакуумного оборудования и стандартных элементов с учетом изменения внешнеэкономической ситуации. Завершена конструкторская разработка новых постов вакуумной откачки, заказы сданы в Экспериментальное производство ИЯФ СО РАН. Один из вакуумных постов в настоящее время находится в работе в составе вновь созданной двухметровой магнитоплазменной системы установки ГОЛ-3Т. Остальные вакуумные посты предназначены для использования на магнитоплазменной системе с длинным многопробочным соленоидом, завершение работ по которой запланировано на второй этап работ по модернизации вакуумной системы.

Проведена модернизация автономного сегмента сети Ethernet установки ГОЛ-3. Необходимость данной работы была связана с проводимой в рамках

настоящего Соглашения заменой устаревшего измерительного оборудования установки ГОЛ-3 на современные прецизионные измерительные системы, имеющие связь с управляющим компьютерным комплексом по сети Ethernet 1 Гбит/с. Особенностью новых измерительных систем является максимально полное использование производительности сети передачи данных, позволяемое стандартами IEEE 802.3z и 802.3ab.

Изготовлена система высоковольтного питания атомарного инжектора №1 и система управления атомарными инжекторами №1 и №2 на ГОЛ-3. Схема системы питания атомарного инжектора приведена на рис. 1.

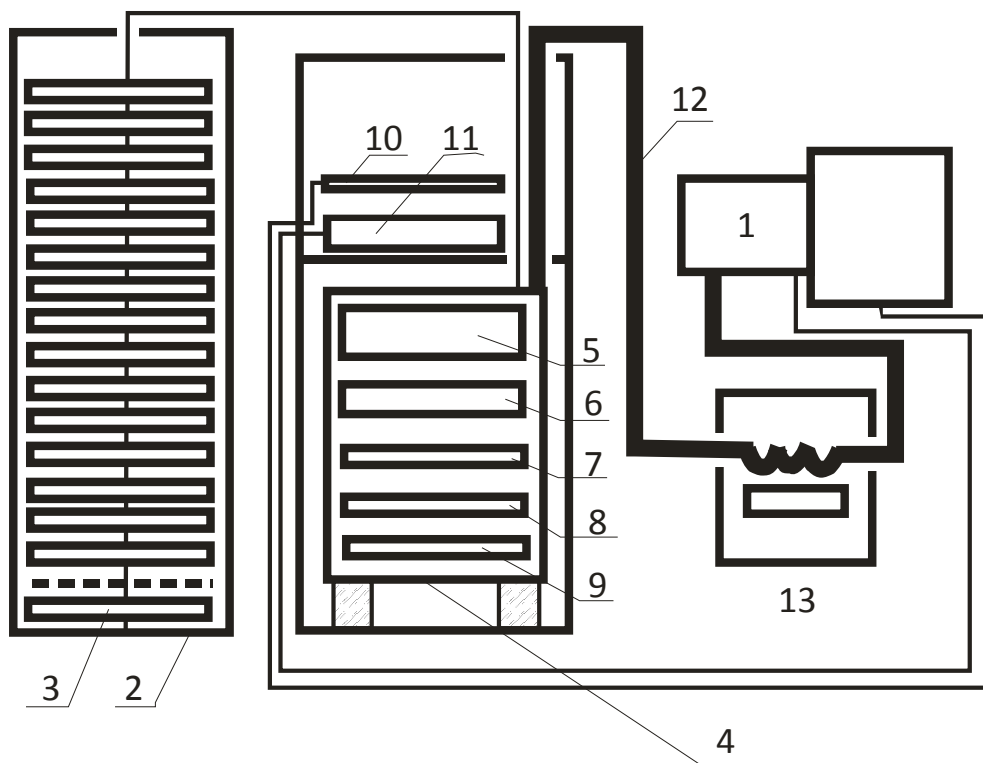


Рис.1 Схема питания инжектора

Электропитание инжектора 1 включает ускоряющее напряжение, питание узлов находящегося под высоким потенциалом дугового ионного источника, смещение второй сетки формирующего ионный пучок узла, а также питание газового затвора перезарядной газовой мишени. Источник импульсного ускоряющего напряжения 25 кВ при токе 50 А и длительности импульса 5 мс представляет

собой сборку 28 последовательно соединенных независимо функционирующих блоков, «полок» 3, собранных в двух стойках 800*800*47U 2. Каждый блок содержит батарею конденсаторов, высоковольтные ключи, схемы зарядки и управления, и вырабатывает импульс напряжения 900 В. Питание схем зарядки и управления осуществляется через разделительные трансформаторы, обеспечивающие изоляцию на полное напряжение 25 кВ (на рис.2 приведена фотография стоек со снятыми передними панелями). Блок высокопотенциального оборудования 4 содержит источник питания дуги 5, вырабатывающий импульс тока 1 кА. 5 мс, источник питания соленоида магнитной изоляции анода 25 А 20 мс 6, схему поджига дугового разряда 7, блоки питания анодного и катодного газовых клапанов 8, 9. Линии питания с помощью высоковольтного кабеля 12 через снаббер 13 подключаются к ионному источнику. Низкопотенциальные блоки смещения второй сетки 11 и питания клапана перезарядной газовой мишени 10 обеспечивают формирование пучка быстрых атомов дейтерия.

Подготовлен проект рабочей станции для изучения взаимодействия мощных потоков плазмы с поверхностью и проведены технические мероприятия по



Рис.2 Источник ускоряющего напряжения

подготовке экспериментальной площадки для размещения станции. Рабочая станция для изучения взаимодействия мощных потоков плазмы с поверхностью предназначена для моделирования импульсно-периодических воздействий на плазмоприемники реактора ИТЕР. Станция представляет собой высоковакуумный объем с размещаемым на одном торце генератором импульсно-периодического пучка. На оси вакуумной камеры размещаются исследуемые образцы. Для транспортировки электронного пучка от генератора до образцов и его сжатия используется ведущее магнитное поле, создаваемое внешним соленоидом. Соленоид создает магнитное поле до 60 мТл, режим работы соленоида непрерывный или импульсно-периодический с длительностью импульсов 300 с и скважностью 3. Для обоснования режима работы соленоида и выбора его параметров проведены расчеты магнитного поля и тепловых режимов работы. На основе этих расчетов разработано техническое задание на изготовление источников питания катушек соленоида. В ходе работ по подготовке площадки разработана конструкторская документация и начато изготовление рамы для размещения рельсового пути станции. Для обоснования возможности размещения элементов станции проведены механические расчеты и определена номенклатура несущих элементов рамы. Кроме того, разработан проект переноса трубопроводов сжатого воздуха, пожарного водопровода, а также техническое задание на разработку проекта линии обеспечения дистиллированной водой.

В рамках мероприятия 2 также проведены регламентные и ремонтные работы для обеспечения безаварийной и надёжной текущей эксплуатации уникального комплекса ДОЛ и выполнения Программы научных исследований УНУ «Комплекс ДОЛ» на первом этапе, включая текущие срочные работы по конструированию и изготовлению новых элементов и узлов.

В рамках мероприятия 3 «Разработка и освоение новых методик исследований или измерений» на первом этапе работ в 2014 году были разработаны три новые методики экспериментальных исследований, предназначенные для установки ГОЛ-3:

1) Методика характеристики потока микрочастиц по рассеянию света (рассеяние Ми) для исследования потоков частиц материалов, возникающих при эрозии металлических мишеней в результате воздействия на них мощных импульсных потоков тепла.

2) Методика характеристики состояния поверхности по рассеянию от неё лазерного излучения предназначена для исследования динамики изменения поверхности мишеней в результате воздействия на них мощных импульсных потоков тепла.

Разработка данных двух методик мотивирована острой необходимостью решения проблемы эрозии материала стенки и образования пыли в прототипах термоядерных реакторов в результате импульсного воздействия плазмы, и проведением большого количества исследований по этой проблеме на модельных установках в последнее время. Подобные методики не имеют аналогов по объёму и детализации информации, получаемой из анализа рассеянного света, в экспериментах по исследованию мощных импульсных тепловых нагрузок на тугоплавкие материалы. Методики предназначены для исследований на установке ГОЛ-3.

3) Методика контроля процесса магнитного сжатия электронного пучка по рентгеновскому излучению электронов периферии пучка, попадающих на обрезную диафрагму установки ГОЛ-3. Методика предназначена для использования в экспериментах по изучению физики коллективного нагрева замагниченной плазмы мощным релятивистским электронным пучком микросекундного диапазона длительностей в многопробочной ловушке ГОЛ-3 в составе УНУ «Комплекс ДОЛ». Принцип работы методики основан на регистрации тормозного рентгеновского излучения электронов периферийной части пучка, поглощаемых во входной диафрагме. Электроны пучка, которые свободно проходят в апертуру входной диафрагмы и не попадают на её поверхность, не создают рентгеновского излучения и не могут быть зарегистрированы при помощи датчиков данной методики. Всё оборудование для

данной методики измерения изготовлено и протестировано. Применение данной диагностики для измерений запланировано в программе экспериментов на установке ГОЛ-3 в I квартале 2015 года.

Кроме того, в рамках мероприятия 3 на первом этапе работ в 2014 году в подготовлено техническое задание на разработку системы лазерного (томсоновского) рассеяния для измерения временной эволюции радиальных профилей электронной плотности и температуры плазмы. Проведено конструирование, приобретение оборудования, комплектующих и материалов, начато производство компонентов системы. На рис. 3 представлен дизайн системы лазерного (томсоновского) рассеяния в виде сборочного чертежа.

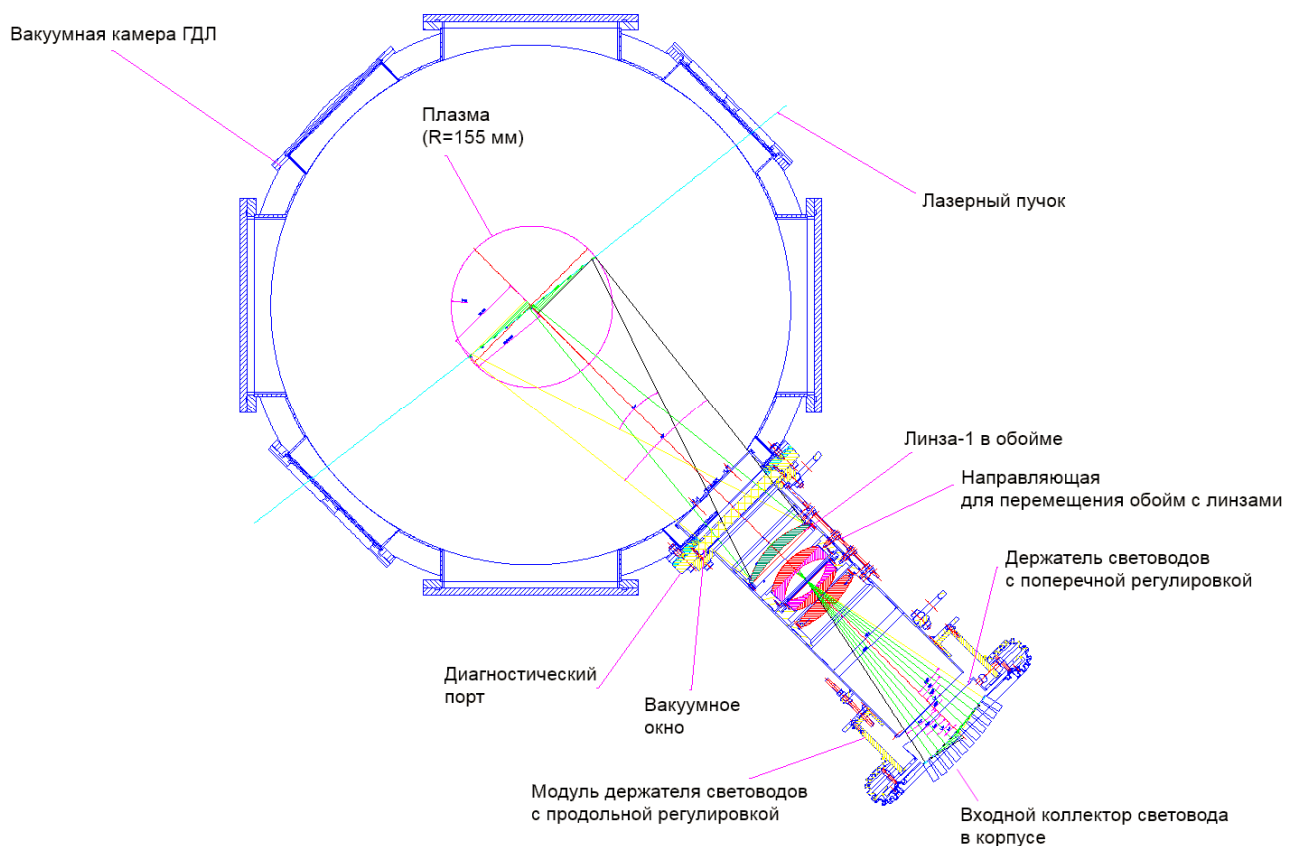


Рис.3 Дизайн системы лазерного (томсоновского) рассеяния для измерения временной эволюции радиальных профилей электронной плотности и температуры плазмы.

Подготовлено техническое задание на разработку измерителя потенциала плазмы на основе пучка тяжелых ионов. Проведено конструирование, приобретение оборудования, комплектующих и материалов, начато производство компонентов. Измеритель потенциала будет расположен в центральном сечении ГДЛ и будет состоять из двух основных частей — инжектора первичного пучка Xe^+ и детектора вторичных пучков Xe^{2+} . (см. рис.4).

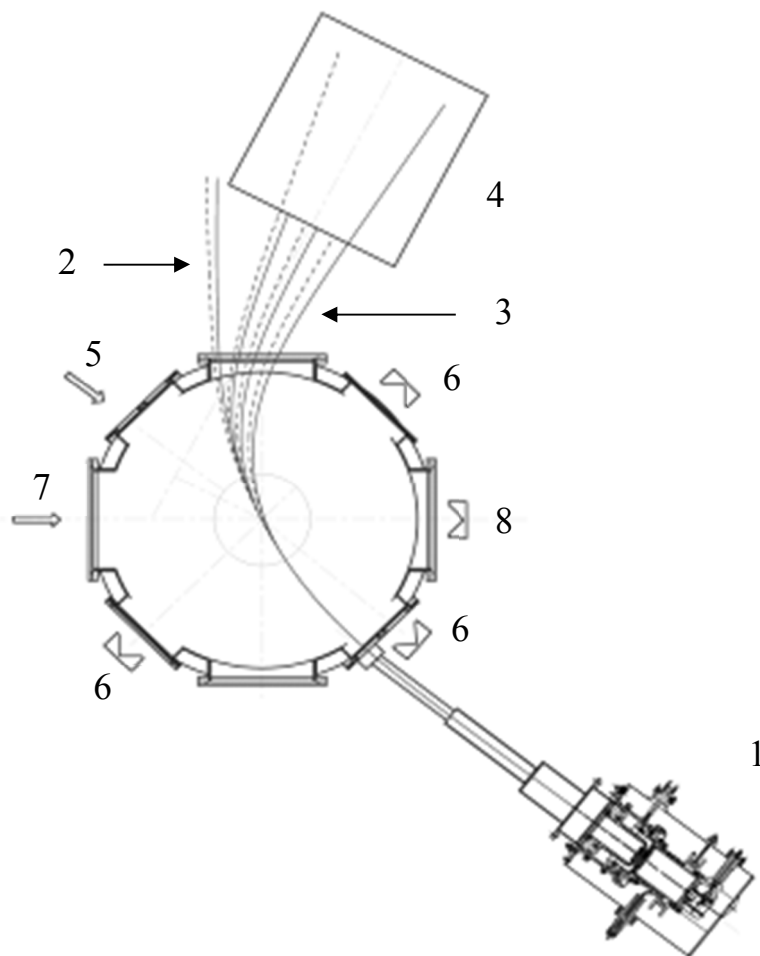


Рис.4 Поперечное сечение установки ГДЛ: элементы измерителя потенциала:

1 — источник пучка первичных ионов, 2 и 3 — траектории первичного и вторичных пучков, 4 — область расположения детектора вторичных пучков; элементы других диагностик: 5 — ввод лазерного пучка, 6 — поглотители и приёмники излучения, 7 и 8 — источник и приёмник диагностического атомарного пучка.

Проектирование было осложнено ограниченным набором диагностических портов ГДЛ, большая часть которых занята другими диагностиками. Источник первичного пучка будет генерировать пучок Xe^+ со следующими параметрами: энергия ионов 60кэВ, током 3-10 мА, длительность работы 10 мс, сечение пучка $5 \times 20 \text{ мм}^2$, угловая расходимость 10 миллирадиан. Вторичные частицы будут замедляться примерно до 40% от начальной энергии и анализироваться в 30-градусном электростатическом конденсаторе. Для уменьшения ошибки измерения анализирующее поле детектора должно быть пропорционально начальной энергии первичных ионов. По этой причине потенциалы детектора будут задаваться делителями относительно ускоряющего напряжения источника первичного пучка. Внешние стенки обеих частей диагностики, источника и детектора, будут выполнять роль магнитных экранов, которые уменьшают магнитное внутри них до величин порядка 10 Гс. Дополнительной магнитный экран будет размещён внутри источника первичного пучка с целью подавить магнитное поле в области ускорения пучка до величины порядка 1 Гс.

Начата разработка диагностики для измерения пространственного распределения плотности потока частиц и энергии на поверхности торцевых поглотителей плазмы. Составлена предварительная рабочая схема диагностики, начато конструирование и изготовление отдельных узлов новых торцевых поглотителей плазмы. Изготовлен и испытан прототип нового датчика потока частиц.

Подготовлено техническое задание на разработку спектроскопической системы для изучения пространственного распределения нейтрального газа в расширителе ГДЛ. Для проведения измерений спектра излучения атомарного водорода и дейтерия в области 650-680 нм в «западном» расширителе газодинамической ловушки (ГДЛ) была предложена схема измерений представленная на рис. 5. Оптическая система спектральной диагностики изображена на рис. 6.

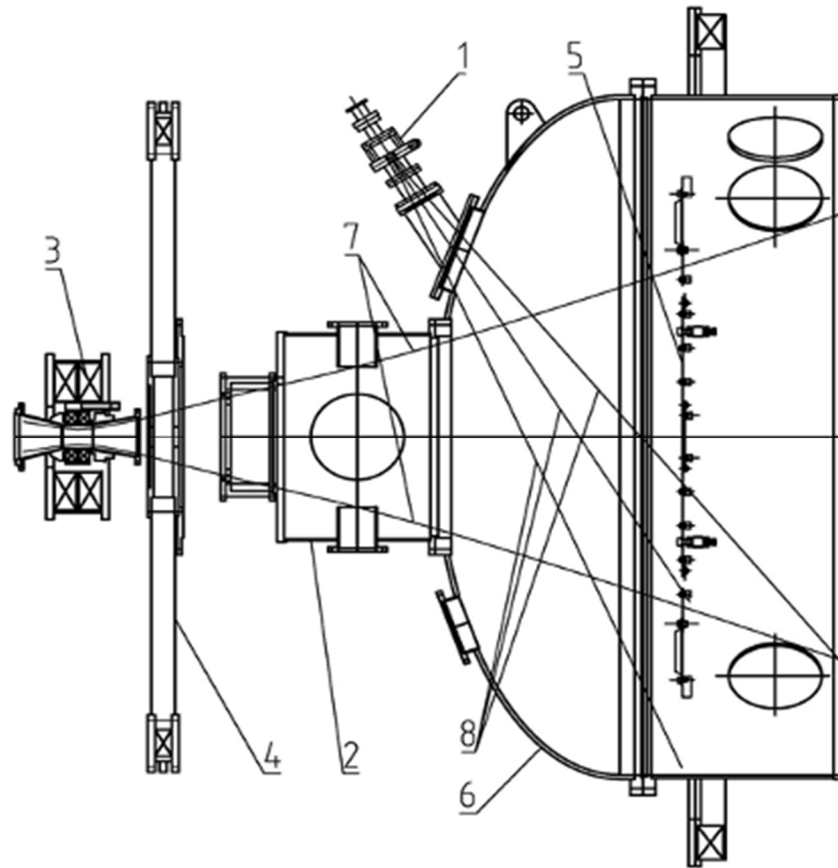


Рис.5 Схема измерений в расширителе ГДЛ: 1 – оптическая система, 2 – переходный бак, 3 – пробочный узел, 4 – магнитная катушка, 5 – плазмоприемник, 6 – вакуумная камера расширителя, 7 – крайние силовые линии магнитного поля, 8 – варианты настройки линии наблюдения.

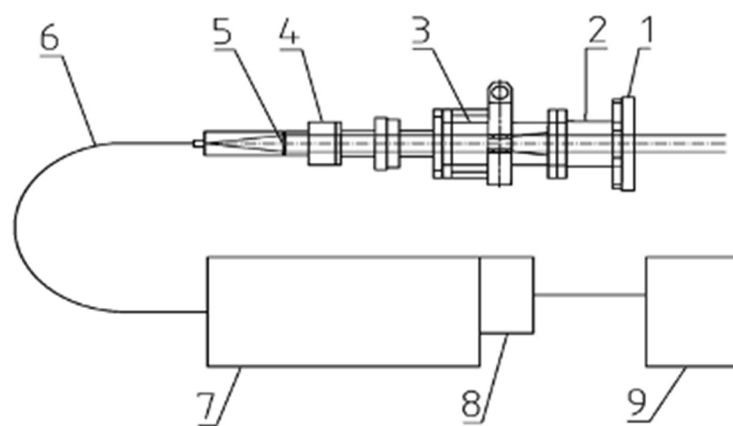


Рис.6 Оптическая система: 1 – вакуумное окно с просветляющим покрытием, 2 – переходник, 3 – юстировочный узел, 4 - FLC затвор, 5 – линза, 6 – световод, 7 – спектрометр, 8 – ПЗС-детектор, 9 – компьютер.

Вакуумная изоляция обеспечивается при помощи стеклянного окна (1) с двухсторонним просветляющим покрытием. Благодаря покрытию, коэффициент пропускания для излучения в рабочем спектральном интервале близок к 100%. Юстировочный узел (3) обеспечивает изменение линии наблюдения в пределах $\pm 8^\circ$ по вертикали и горизонтали. Далее излучение попадает на электрооптический затвор (4) на основе жидкого кристалла. Время быстрого действия данного затвора ~ 50 мкс. Прошедшее через затвор излучение собирается линзой (5) в кварцевый световод (6). Для проведения измерений был использован спектрометр (7) марки Jarrel-Ash, имеющий оптическую схему Черни-Тернера. На первом этапе работ проведено конструирование, приобретение оборудования, комплектующих и материалов, начато производство узлов системы.

В ходе выполнения мероприятия 4 была произведена замена морально устаревшего измерительного оборудования в стандарте КАМАК, которое более не поддерживается производителем, на современные многоканальные синхронные регистраторы сигналов на базе АЦП ADC1250, разработанные в ИЯФ СО РАН. Регистраторы на базе 8-ми канального модуля ADC1250 (рис. 7) предназначены для фиксации формы однократных импульсных сигналов с частотой дискретизации до 50 МГц. Для системы лазерного томсоновского рассеяния подготовлены новые регистраторы сигналов на базе АЦП ADC1250 с частотой дискретизации 500 МГц. В отличие от стандартных цифровых осциллографов, эти системы обладают существенно более широким динамическим диапазоном, а также позволяют производить одновременные измерения большого числа входных сигналов.

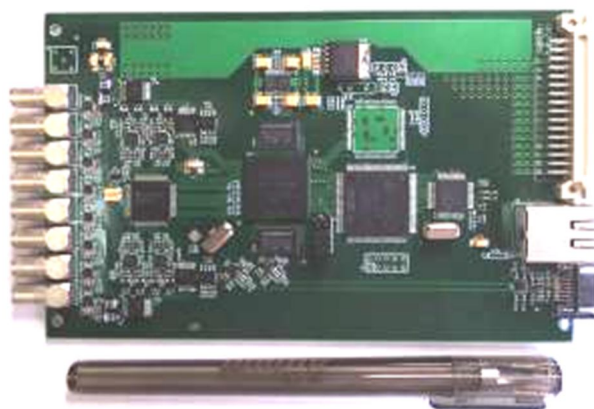


Рис. 7 Модуль регистрации ADC1250

В ходе проведения мероприятия 5 «Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей» в 2014 году исследователи – участники работ на УНУ принимали участие в работе двух крупных международных конференций с целью повышения квалификации и распространения информации о возможностях УНУ:

- 10-й Международной конференции по открытым ловушкам «Open System 2014» 26-29 августа 2014 г. в Южной Корее,
- 25й Конференции МАГАТЭ по термоядерной энергетике (25th IAEA Fusion Energy Conferency) 13-18 октября 2014 г в Санкт-Петербурге.

Кроме того, в 2014 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 рамках выполнения этого мероприятия была обеспечена возможность одновременной работы магнитоплазменной системы установки ГОЛ-3 и ускорителя У-2 по двум различным научным программам (первый этап). Это существенно расширило возможность использования УНУ «Комплекс ДОЛ» внешними и внутренними пользователями. Смысл данного мероприятия состоит в следующем. На установке ГОЛ-3 исследования проводятся по нескольким научным направлениям, которые включают в себя: физику нагрева и удержания плазмы в многопробочной магнитной ловушке, физику коллективного взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой, физику воздействия мощных электронных и плазменных потоков на конструкционные материалы, физику генерации электромагнитного излучения терагерцового диапазона в пучково-плазменных системах, и другие. Требования к параметрам эксперимента при работе по этим направлениям различаются, поэтому фактически в каждый конкретный момент времени установка перестраивалась для работы в определённом режиме. В то же время, полная длина 12-метрового соленоида с многопробочным магнитным полем была критически необходима

только при исследованиях процессов удержания плазмы в ловушке, для других научных направлений достаточно было более короткой магнитной системы. Поэтому было принято решение о разделении существующей установки на две независимых: одна установка включает в себя генератор релятивистского электронного пучка У-2 и короткую магнитоплазменную систему, эта установка предназначена для работы по программам, не требующим большой длины соленоида. Вторая установка будет сформирована на базе оставшейся 10-метровой части соленоида, к которой будет подключена система мощной атомарной инжекции для нагрева плазмы. Работа по разделению установки производится в несколько этапов. На первом этапе выполнения контракта было запланировано создание и ввод в эксплуатацию первой установки с двухметровой магнитоплазменной частью.

На основании произведенных мероприятий в 2014 году был актуализирован порядок доступа заинтересованных пользователей к установкам Комплекса ДОЛ.

Согласно плану работ в рамках мероприятия 6 приобретен широкополосный криогенный детектор с постоянной чувствительностью в области 0-3 ТГц и временным разрешением 1 нс и низким уровнем шума, который в сочетании с имеющимися квазиоптическими полосовыми фильтрами позволяет проводить детальные измерения спектра электромагнитного излучения. Цель использования на установке ГОЛ-3:

1. Проведение измерений спектрального состава, мощности и поляризации электромагнитного излучения в диапазоне 0.3-3 ТГц, эмитируемого плотной плазмой в процессе релаксации в ней мощного релятивистского электронного пучка и возбуждении в ней сильной ленгмюровской турбулентности.
2. Проведение измерений характеристик терагерцового излучения ($f \sim 0.6-1$ ТГц), генерируемого в двухстадийном лазере на свободных электронах за счет рассеяния миллиметрового излучения на релятивистском электронном пучке с доплеровским преобразованием частоты.

Данный прибор в сочетании с уже имеющимися квазиоптическими полосовыми фильтрами позволяет проводить детальные измерения спектра электромагнитного излучения, что до настоящего времени было невозможно сделать на УНУ «Комплекс ДОЛ». О необходимости проведения таких исследований на уникальном комплексе ДОЛ неоднократно указывалось как внутренними, так и внешними пользователями УНУ.

В ходе выполнения мероприятия 7 «Развитие внутренней и международной кооперации» в 2014 году были подписаны или актуализированы соглашения с 8 российскими и 4 иностранными организациями – пользователями о совместных научных исследованиях с использованием установок УНУ Комплекс ДОЛ.

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 2014 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.

В ИЯФ СО РАН начата программа по премиальному стимулированию сотрудников и аспирантов, выполняющих исследования на УНУ, к защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Обязательства по Соглашению на 2014г. выполнены в полном объеме.