

ИТОГИ 2021 ГОДА И ПЛАНЫ НА 2022 ГОД

**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
«РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ
УПРАВЛЯЕМОГО
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА
И ИННОВАЦИОННЫХ
ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

КОМПЛЕКСНАЯ ПРОГРАММА «РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ, ТЕХНОЛОГИЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2024 ГОДА»

I	Федеральный проект «Разработка технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом»	
II	Федеральный проект «Создание современной экспериментально-стендовой базы для разработки технологий двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом»	
III	Федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий»	
1	Управляемый термоядерный синтез и инновационные плазменные технологии	3
2	Создание токамака мирового уровня с тритиевым комплексом	5
3	Создание макета модуля драйвера для лазерного термоядерного синтеза с диодной накачкой	11
4	Создание и испытание перспективных конструкций и технологий первой стенки и дивертора термоядерного реактора	15
5	Создание компактных интенсивных источников нейтронов на основе плазменных технологий	19
6	Создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения	23
7	Создание прототипов плазменных ракетных двигателей с повышенными параметрами тяги и удельного импульса	27
IV	Федеральный проект «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем»	
V	Федеральный проект «Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий»	



▲ Стенд лазерной интерферометрии, на котором испытывают клапаны для электрореактивного двигателя, ГНЦ РФ ТРИНИТИ

1 /

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в рамках комплексной программы РТТН стартовал 1 января 2021 года и продлится до 31 декабря 2024 года. Федеральный проект призван обеспечить материальную базу для разработки термоядерных и плазменных технологий с целью создания на их основе практически неисчерпаемых экологически чистых источников энергии, источников частиц и излучений различных назначений, мощных плазменных двигателей для космических аппаратов, инновационного оборудования для медицины, машиностроения, микроэлектроники и других наукоемких отраслей экономики.



ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ ПРОЕКТА:

- развитие передовых отечественных базовых, гибридных реакторных и лазерных технологий управляемого термоядерного синтеза;
- создание энергетической инфраструктуры токамака нового поколения;
- сооружение элементов уникального мультитераваттного ($> 10^{15}$ Вт) лазерного комплекса;
- создание инновационных плазменных технологий и образцов новой техники с характеристиками, превышающими мировой уровень, для внедрения в высокотехнологические отрасли промышленности.

Наиболее дорогостоящая часть федерального проекта — модернизация существующей инфраструктуры и создание новых экспериментальных объектов и установок. Например, одна из ключевых установок — токамак Т-15МД (физический запуск состоялся 18 мая 2021 года в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт») — должна быть доукомплектована системами дополнительного нагрева, диагностики, сбора и обработки данных, генерации тока и другими элементами.



Виктор ИЛЬГИСОНИС,
директор направления
научно-технических исследований
и разработок ГК «Росатом»



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ ФП-3 — ЭТО ЕДИНСТВЕННАЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ ЦЕЛОСТНАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ. РЕАЛИЗАЦИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА В НАШЕЙ СТРАНЕ ПОЗВОЛИТ СДЕЛАТЬ СУЩЕСТВЕННЫЙ ШАГ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ — САМОЙ АМБИЦИОЗНОЙ ЗАДАЧИ, ПОСТАВЛЕННОЙ ЧЕЛОВЕЧЕСТВОМ В XX ВЕКЕ»

2/

СОЗДАНИЕ ТОКАМАКА МИРОВОГО УРОВНЯ С ТРИТИЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ

Экспериментальной термоядерной установкой следующего поколения станет токамак с реакторными технологиями (ТРТ). Его планируется построить в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» к 2030 году. Проект ТРТ будут разрабатывать организации Росатома и НИЦ «Курчатовский институт» в содружестве с институтами РАН, подведомственными Минобрнауки России. К концу 2024 года планируется создать инфраструктуру для будущей установки: комплекс ударных генераторов, систему охлаждения и прочее.

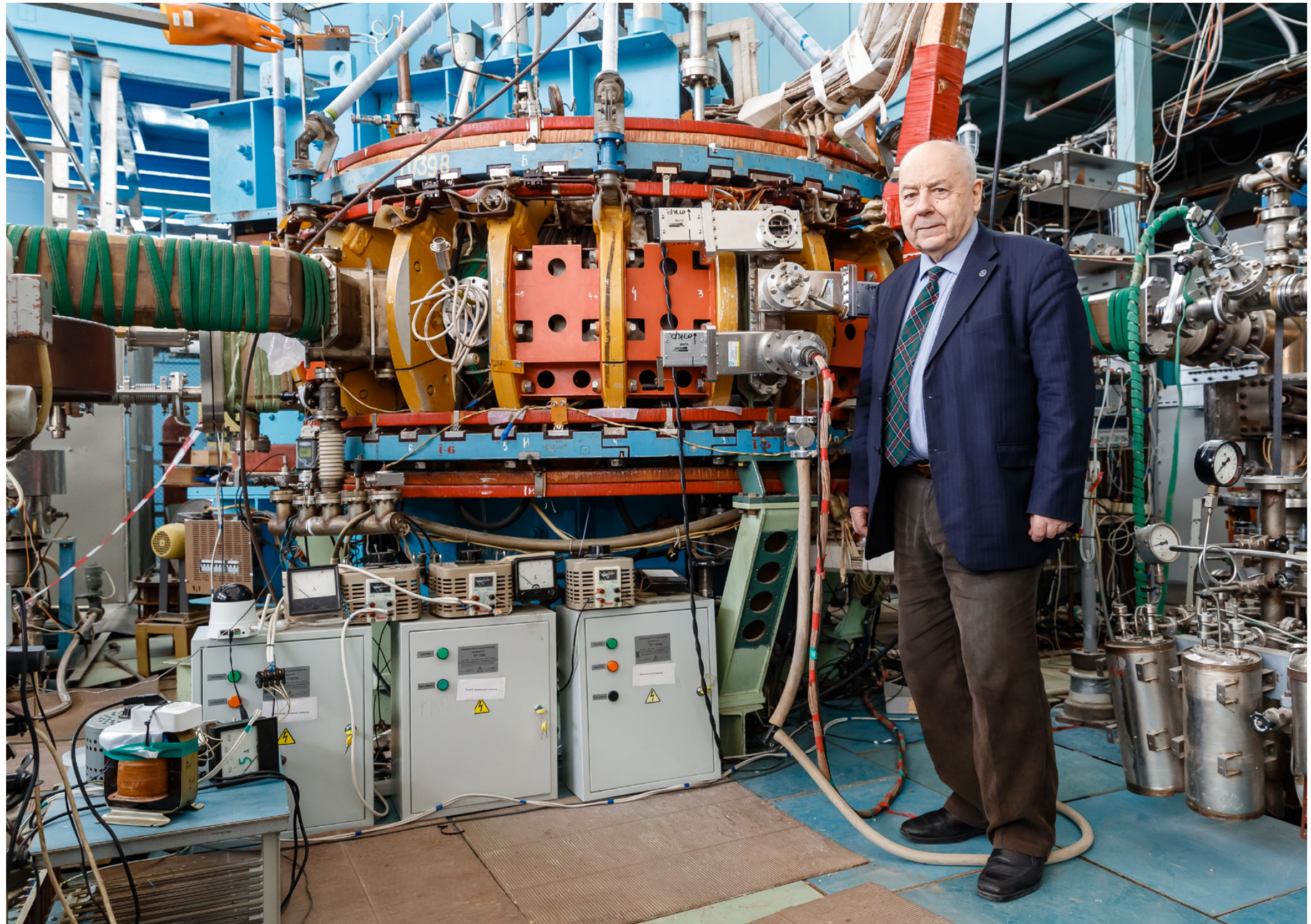
В 2021 году перед разработчиками стояла задача подготовить научно-техническое обоснование и провести стендовую экспериментальную верификацию эффективности технологических систем пускового комплекса модифицированного токамака с сильным полем (ТСП) — установки для магнитного удержания плазмы. В частности, планировалось верифицировать технологические схемы энергетики и энергоснабжения, устройств электропитания магнитных обмоток, систем водяного и криогенного охлаждения, дополнительного нагрева и пусковых диагностик, разработать эскизный проект и экспериментальное обоснование технических решений составных частей тритиевого комплекса для модифицированного ТСП.

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА

Определены диапазоны изменения токов в обмотках тороидального и полоидального полей в процессе развития разряда для инфраструктурного проектирования систем энергоснабжения и криогенного охлаждения ТСП.

Разработаны и обоснованы технические требования к системам ввода и вывода энергии из электромагнитных систем токамака следующего поколения в рамках проектирования систем энергоснабжения и энергопотребления.

▶ Начальник
отдела физики
экспериментальных
токамаков
ГНЦ РФ ТРИНИТИ
Сергей Мирнов
рядом с Т-11М —
единственным
среднеразмерным
действующим
токамаком в России



Разработаны исходные технические требования к основным инженерно-техническим системам ТРТ, включая: высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), электромагнитную систему, вакуумную камеру, дивертор, систему вакуумной откачки и поддержания рабочего давления, систему криостатирования, систему магнитного управления положением и формой плазменного шнура.

Разработано научно-техническое обоснование стендовой базы, в частности технических требований к энергоснабжению и инженерному обеспечению испытательного стенда инжекционного нагрева ТРТ и стенда ионно-циклотронного нагрева токамака; разработаны обоснование и технические требования к робототехническим системам с целью подготовки исходных данных для модернизации инфраструктуры; разработаны технические требования к инженерному обеспечению стендов сверхвысокочастотной (СВЧ) и рентгеновской диагностик, болометрии и электромагнитной диагностики, лазерной диагностики.

Разработан эскизный проект и проведено экспериментальное обоснование технических решений составных частей тритиевого комплекса для модифицированного ТСП.



Николай Родионов,
руководитель проекта
модифицированного ТСП



«**КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ, СИСТЕМ И УЗЛОВ
МЫ БУДЕМ ПРОВЕРЯТЬ НА ВИРТУАЛЬНОЙ
МОДЕЛИ, ПРЕЖДЕ ЧЕМ ЗАКАЗЫВАТЬ
ИЗГОТОВЛЕНИЕ. МОДЕЛЬ ТАКЖЕ ПОМОГАЕТ
ОТРАБАТЫВАТЬ МОНТАЖНЫЕ ОПЕРАЦИИ**»

Выбраны оптимальные системы водяного охлаждения объектов инфраструктуры ТСП.

Разработана система тлеющего разряда кондиционирования вакуумной камеры.

Обоснованы и разработаны функциональные схемы отдельных диагностических систем, определены типы датчиков, отвечающих техническим требованиям к пусковым системам диагностики проектируемого токамака, а также основные технические требования к системам регистрации пусковых систем диагностики токамака.

Проведено физическое обоснование операционных пределов, выработаны требования к предельно допустимым электромеханическим и тепловым нагрузкам на элементы конструкции, а также к дополнительным системам нагрева (ионно-циклотронный и инжекционный нагрев) и поддержания тока плазмы, интеграции базовых инженерно-физических систем ТРТ в единую установку.

Изготовлены и испытаны макеты с медно-стальной композицией для отработки технологии и конструктивных решений теплоотводящих элементов для токамака с реакторными технологиями.

Кроме того, в конце 2021 года в ГНЦ РФ ТРИНИТИ был запущен VR-комплекс для конструкторов, позволяющий оказаться внутри токамака.

ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Создать инфраструктуру для перспективных токамаков, разработать эскизный проект ТРТ. В частности:

- на базе одного из зданий ГНЦ РФ ТРИНИТИ создать инфраструктуру испытательного комплекса для перспективных токамаков с большим радиусом около 2 м и их элементов;
- создать систему энергетики и энергоснабжения, способную обеспечить подачу до 800 МВт электрической мощности в течение 5 с, сетевую мощность до 250 МВт на новой элементной базе;
- создать криогенную азотную систему (контур с максимальным расходом азота 1700 кг/с);
- разработать паспорт технологии тритиевого цикла (технологический регламент);
- создать систему водяного охлаждения (расход не менее 500 м³/ч);
- разработать эскизный проект и конструкторскую документацию ТРТ с электромагнитной системой (ЭМС) на базе ВТСП (ток плазмы 2–5 МА, большой радиус плазмы, 2–2,2 м, магнитное поле 7–8 Тл, длительность более 100 с, мощность дополнительного нагрева 20–50 МВт).



3 / СОЗДАНИЕ МАКЕТА МОДУЛЯ ДРАЙВЕРА ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Принцип лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) — в поджиге (микровзрыве) путем обжатия лазерным излучением термоядерной мишени за время, меньшее времени ее разлета. ЛТС разрабатывается как альтернатива методу магнитного удержания плазмы и позволяет изучать пространственно-временную структуру материи и новые явления на стыке физики высоких энергий и сверхсильных полей. Новый подход в ЛТС связан с исследованиями эффективности импульсно-периодической схемы воздействия на мишень; разрабатывается модуль импульсно-периодического драйвера для ЛТС с диодной накачкой.

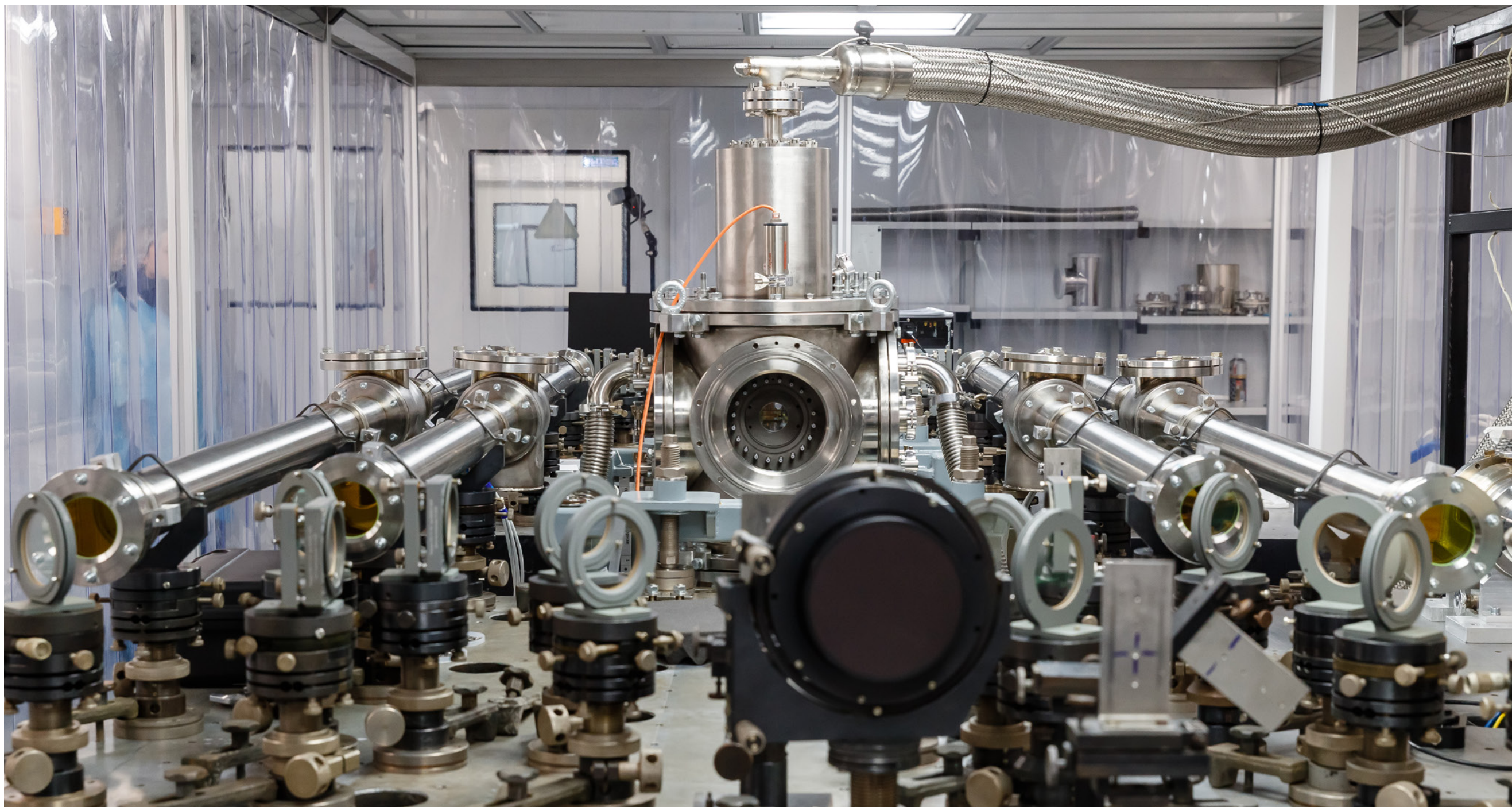
В 2021 году требовалось обеспечить постановку задачи создания канала лазерной установки с энергией в импульсе 10 кДж и частотой повторения 10 Гц, а также разработать технические требования к системам и узлам макета экспериментального образца усилительного модуля для исследования режимов его работы. Другая группа задач касалась разработки оптической схемы стенда для исследований экспериментального образца усилительного модуля.

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА

Подготовлено расчетно-теоретическое обоснование типа активной среды, способа охлаждения, вариантов конфигурации силового усилителя канала лазерной установки с диодной накачкой с энергией в импульсе 10 кДж и частотой повторения 10 Гц.

Разработаны технические задания к системам охлаждения и накачки активных элементов макета экспериментального образца усилительного модуля, а также к его активным элементам.

Разработана оптическая схема стенда для исследований экспериментального образца усилительного модуля.



ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Создать и исследовать устройства и технологии модуля драйвера для ЛТС: экспериментальные образцы усилительного модуля килоджоульного класса (10 Гц), диодной накачки и системы охлаждения.

▲ Экспериментальный образец усилительного модуля (в центре). Это камера, обеспечивающая крепление активного элемента (ключевая часть лазера) и его охлаждение

4/ СОЗДАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Первая стенка термоядерного реактора испытывает самое разрушительное воздействие горячей плазмы. Чтобы ослабить его, в ГНЦ РФ ТРИНИТИ предлагают использовать инновационную жидкометаллическую литиевую защиту.

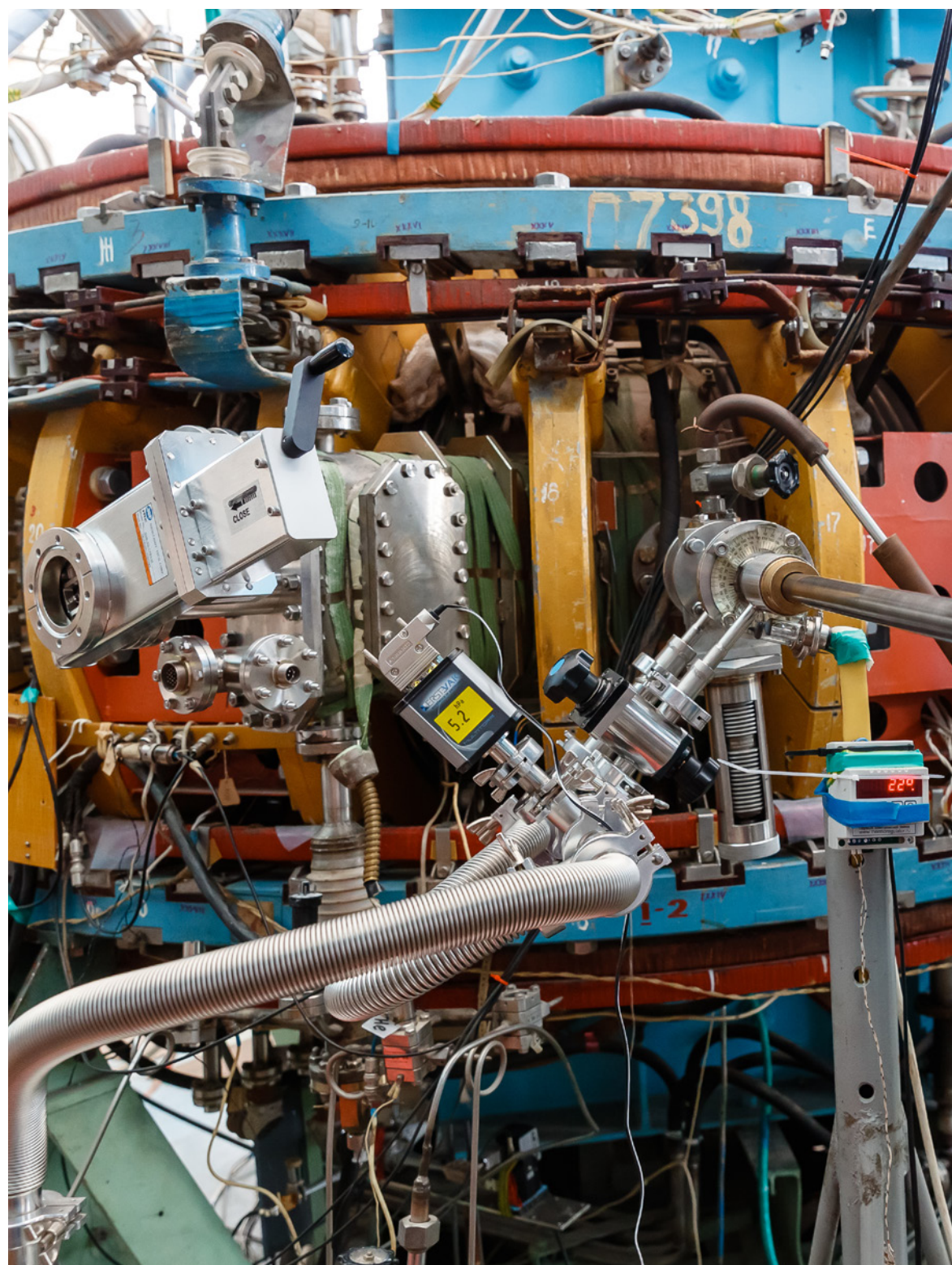
В ходе совместных работ специалистам ГНЦ РФ ТРИНИТИ и АО «Красная Звезда» (входят в структуры Росатома) впервые удалось осуществить внешнюю дозаправку эмиттерной системы токамака Т-11М литием без нарушения вакуумных условий в его рабочей камере. Ученые рассчитывают снабдить литиевой защитой недавно созданный в НИЦ «Курчатовский институт» токамак Т-15МД, а впоследствии и ТРТ.

В соответствии с проектной задачей, разработка должна обеспечить мировое лидерство Росатома в технологиях создания возобновляемой первой стенки термоядерного реактора. Основные цели проекта — разработка, создание и исследование на действующем токамаке технологии циркуляции жидкого лития в вакуумной камере и устройств ввода и вывода лития из токамака без его разгерметизации для обеспечения длительного рабочего ресурса литиевой защиты как в квазистационарном, так и в стационарном режимах.

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА

Получены результаты исследования параметров инжектора мелкодисперсного лития на токамаке Т-11М, включая значения среднего размера частиц лития, скорости их инжекции и производительность инжектора.

Получены результаты экспериментов в части регистрации временной эволюции жесткого рентгеновского излучения, обусловленного ускоренными электронами, и определения зависимости генерации такого излучения от состояния первой стенки и вакуумной камеры Т-11М.



▲ Токамак Т-11М — единственный среднеразмерный действующий сейчас токамак в России, ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Разработано техническое предложение устройства удаления лития со стенок камеры токамака.

Разработан эскизный проект макета приемной пластины литиевого дивертора токамака Т-15МД с системой термостабилизации.

Разработан эскизный проект стационарно работающего литиевого лимитера для экваториального порта токамака Т-15МД.

Получены результаты исследований радиационных потерь на токамаке Т-11М при инжекции лития, определяющие величину мощности интегральных излучательных потерь плазменного шнура в режимах работы токамака при различных уровнях инжекции лития.

ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Планируется разработать и испытать полный набор систем и технологий литиевой защиты первой стенки термоядерного реактора, продемонстрировать эффективность разработок в ходе экспериментов на токамаках.

В частности, будут созданы и испытаны перспективные устройства и технологии для токамака: лимитер, коллектор, инжектор, элемент литиевого дивертора, технологии первой стенки и дивертора перспективного термоядерного реактора, включая жидкометаллические. Эти литиевые устройства и технологии предположительно смогут работать в квазистационарном режиме (более 10 с) при тепловой нагрузке до 10 МВт/м² с внешней подпиткой литием, обеспечивая:

- длительный период экспериментального цикла (не менее одного года);
- низкий уровень примесей в плазме токамака ($Z_{эфф}$ не более 1,2);
- более равномерное перераспределение тепловых потоков за счет переизлучения на литии и, соответственно, значительное снижение тепловой нагрузки на дивертор (не менее чем в три раза);
- стационарный режим работы до 1000 с.

► Чекушин Роман, инженер. Первая стенка термоядерного реактора испытывает самое разрушительное воздействие плазмы. Чтобы ослабить его, в ГНЦ РФ ТРИНИТИ предлагают использовать инновационную жидкометаллическую литиевую защиту





▲ ГНЦ РФ ТРИНИТИ создает мощный нейтронный источник на основе столкновения плазменных сгустков

5/ СОЗДАНИЕ КОМПАКТНЫХ ИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Источник нейтронов мегаэлектронвольтового (МэВ) диапазона создается на основе плазменных ускорительных технологий. Два ускорителя направляют пучки плазмы навстречу друг другу, при столкновении происходит реакция ядерного синтеза. На этом принципе можно создать достаточно компактный и мощный источник высокоэнергичных нейтронов.

Сфера применения метода очень широка: решение материаловедческих задач термоядерной энергетики, получение изотопной продукции и т.д. В ГНЦ РФ ТРИНИТИ идет сборка первого ускорителя системы. В 2022 году на нем проведут лабораторные эксперименты, затем изготовят второй.

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА

Разработана рабочая конструкторская документация экспериментального образца камеры встречного взаимодействия для источника нейтронов на базе столкновения плазменных сгустков.

Разработана рабочая конструкторская документация экспериментального образца камеры для транспортировки плазменных сгустков от ускорителя до камеры взаимодействия.

Изготовлен экспериментальный образец камеры взаимодействия для источника нейтронов на базе столкновения плазменных сгустков.

Изготовлен экспериментальный образец камеры для транспортировки плазменных сгустков.

Изготовлен блок питания плазменного ускорителя на базе высоковольтного емкостного накопителя с высоковольтными коммутаторами и зарядным устройством.

Произведена сборка экспериментального стенда для измерений параметров плазменных сгустков, генерируемых лабораторным образцом плазменного ускорителя.

Создан комплекс диагностических средств, включающий средства для измерения тепловых потерь на стенках камер столкновения и транспортировки.

Измерены параметры плазменных сгустков, генерируемых лабораторным образцом плазменного ускорителя.

ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Будет разработана лабораторная установка, демонстрирующая продуктивность научно-технического решения, и проведены испытания плазменного источника нейтронов мегаэлектронвольтового диапазона энергий для осуществления программы радиационных испытаний кандидатных материалов термоядерных и гибридных реакторных систем, эффективного решения задач ядерной медицины и ряда специальных приложений. Создание надежных образцов таких источников — задача мирового уровня, решение которой укрепит положение России в числе пяти стран-лидеров в области термоядерных и плазменных технологий.



► Василий Немчинов — руководитель проекта разработки мощного источника нейтронов



▲ Инженер Даниил Бурмистров работает с мишенной камерой рентгеновского источника

6/ СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОТОКАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ученым давно известно, что обработка поверхностей материалов лазером или плазмой способна менять их свойства, в частности повышать коррозионную стойкость и прочность металлов. Такие материалы востребованы в авиации, космической сфере, атомной энергетике, медицине и других отраслях. Цель текущих исследований — оценить преимущества режимов комплексной лазерно-плазменной обработки, сделать ее результат предсказуемым.

Проектная задача: изготовление промышленных установок для комплексной обработки деталей. В 2021 году усилия были сосредоточены на разработке методов повышения коррозионной стойкости поверхностных слоев конструкционных материалов (преимущественно различных марок стали) с использованием импульсных потоков плазмы и лазерного излучения (лазерного наклепа).

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА

Выбраны рабочие параметры плазменного ускорителя типа «Z-пинч» по давлению плазмообразующего газа в рабочей камере, напряжению питания плазменного ускорителя и наружному диаметру образца для плазмообразующих газов (гелий, азот, водород), в которых достигается плавление поверхностного слоя стальных образцов.

Выбраны рабочие параметры квазистационарного плазменного ускорителя по напряжению питания плазменного ускорителя и длительности плазменного воздействия для плазмообразующих газов, в которых достигается плавление поверхностного слоя стальных образцов.



Получены результаты коррозионных испытаний образцов конструкционных сталей Ст45, 40Х, 65Г, 40ХН2МА, ШХ15.

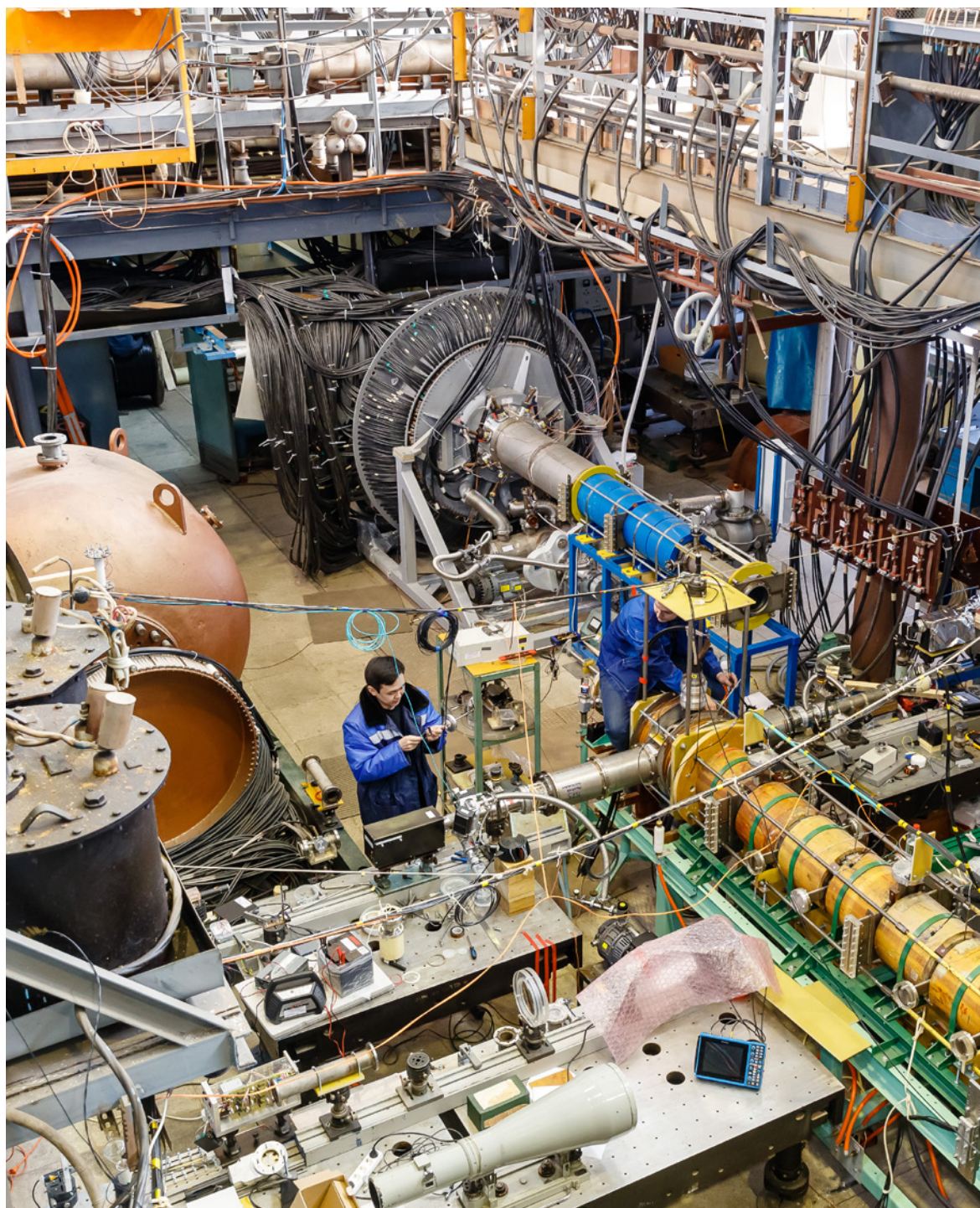
Разработана рабочая конструкторская документация на систему импульсного энергоснабжения излучателя установки для лазерного наклепа.

Изготовлена система импульсного энергоснабжения излучателя установки для лазерного наклепа.

ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Создать опытные образцы промышленных установок по упрочнению материалов.

◀ Кусочек космоса в лаборатории — вакуумная камера



▲ В ГНЦ РФ ТРИНИТИ создается мощный нейтронный источник на основе столкновения плазменных сгустков. На снимке – первый ускоритель системы. Позже в ней будет два ускорителя, «стреляющих» пучками плазмы навстречу друг другу. При столкновении пучков будут происходить реакции ядерного синтеза с выходом высокоэнергичных нейтронов. Основное применение источника — испытание материалов для термоядерного реактора

7/ СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПОВ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЯГИ И УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Задача, стоящая перед разработчиками: представить лабораторный прототип ракетного двигателя на базе магнитоплазменного ускорителя. За счет этой разработки планируется обеспечить превосходство России в космических технологиях. От разработчиков потребуются реализовать на практике режимы ускорения плазменного потока в ускорителе с достижением удельного импульса не менее 100 км/с (эта задача была решена в 2021 году).

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИТОГАМ 2021 ГОДА*

Получены экспериментальные данные по пространственной структуре и динамике плазменного потока квазистационарного плазменного ускорителя.

Разработан и изготовлен ускоритель плазмы с удельным импульсом не менее 100 км/с и проведены его испытания.

Получены экспериментальные данные по характеристикам ускорителя плазмы для различных газов.

Разработана расчетная модель ускорительной ступени плазменного ракетного двигателя (ПРД).

Проведены испытания средства диагностики, получены экспериментальные данные по условиям плазменного воздействия в имитационной установке с дугой низкого давления: скорости эрозии материалов, максимально достижимым концентрацией и степени ионизации плазмы сильнооточного импульсного магнетронного разряда.

* Часть работ была выполнена силами НИЦ «Курчатовский институт».

Испытана система охлаждения катушки магнитного поля без использования жидких криоагентов.

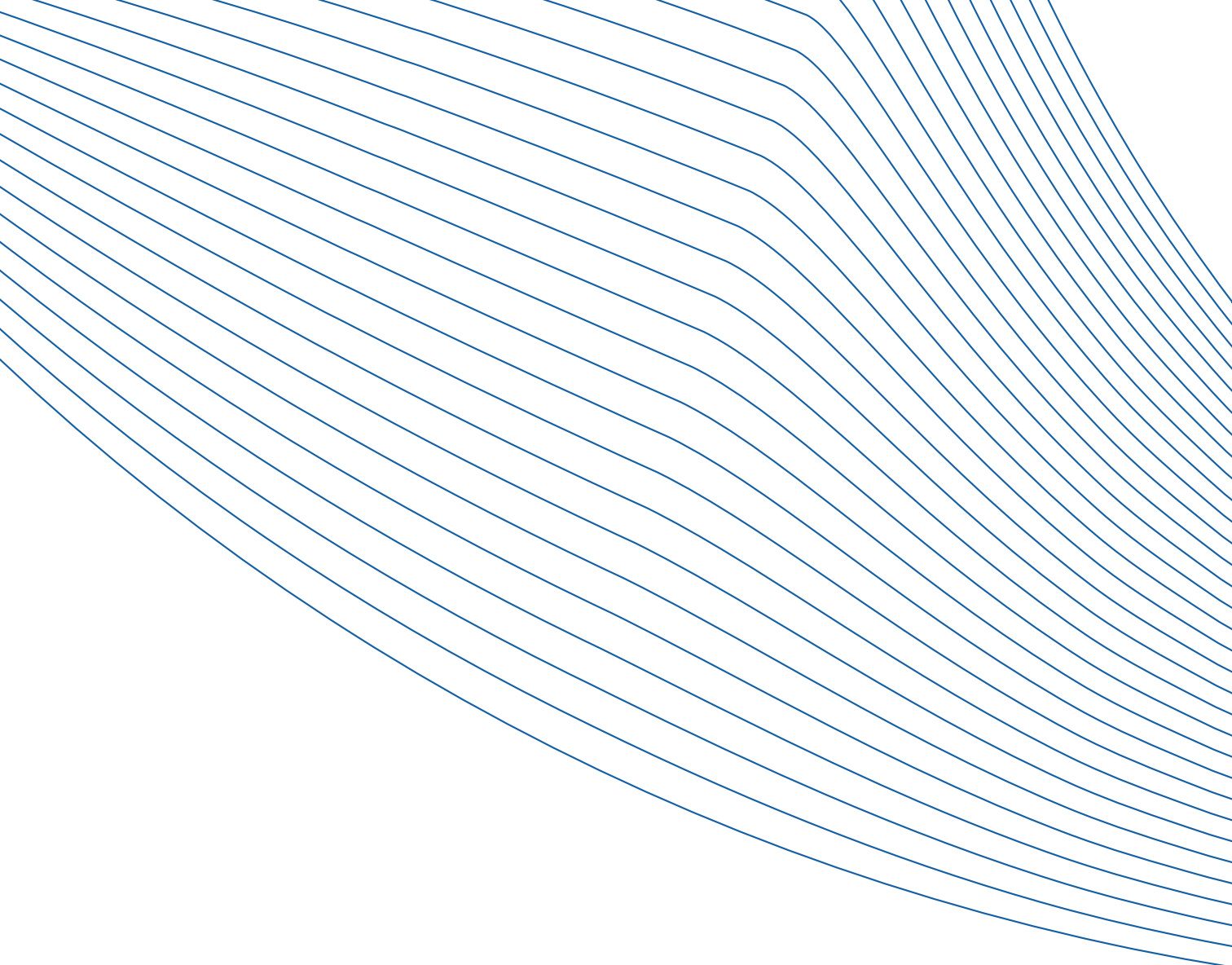
Получены экспериментальные данные по характеристикам плазмы для различных газов в ступени предварительной ионизации.

Испытаны элементы стендовой базы мощных ПРД.

ПЛАН РАБОТ ДО 2024 ГОДА

Создать прототип плазменного ракетного двигателя нового типа на базе магнито-плазменного ускорителя с характеристиками:

- мощность в потоке — 300 кВт;
- удельный импульс — 100 км/с;
- тяга — 6 Н;
- расход — 60 мг/с;
- КПД — выше 60 %;
- диаметр — до 30 см;
- ресурс — $5 \cdot 10^7$ Н·с (2,4 тыс. ч при заданных параметрах потока, или $8,5 \cdot 10^6$ импульсов).



POCATOM