

**Выполнение 3 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

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 15.08.2014г. № 14.619.21.0003 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 3 в период с 01.07.2015 по 31.12.2015 выполнялись работы в рамках следующих мероприятий:

- I. Дооснащение объекта научной инфраструктуры необходимыми материалами, комплектующими и оборудованием.
- II. Модернизация, содержание и ремонт оборудования УНУ.
- III. Разработка и освоение новых методик исследований или измерений.
- IV. Метрологическое обеспечение функционирования УНУ.
- V. Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей.
- VI. Расширение перечня оказываемых с использованием УНУ услуг.
- VII. Развитие внутренней и международной кооперации УНУ.
- VIII. Развитие кадрового потенциала УНУ.

В рамках мероприятия I было приобретено следующее оборудование:

- индустриальный контроллер для спектроскопической диагностики в расширителе ГДЛ – 1 шт.;
- инструментальный компьютер для спектроскопической диагностики в расширителе ГДЛ – 1 шт.;
- устройство охлаждения и стабилизации температуры для спектроскопической диагностики в расширителе ГДЛ – 1 шт.;
- спектрометр со сменными дифракционными решетками для спектроскопической диагностики в расширителе ГДЛ – 1 шт.;
- турбомолекулярные насосы Shimadzu для модернизации вакуумной системы установки ГДЛ – 3 шт.;
- затвор высоковакуумный с пневматическим приводом для модернизации вакуумной системы ГДЛ – 1 шт.;
- двухроторный безмасляный форвакуумный насос (производитель Kashiyama) для модернизации вакуумной системы ГДЛ – 1 шт.;
- управляющие контроллеры ADAM с набором блоков для модернизации системы управления установки ГДЛ – 4 шт.;
- специализированный шкаф с интегрированными средствами охлаждения, подавления шума и распределения электропитания для серверов и сетевых устройств 24U APS Netshelter CX AR4024IA, который будет использован при модернизации систем управления, сбора и обработки данных установки ГДЛ – 1 шт.;
- оборудование для модернизации системы вакуумных измерений и замены на установке ГОЛ-3 существующих устаревших вакуумметров РВТ-3 и ВМБ1/8 – 1 комплект;
- комплект оборудования, состоящий из турбомолекулярного насоса Shimadzu TMP-3203LN с контроллером, шибера Dy320 VAT и насоса форвакуумного спирального XDS35i для модернизации системы вакуумной откачки установки ГОЛ-3, включающий в себя откачной пост № 4 – 1 комплект;
- оборудование (в т.ч. магнетрон) для комплектации нового источника низкотемпературной стартовой плазмы на базе геликонного разряда на частоте 2,45 ГГц;

- лазер для комплектации дисперсионных интерферометров, в центральной части ловушки (комплект № 1) и в концевой многопробочной секции (комплект № 2) модернизированной ГОЛ-3;
- гелиевый течеискатель Shimadzu MSE-2000R для модернизации вакуумной системы ГДЛ;
- контроллер вакуумных датчиков TPG 261 для модернизации вакуумной системы ГДЛ.

Были также приобретены следующие комплектующие изделия и расходные материалы:

- комплектующие для модернизации вакуумной системы из 8 трактов атомарной инжекции установки ГДЛ: вакуумная арматура, вентили, вакуумные датчики, высоковакуумные затворы и т.д.;
- материалы (металлы и др.) для производства компонент диагностики на основе пучка тяжелых ионов ;
- двулучепреломляющий кристалл LiNbO₃ для модернизации спектральной диагностики на основе динамического эффекта ;
- кристалл для удвоения частоты LiGaTe₂ и кристалл для системы модуляции фазы для модернизации дисперсионного;
- компоненты для модернизации магнитной системы ГДЛ: кабель, радиокомпоненты, материалы;
- материалы для изготовления системы пирозлектрических болометров и специальных зондов на поверхности плазмоприемника ГДЛ – 1 комплект;
- радиоэлектронные компоненты для разработки и изготовления многоканальной системы регистрации сигналов от датчиков на поверхности поглотителей плазмы в ГДЛ (102 канала);
- материалы и комплектующие для изготовления ленгмюровских, эмиссионных и магнитных зондов;
- оптические и оптико-механические компоненты для разработки спектроскопических диагностик в расширителе ГДЛ;
- радиоэлектронные компоненты для разработки спектроскопических диагностик в расширителе ГДЛ;
- расходные материалы (водород, дейтерий, гелий, криптон, азот, элегаз, углекислый газ, вакуумные уплотнительные кольца из витона и резины 7889)

и комплектующие для ремонта и обеспечения безаварийной и надёжной текущей эксплуатации УНУ на втором этапе выполнения проекта;

- набор материалов и комплектующих для создания нестандартного высоковольтного оборудования, предназначенного для питания атомарного инжектора № 2 установки ГОЛ-3;

- материалы для второго этапа модернизация системы вакуумной откачки установки ГОЛ-3, включая создание нового высокопроизводительного откачного поста №4;

- материалы и комплектующие для создания источника низкотемпературной предварительной плазмы на базе геликонного разряда на частоте 2,45 ГГц;

- материалы и комплектующие для создания методики измерения плотности плазмы при помощи дисперсионных интерферометров в центральной части ловушки (комплект № 1) и в концевой многопробочной секции (комплект № 2) модернизированной установки ГОЛ-3;

- комплектующие (радиодетали) для создания 16-канальной системы регистрации высокочастотных сигналов установки ГОЛ-3, включающей в себя восемь современных аналого-цифровых преобразователей ADC12500 с параметрами: частота дискретизации 500 МГц, разрядность 12 бит (один модуль содержит 2 измерительных канала);

- материалы и комплектующие для технических мероприятий по созданию возможности одновременной независимой работы установки ГОЛ-3 и ускорителя У-2 по двум разным научным программам;

- компоненты сетевого оборудования для модернизации системы управления и сбора данных установки ГДЛ;

- материалы и комплектующие для аналоговой части 16-канальной системы регистрации существующей на установке ГОЛ-3 диагностики томсоновского рассеяния;

- комплектующие для модернизации системы управления установкой ГОЛ-3

- замены части физически устаревшей инфраструктуры в пультовой установки;

- радиодетали и комплектующие для новых систем диагностики плазмы;

- расходные материалы и комплектующие для обеспечения безаварийной и надёжной текущей эксплуатации УНУ и выполнение научной программы работ на третьем этапе выполнения проекта.

В рамках мероприятия II была обеспечена безаварийная надёжная эксплуатация и произведена модернизация УНУ «Комплекс ДОЛ». При этом были получены следующие основные результаты:

Была модернизирована магнитная система установки ГДЛ.

Основной целью модернизации магнитной системы было увеличение магнитного поля в центральной плоскости ловушки на 25% в конфигурации, оптимальной для реализации дополнительного микроволнового нагрева плазмы на частоте электронного циклотронного резонанса. Ожидаемым результатом, с одной стороны, должно стать существенное увеличение энергии, запасенной в основной компоненте плазмы – популяции горячих ионов с энергиями термоядерного диапазона. С другой стороны, оптимизация конфигурации магнитной системы должна обеспечить эффективный и устойчивый нагрев электронной компоненты, что необходимо для увеличения энергетического времени жизни горячих ионов. Для решения задач модернизации была создана конденсаторная батарея емкостью 0.15 Ф и максимальным напряжением зарядки 6 кВ. Эта батарея аналогична серии стандартных конденсаторных накопителей, разработанных для питания соленоида гофрированного магнитного поля установки ГОЛ-3. Описание смонтированного конденсаторного накопителя и его основных составляющих компонент было выполнено на первом этапе выполнения работ и приведено в отчете за первый этап. Для завершения работ по модернизации магнитной системы потребовалась разработка нового зарядного устройства и системы управления, базирующихся на современных подходах к схемотехнике и автоматизации таких устройств. Помимо основной задачи улучшения удержания плазмы в ГДЛ, следует отметить прикладную значимость данной работы. Внедренные в процессе создания системы зарядки и управления технологии позволяют упростить дальнейшую модернизацию и масштабирование системы питания магнитных катушек. В частности, по сравнению с зарядными устройствами ранее созданных накопителей этой серии, построенными на тиристорных преобразователях с отдельными

регулируемыми источниками тока, новые инверторы совмещают в себе оба компонента и при этом обладают более компактными размерами и меньшим числом функциональных блоков. Созданная система управления, за счет полностью автономного контроля над параметрами позволяет существенно увеличить надежность накопителя и упростить его интеграцию в систему управления экспериментальной установки.

Рис. 1 демонстрирует фотографию зарядных устройств, установленных в конденсаторном отсеке.

Была модернизирована вакуумная система установки ГДЛ.

Целью модернизации вакуумной системы была замена устаревшего и полностью амортизированного оборудования на современное вакуумное оборудование, обладающее высокой степенью надежности. Предусматривается обновление выработавших свой ресурс турбомолекулярных насосов (ТМН) и вакуумных затворов ДУ250, установленных в инжекторных трактах и вакуумных портах ТМН. Также произведена замена основного форвакуумного масляного насоса ВН-6Г производительностью 155 л/сек на насос Рутса MU600 производительностью 160 л/сек.



Рисунок 1 - Фотография зарядных устройств, установленных в конденсаторном отсеке.

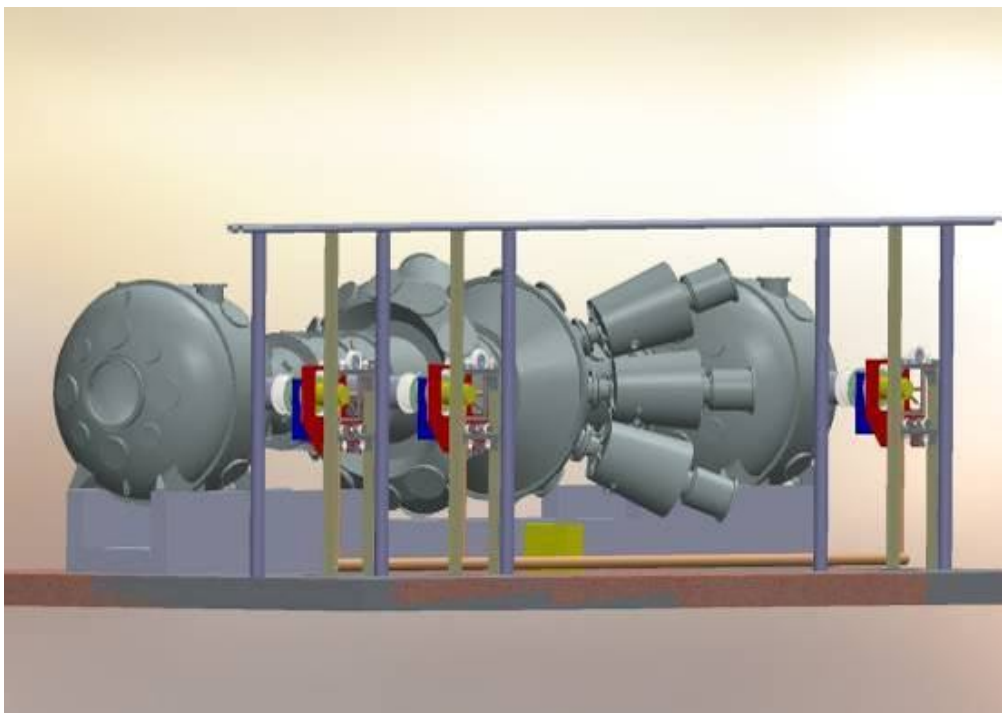


Рисунок 2 - 3D-модель установки ГДЛ с основными элементами вакуумной системы. Красным цветом выделены корзины ТМН, синим – вакуумные затворы, форвакуумный насос МУ600 показан жёлтым цветом.

Предусмотрено создание новой системы питания титановых испарителей взамен выработавшей свой ресурс существующей. Новая система питания включает в себя 15 токовых трасс для 3-х фазных испарителей и размещается в трёх силовых шкафах. Использование новой элементной базы позволяет заметно снизить нагрузку на электрическую сеть и повысить надёжность работы системы электродугового распыления титана.

Создана система атомарной инжекции на установке ГОЛ-3

Комплекс атомарной инжекции содержит два атомарных инжектора, две частично интегрированные системы питания и полностью интегрированную систему управления. Атомарные инжекторы имеют собственную вакуумную откачку, позволяющую им работать как в составе установки ГОЛ-3, так и автономно. В последнем случае для предотвращения плавления элементов вакуумного затвора выход пучка перекрывается радиатором. Фотография атомарных инжекторов приведена на рис. 3.

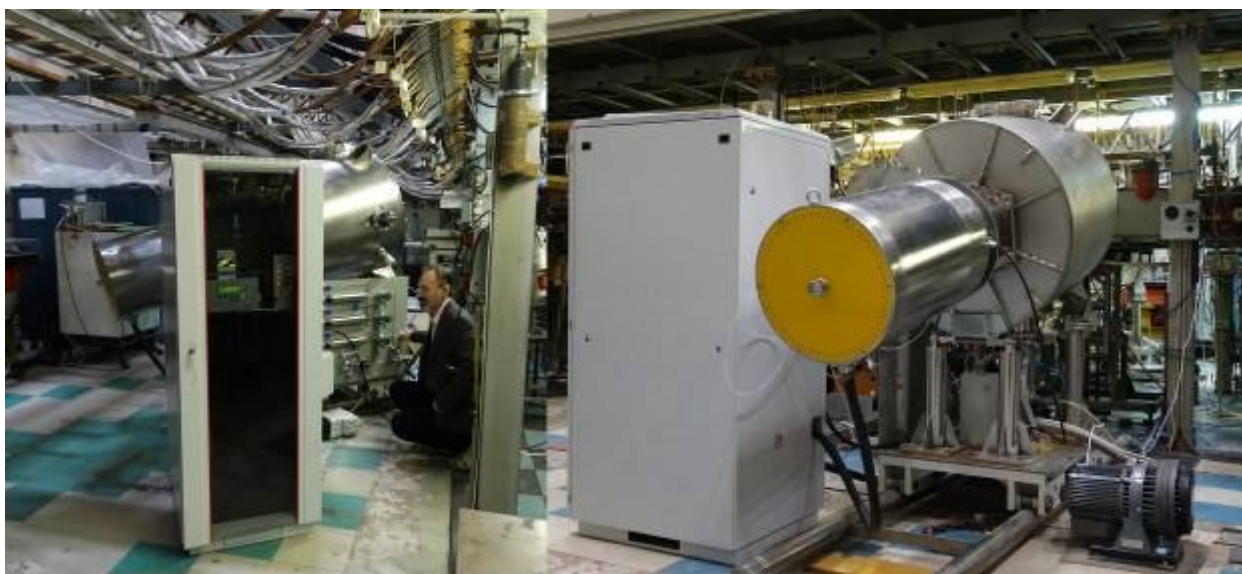


Рисунок 3 - Атомарные инжекторы №1 и №2 на установке ГОЛ-3.

Пучок атомов дейтерия с энергией до 25 кэВ, эквивалентным током 30 А и длительностью 5 мс получается перезарядкой на газовой мишени пучка ионного дугового источника с геометрической фокусировкой пучка.

Система питания инжекторов вынесена с территории площадки ГОЛ-3 и соединяется с инжекторами двумя высоковольтными кабелями. Источник ускоряющего напряжения выполнен на основе 26 включенных



Рисунок 4 - Система питания атомарного инжектора №2 на установке ГОЛ-3.

последовательно полнофункциональных модулей. Каждый модуль вырабатывает напряжение 1 кВ при токе до 40 А и содержит развязанный на полное напряжение 25 кВ фидер питания, конденсаторную батарею, полумостовой ключ, драйвер и схему защиты по току. Стойка низковольтной аппаратуры содержит блок силовой коммутации, инверторы суммарной мощностью 6 кВт, создающие напряжение питания частотой 30 кГц, контроллеры источников ускоряющего напряжения, контроллеры источников питания дуги и два блока смещения второй сетки. Контроллеры источников питания и блок управления связаны с силовой аппаратурой оптоволоконными линиями связи.

Модернизирована система вакуумных измерений установки ГОЛ-3

Работа по модернизации системы вакуумных измерений ГОЛ-3 была вызвана двумя обстоятельствами. Во-первых, использовавшиеся ранее устаревшие вакуумметры РВТ-3 и ВМБ1/8 постепенно теряли эксплуатационную надёжность и требовали больших усилий по

поддержанию в работоспособном состоянии. Во-вторых, упомянутые типы вакуумметров трудно интегрируются в создаваемую в рамках данного Соглашения систему измерения технологических параметров установки ГОЛ-3. Поэтому было принято решение произвести замену применявшихся типов измерительных приборов на более современные. Анализ технических решений, предлагаемых промышленностью, привёл к выбору конфигурации системы, состоящей из приборов двух типов. Первый тип прибора предназначен для участков вакуумной системы с предварительным вакуумом - Pfeiffer Vacuum Pirani TPR 280 для измерения форвакуума начиная с атмосферного давления. Второй тип предназначен для работы в высоковакуумных объёмах - Pfeiffer Vacuum PKR 251 для измерения вакуума от атмосферного давления до 10^{-7} Па.

В ходе выполнения обязательств по Соглашению был закуплен необходимый комплект вакуумных ламп TPR 280 и PKR 251, дополнительно был куплен один фирменный двухканальный измеритель TPG 262.

Модернизирована система вакуумной откачки установки ГОЛ-3, включающая в себя откачной пост № 4 в области расположения системы нейтральной инжекции

Новая высокопроизводительная система вакуумной откачки состоит из четырёх одинаковых вакуумных откачных постов, каждый из которых имеет расчётную производительность откачки на высоком вакууме 3000 л/с. Существенным новым требованием является то, что система вакуумной откачки является полностью безмасляной. Каждый из откачных постов является полностью самодостаточной откачной системой. Целевое назначение откачных постов следующее. Пост № 1 предназначен для обеспечения вакуумных условий в баке источника плазмы. Пост № 2 предназначен для откачки бака плазмopриёмника. Посты № 3 и № 4 предназначены для откачки центральной ловушки, в которую будет производиться инжекция нейтральных пучков. При этом пост № 3 располагается в вакуумном окне напротив инжектора нейтральных атомов № 1, а пост № 4 – напротив инжектора № 2. Такое расположение постов вакуумной откачки позволяет производить откачку газа из транспортного канала между основной вакуумной камерой и приёмником пучка (который поглощает часть нейтрального пучка, не захваченную плазмой и прошедшую насквозь через вакуумную камеру до противоположной стенки). Тем самым

одновременно уменьшается нежелательное поступление водорода в камеру из области приёмника пуска во время работы нейтральных инжекторов.

В ходе выполнения данной работы было произведено проектирование всех вновь создаваемых механических элементов и узлов откачного поста, проведена технологическая проработка проекта, заказы переданы в производство ИЯФ СО РАН с плановым сроком завершения работ в декабре 2015 года. Закуплены все дорогостоящие элементы откачного поста: турбомолекулярные и форвакуумные насосы, вакуумметры, ручные, электромагнитные и электропневматические клапаны ISO-KF DN40, вакуумные затворы ISO-K DN320. Закуплена часть стандартных вакуумных элементов: уплотнительные кольца с центрирующими вставками, керамические высоковольтные развязки, гибкие вакуумные рукава. Окончательный монтаж новых вакуумных постов на установку ГОЛ-3 будет произведён при технологическом перерыве в производстве научно-исследовательских работ, который запланирован в графике работ установки.

Создана аналоговая часть 16-канальной системы регистрации рассеянного лазерного излучения для диагностики температуры и плотности плазмы на установке ГОЛ-3

Планами модернизации в рамках настоящего Соглашения предусматривалось создание шестнадцати новых измерительных каналов, состоящих из модулей приёмников излучения с лавинными фотодиодами диаметром 1,5 мм и АЦП. Схемотехнические решения по модулям фотоприёмников выбраны унифицированными с применёнными при разработке системы диагностики лазерного томсоновского рассеяния на газодинамической ловушке. Для оцифровки сигналов созданы два новых 8-канальных блока АЦП, предназначенных для регистрации сигналов рассеяния.

Ввод в эксплуатацию новых каналов системы регистрации потребует проведения работ в оптическом тракте непосредственно на установке ГОЛ-3, эта работа может быть выполнена во время планового перерыва в графике исследований на установке.

Изготовлены узлы и элементы рабочей станции изучения процессов взаимодействия мощных потоков плазмы с поверхностью

В ходе выполнения обязательств по Соглашению разработана конструкторская документация рабочей станции, в соответствии с которой

изготовлены все основные крупногабаритные узлы станции – подрельсовая рама, рельсовый путь, тележки и опоры для установки соленоида и вакуумной камеры, недостающие элементы вакуумной камеры и крепления соленоида, пост вакуумной откачки. Монтаж рабочей станции на предусмотренном проектом месте размещения запланирован во время



Рисунок 5 - Соленоид и вакуумная камера станции

технологического перерыва в работе входящих в комплекс ГОЛ-3 установок.

Для проведения физического запуска станция была временно размещена на осевой линии установки ГОЛ-3. Вследствие ограниченности места для размещения станции при физическом запуске была использована вакуумная камера уменьшенного размера и импульсный соленоид (рис. 5), ограничивающий работу режимом одиночных импульсов. Такой подход позволил обеспечить непрерывность проведения экспериментов доступность инфраструктуры установки пользователям, а также дал возможность тестирования и отработки генератора электронного пучка и диагностик для исследования поверхностных процессов.

В рамках мероприятия III проведена разработка и освоение новых методик исследований или измерений

На третьем этапе работ по проекту в 2015 году были разработаны четыре новые научные методики:

1 Методика измерения временной эволюции радиальных профилей электронной плотности и температуры плазмы в установке ГДЛ при помощи системы томсоновского рассеяния.

2 Методика измерения временной эволюции радиального профиля потенциала плазмы в установке ГДЛ с помощью пучка тяжелых ионов.

3 Методика измерения пространственного распределения нейтрального газа в расширителе ГДЛ и измерения скоростей покидающих ловушку частиц на основе спектроскопической системы.

4 Методика измерения плотности плазмы при помощи дисперсионного интерферометра на установке ГОЛ-3.

Мероприятие IV: Метрологическое обеспечение функционирования УНУ

В ходе выполнения мероприятия была продолжена замена морально устаревшего измерительного оборудования в стандарте КАМАК, которое более не поддерживается производителем, на современные многоканальные синхронные регистраторы сигналов на базе АЦП ADC1250 (см. рисунок 6), разработанные в ИЯФ СО РАН (частота дискретизации 50 МГц, разрядность 12 бит, один модуль содержит 8 измерительных каналов, управление по сети Ethernet 1 Гбит/с). Увеличено количество ADC1250 для обеспечения функционирования новых диагностических систем установки (в том числе как устройств пользователей сторонних организаций), так и ныне существующих устройств, возможности которых обслуживаются системой сбора данных не полностью. Всего запланирована замена 8 модулей. Работа по вводу в эксплуатацию новых каналов системы регистрации может быть выполнена во время планового перерыва в графике исследований на комплексе ГОЛ-3.

Произведена замена устаревшего измерительного оборудования стандарта КАМАК, обслуживающие высокочастотные диагностики, на 8 современных аналого-цифровых преобразователей ADC1250 (частота



Рисунок 6 - 4-х модульный кейт и плата одного модуля ADC1250.

дискретизации 500 МГц, разрядность 12 бит, один модуль содержит 2 измерительных канала, управление по сети Ethernet 1 Гбит/с). Применение новой измерительной техники позволит улучшить точность измерений и

повысит надёжность работы измерительного комплекса в целом, снизит потребление энергии.

Измерительные средства, используемые в ходе работ в рамках Соглашения, как стандартные (покупные), так и уникальные, разработанные и изготовленные в ИЯФ СО РАН, не входят в перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии. Метрологическая поверка стандартных средств измерения (осциллографы, вольтметры и т.п.) обеспечивалась производителем оборудования или силами Бюро измерительных приборов ИЯФ СО РАН. Метрологические характеристики уникальных АЦП, разработанных и произведенных в Институте, обеспечиваются соответствующим выбором электронных комплектующих, схемотехнических решений и использованием собственных метрологических методик.

Мероприятие V: Повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей

УНУ «Комплекс ДОЛ» является уникальной научной установкой мирового уровня для проведения исследований в области физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Поддержание и развитие высокого уровня исследований возможно, в том числе, благодаря широкому национальному и международному научному сотрудничеству, проведению на базе УНУ совместных исследований с участием и/или в интересах ведущих российских и зарубежных научных и научно-образовательных организаций. Важнейшим инструментом информирования профильного мирового научного сообщества о возможностях УНУ и его привлечения для проведения исследований с использованием установки является участие сотрудников института – участников работ в ведущих специализированных научных форумах – конференциях, семинарах, рабочих совещаниях. Именно такие мероприятия являются наиболее представительными экспертными коммуникационными площадками, на которых обсуждаются и совместно анализируются достигнутые к настоящему времени в мире научные результаты в соответствующей области исследований. Кроме того, здесь же формируются и верифицируются стратегии и программы будущих исследований и разработок, в том числе – с учетом имеющихся и планируемых экспериментальных возможностей существующих и создаваемых исследовательских инфраструктур. По результатам таких мероприятий издаются сборники научных публикаций, которые, как правило, индексируются в ведущих международных базах данных, активно используются мировым научным сообществом в исследовательской деятельности.

В течение 2015 года сотрудники ИЯФ СО РАН – участники работ на УНУ «Комплекс ДОЛ» принимали участие в работе ряда международных научных мероприятий, с целью повышения квалификации, публикации

результатов деятельности 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.;
- 42-й Международной конференции по науке о плазме. (42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)) 24-28 мая, 2015 г., Турция.
- 42-й Европейской конференции по физике плазмы (42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics) 22-26 июня 2015 г. в г. Лиссабоне, Португалия.
- 16-й Международной конференции по ионным источникам (16th International Conference on Ion Sources) 23-28 августа 2015 г., город Нью-Йорк, США.
- 5-й Международный (Крейнделевский) семинар «Плазменная эмиссионная электроника», 2-7 августа 2015 г., г. Улан-Удэ.

Во время посещений сотрудниками института – участниками работ на УНУ университетов и научных центров Российской Федерации, зарубежных организаций проводилось информирование партнеров о возможностях УНУ «Комплекс ДОЛ», заключен и/или продлен ряд соглашений о научном и научно-техническом сотрудничестве с организациями-пользователями УНУ.

Информация о результатах проводимых с использованием УНУ исследований отражена в средствах массовой информации. Всего за период с августа 2014 г. по декабрь 2015 г. в СМИ опубликовано 23 материала о работах на УНУ, из них 10 – в федеральных СМИ, 1 – на сайте РАН и 12 в региональных изданиях. Ниже приводятся интернет-ссылки на некоторые из опубликованных материалов:

ТАСС: <http://tass.ru/sibir-news/2307990>

Интерфакс: <http://www.interfax-russia.ru/Siberia/news.asp?id=657951&sec=1671>

Наука в Сибири: <http://www.sbras.info/news/teoriya-fizikov-iyaf-so-ran-pomozhet-vybrat-material-dlya-modeli-termoyadernogo-reaktora>

Наука в Сибири: <http://www.sbras.info/articles/science/god-za-chas>

Наука в Сибири: <http://www.sbras.info/news/uchenye-iyaf-so-ran-razrabotali-unikalnoe-oborudovanie-dlya-prototipa-ekologicheski-chistogo-te>

Роснаука: http://rosnauka.org/news/institut_jadernoj_fiziki_imeni_g_i_budkera/2015-05-07-46

Информация об исследовательской инфраструктуре института, включая УНУ «Комплекс ДОЛ», доступна на странице «Исследовательская инфраструктура института» (<http://www.inp.nsk.su/activity/hw/index.ru.shtml>), на которую имеется прямая ссылка с главной страницы официального сайта ИЯФ СО РАН. На указанной странице в разделе «Основные уникальные научные установки и комплексы института» приведено краткое описание УНУ «Комплекс ДОЛ», состав (с указанием ссылок на страницы входящих в состав комплекса установок ГОЛ-3 и ГДЛ) и основные характеристики УНУ, основные направления проводимых с использованием УНУ исследований. Здесь же приведена информация о вхождении УНУ в национальный реестр скр-rf, указано о поддержке программы развития УНУ в рамках мероприятия 3.1.1 ФЦПР14-20 с соответствующей ссылкой на сайт Программы, указан уникальный идентификатор проекта. В этом же разделе детально описан порядок (регламент) доступа к УНУ заинтересованных пользователей, приведены формы писем, возможная форма договора на проведение работ (оказание услуг), указана контактная информация руководителя работ на УНУ.

Сведения о ходе выполнения работ по Соглашению доступны с титульной страницы официального сайта ИЯФ СО РАН в разделе «Деятельность и публикации ИЯФ» -> «Проекты в рамках ФЦП» (<http://www.inp.nsk.su/activity/fcp/index.ru.shtml>). Здесь указана основная (титульная) информация о проекте, а также приводится поэтапная информация о ходе и результатах выполнения работ по проекту, оформленная в соответствии с методическими рекомендациями заказчика ФЦПР14-20.

Мероприятие VI: Расширение перечня оказываемых с использованием УНУ услуг

В рамках этого мероприятия была обеспечена возможность проведения экспериментов по моделированию воздействия мощных импульсных потоков плазмы на конструкционные материалы.

Данная услуга становится возможной в полной мере после монтажа специализированной рабочей станции, финансирование проектирования и изготовления которой предусмотрено мероприятиями I и II.

В 2015 создан уникальный стенд (рис. 7) для исследования импульсного теплового воздействия на материалы стенки экспериментальных термоядерных реакторов и проведены первые в мире эксперименты по динамике эрозии вольфрама в процессе нагрева его поверхности мощным импульсным потоком тепла. Настоящая работа лежит в русле приоритетного направления развития науки РФ «энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и особенно актуальна сейчас, когда эрозия металлической стенки при импульсном тепловом воздействии на неё плазмы является одной из ключевых проблем в строящемся международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР. Ряд особенностей настоящего стенда позволят экспериментально промоделировать условия в ИТЭР и исследовать механизмы эрозии металла точнее, чем это было возможно на имеющихся в мире экспериментальных установках. Эти же особенности, отличающие созданный стенд от аналогичных установок, работающих в данной области науки в мире, показывают оригинальность и новизну подходов авторов проекта:

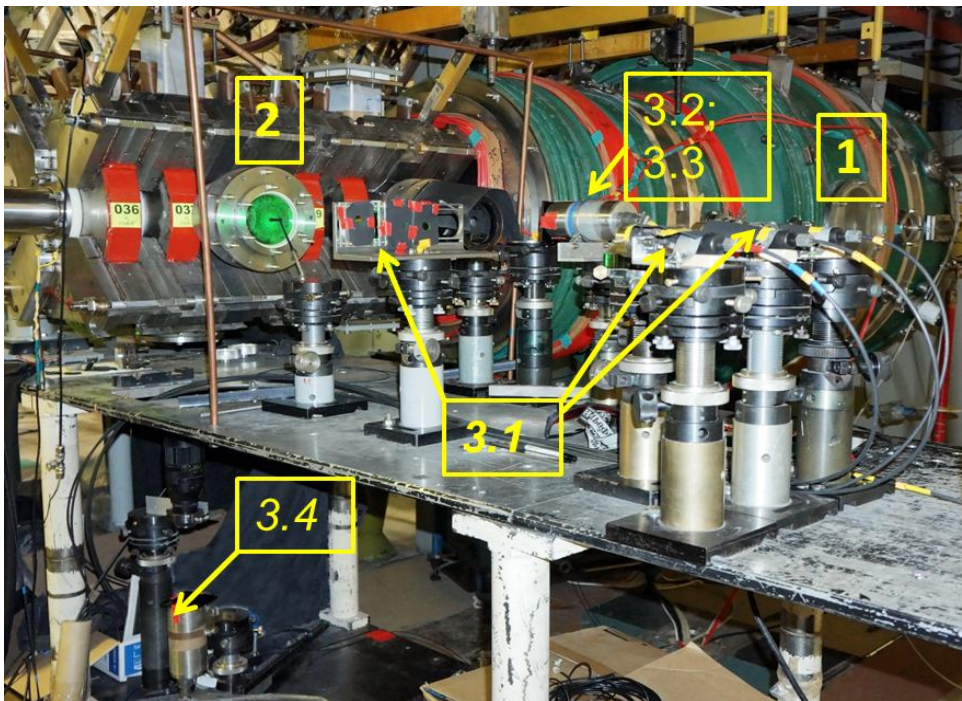


Рисунок 7 - Вид станда со стороны комплекса диагностик.

а) длинноимпульсный электронный пучок оригинальной разработки (общая мощность 5 МВт, длительность импульса ~ 0.2 мс, тепловая нагрузка 3 МДж/м^2) – удобный инструмент для экспериментального моделирования мощного импульсного нагрева поверхности материала стенки в экспериментальных термоядерных реакторах с магнитным удержанием плазмы;

б) уникальный для подобных экспериментов набор диагностик (скоростное фотографирование поверхности мишени в области ближнего инфракрасного излучения; скоростное фотографирование поверхности мишени в свете мощного непрерывного лазера 532 нм; регистрация рассеянного на малые углы (0.01-0.12 рад) излучения мощного непрерывного лазера; фотографирование быстрыми цифровыми камерами разлёта крупных частиц, спектроскопия факела разлета и т.д.).

Мероприятие VII: развитие внутренней и международной кооперации

В ходе выполнения данного мероприятия на 3 этапе исполнения Соглашения (июнь – декабрь 2015 года) были подписаны или актуализированы соглашения с 3 российскими и 5 зарубежными 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:

- Изучение нагрева и удержания в аксиально-симметричной ловушке (на установке ГДЛ) плазмы с высоким параметром b и большой долей высокоэнергетичных ионов (совместно с Университетом штата Висконсин, Мэдисон; Университет, Научно-техническим университетом Китая и др.).

- Генерация плазмы в линейной системе с дуговым источником. (Ядерный центр Карлсруэ, Германия).

- Экспериментальное исследование эмиссионного спектра абляционного факела, образованного на поверхности вольфрама при импульсном нагреве поверхностного слоя электронным пучком (Казахский национальный университет им. Аль-Фараби).

- Экспериментальное исследование спектрального состава излучения, выходящего из плазмы в области частот от 100 ГГц до 500 ГГц при релаксации в ней релятивистского электронного пучка с током около 10 кА (совместно с НГУ, Новосибирск).

- Изучение физики плазмы в экспандере открытой ловушки, влияние конечного расширителя на температуру основной плазмы (совместно с «ТриАльфаЭнерджи», США).

- Экспериментальное исследование транспортировки мощного электронного пучка субмиллисекундной длительности и его адиабатического сжатия магнитным полем на установке ГОЛ-3.

Мероприятие VIII: развитие кадрового потенциала

Мероприятие было направлено на развитие кадрового потенциала УНУ и, прежде всего, на закрепление талантливой молодежи в науке и подготовку кадров высшей квалификации.

На протяжении 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.

Работы по всем Мероприятиям выполнялись с использованием современной материально-технической базы и методик. Конструкторская, технологическая документация соответствует требованиям стандартов и создавалась с применением современных компьютерных средств проектирования и оформления конструкторской и проектной документации. Численные расчеты физических моделей по ходу выполнения НИР осуществлялись с применением апробированных и признанных в научном сообществе компьютерных кодов как собственной, так и сторонней разработки.

Работы по Соглашению выполнены в полном объеме, предусмотренном Планом-графиком исполнения обязательств. Полученные научно-технические результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню исследований в данной области.

Модернизация установок, а также создание новых образцов научного оборудования и приборов, в силу уникальности предъявляемых требований, осуществлялись преимущественно на базе собственных производственных мощностей ИЯФ СО РАН с использованием покупных оборудования, материалов и комплектующих.

Полученные в ходе выполнения Соглашения результаты и разработанное научное оборудование ориентированы преимущественно на применение в научно-исследовательских целях и не предусматривают непосредственной коммерциализации