

УДК 001.892:621.039.6

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРИНИТИ В РАМКАХ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА И ИННОВАЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Д.В. Марков, К.И. Ильин

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «ТРИНИТИ», г. Троицк, Россия

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» является одной из базовых площадок реализации мероприятий проекта по «Разработке технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». В настоящей статье кратко описаны направления исследований, реализуемых в проекте на площадке Института.

Ключевые слова: термоядерные исследования, управляемый термоядерный синтез.

1. Введение

Правительство РФ в конце 2020 г. утвердило комплексную программу «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года» (далее – Программа). Программа объединяет в себе наиболее важные реализуемые либо планируемые к реализации мероприятия в области научных исследований и разработки ядерных, термоядерных и смежных технологий, создания новой техники, строительства инновационных энергоблоков АЭС большой и малой мощности, выполняемые предприятиями и организациями атомной отрасли в тесной кооперации с другими ведущими российскими научными и образовательными организациями и промышленными предприятиями. Программа состоит из пяти федеральных проектов.

Федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» (далее – Проект) – это единственная за последние 30 лет целостная программа развития по управляемому термоядерному синтезу. Реализация федерального проекта позволит сделать существенный шаг к решению проблемы освоения и использования термоядерной энергии – самой амбициозной задачи, поставленной человечеством в XX в.. Компонировка мероприятий федерального проекта обеспечивает сбалансированное продвижение к термоядерной энергетике вне зависимости от возможного изменения лидерства конкурирующих технологий по мере развития мировых термоядерных исследований.

Настоящий Проект включает набор мероприятий, обеспечивающих к 2024 г. основу развития научно-исследовательской инфраструктуры, выполнения научных исследований и разработок, совершенствования системы информационного обмена в Российской Федерации в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» (далее – Институт) является одной из базовых площадок реализации мероприятий Проекта. В настоящей статье кратко описаны направления исследований, реализуемых в рамках третьего федерального проекта Программы на площадке Института.

2. Постановка задачи

Очевидная привлекательность использования энергии реакций синтеза легких ядер для энергетики объясняет, почему, несмотря на многолетние, весьма дорогостоящие усилия ученых и инженеров, до сих пор не приведшие к устойчиво работающему реактору, ведущие страны мира продолжают финансировать термоядерные исследования. К основным достоинствам управляемого термоядерного синтеза (далее – УТС) следует отнести:

практически неограниченные топливные ресурсы, а также возможность наработки топлива для действующих АЭС;

- отсутствие, как и для атомных электростанций, выбросов в атмосферу окислов углерода и азота;

- в термоядерном реакторе не может иметь место неконтролируемый рост мощности;

- низкое остаточное энерговыделение в материалах реактора после его остановки позволяет обеспечить целостность конструкции в случае прекращения активного охлаждения;

- в термоядерном реакторе не образуются и, соответственно, не участвуют в топливном цикле делящиеся материалы и актиниды;

- в отработавших материалах отсутствуют продукты деления;

- радиоактивность материалов термоядерного реактора достаточно низка, что сводит к минимуму необходимость принятия дополнительных мер по изоляции части материалов непосредственно на площадке реактора;

- даже при маловероятных запроектных авариях на термоядерной электростанции не потребуется эвакуация населения из прилегающих районов, т. к. такая авария в самом пессимистическом сценарии приведет лишь к выходу из строя самой термоядерной установки, а не к радиоактивному заражению местности.

Стабильное развитие отдельных стран и регионов требует обеспечения достаточным количеством производимой энергии по доступной стоимости. Развитие различных регионов идет разными темпами, и требования к источникам энергии и инфраструктуре энергетики будут отличаться. В этих условиях производство термоядерной энергии может быть реализовано в то время, когда перспективы использования других источников энергии в конкретной стране или в мире в целом могут существенно ухудшиться.

Сегодня все смотрящие вперед державы считают необходимым участие в термоядерных исследованиях, которые ведутся на самом передовом рубеже мировой науки и технологий.

Начало широкомасштабных работ по данной тематике в ходе реализации Программы позволит получить и внедрить в России передовые наукоемкие технологии, сохранить и развить существующие научные школы и систему подготовки кадров для будущей термоядерной энергетики. Условно весь Проект можно разделить на пять направлений исследований (рис. 1).



Рисунок 1. Структура Проекта.

2.1 Исследования и разработки по базовым термоядерным технологиям

Технологии магнитного удержания высокотемпературной термоядерной плазмы в установках ТОКАМАК называются базовыми термоядерными технологиями. В рамках данного направления в Институте разрабатывают, создают и исследуют на действующем токамаке Т-11М технологии циркуляции жидкого лития в вакуумной камере установки токамак и технологии ввода и вывода лития из токамака без его разгерметизации в целях обеспечения длительного режима непрерывной работы до 1000 с и достижение рабочего эксплуатационного ресурса литиевой защиты до 1000 ч. Совместно с партнерами НИЦ «Курчатовский институт» и АО «Красная звезда» ведется разработка концепции использования литиевой технологии защиты для токамака Т-15МД и в перспективе для токамака с реакторными технологиями (далее – ТРТ).

В 2021 г. в ходе совместных работ специалистам Института и АО «Красная звезда» впервые удалось осуществить внешнюю дозаправку эмиттерной системы токамака Т-11М литием без нарушения вакуумных условий в его рабочей камере.

Созданная в рамках данного направления работ инновационная технология литиевой защиты первой стенки реактора и дивертора позволит сделать качественный шаг для достижения реакторных режимов работы ТОКАМАКа.

Также в целях развития базовых термоядерных технологий будут проведены работы по реконструкции комплекса токамака с сильным полем на площадке Института, в т. ч. его инженерно-технических систем: энергетической, вакуумной, криогенной и др. Данные работы позволят обеспечить размещение на базе комплекса прототипа ТРТ до 2030 г.

Реализация этого раздела федерального проекта выведет Россию в число мировых лидеров в области базовых термоядерных технологий.

2.2 Исследования и разработки по гибридным реакторным технологиям и системам

В России разработки и исследования в области УТС развиваются в направлениях освоения энергии как «чистого» термоядерного синтеза, так и в сфере создания гибридных систем. Концепцию гибридного реактора следует рассматривать в увязке с ключевыми проблемами атомной энергетики по обеспечению ее устойчивого развития и замыкания топливного цикла. Главное преимущество гибридного термоядерного реактора по сравнению с любой другой ядерной установкой, обеспечивающей конверсию сырьевых изотопов в делящиеся, заключается в использовании термоядерных нейтронов высокой энергии, что позволяет почти в десять раз увеличить интенсивность наработки новых делящихся изотопов из сырьевых при одинаковой мощности установок. Это важнейшее качество приводит к тому, что присутствие гибридных термоядерных реакторов в структуре ядерной энергетической системы можно ограничить небольшой долей (менее 15 %) и при этом в полном объеме решить проблему обеспечения топливом. Реакторы деления, составляющие основу существующей атомной энергетики, будут обеспечены делящимися изотопами, произведенными в гибридных реакторах. Одновременно с этим гибридные реакторы будут обеспечены тритием, нарабатанным в реакторах деления. Вторая возможная задача гибридных реакторов – высокоэффективное дожигание минорных (младших) актинидов, накапливающихся в результате работы ядерных реакторов.

Выполнение мероприятий в рамках направления «Исследования и разработки по гибридным реакторным технологиям и системам» федерального проекта откроет путь к последующему созданию первой в мире гибридной реакторной установки – прообразу гибридного реактора для ускорения промышленного внедрения термоядерных технологий в действующую систему атомной энергетики. Задачей такого реактора видится использование термоядерных нейтронов для эффективной наработки топлива для атомных станций и переработки ОЯТ.

В Институте совместно с партнерами в рамках данного направления исследований ведутся работы по обоснованию и созданию тритиевого комплекса на базе модифицированного комплекса токамак с сильным полем. В 2021 г. была разработана эскизная конструкторская документация и экспериментально обоснованы технические решения составных частей тритиевого комплекса, которые обеспечивают:

- стыковку с системой хранения трития;
- очистку трития от примесей до объемных концентраций гелия $\leq 1\%$, кислорода, азота и углерода $\leq 10\text{-}2\%$;
- концентрацию примеси в отработанной плазме может быть на уровне 9 %, причем 3 % из них приходится на водородосодержащие вещества;
- максимальную величину газового потока из плазменной камеры составит 5 моль/ч;
- максимальную концентрацию трития в газовом потоке из плазменной камеры составит несколько десятков ppm (по объему);

- дозирование кондиционного трития в систему ВТК;
- измерение и контроль давления газа в системе в диапазоне 10-5–105 Па;
- измерение и контроль обогреваемого оборудования;
- проведение дейтерирования и дезактивации оборудования;
- учет и контроль трития.

В рамках межведомственной кооперации будет создан уникальный комплекс экспериментальных стендов для отработки гибридных технологий.

2.3 Лазерный термоядерный синтез и технологии

Несколько особняком стоят работы по инерционному (лазерному) термоядерному синтезу, принцип которого состоит в поджиге (микровзрыве) термоядерной мишени за время, меньшее времени ее разлета. Инерционный (лазерный) термоядерный синтез, разрабатываемый как альтернатива методу магнитного удержания, обеспечивает решение ряда специальных задач и продвижение в области фундаментальной науки – изучения пространственно-временной структуры материи и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей.

В рамках направления «Лазерный термоядерный синтез и технологии» федерального проекта будут разработаны, изготовлены и испытаны все основные элементы создаваемого уникального лазерного комплекса, включая модули с мощностью 15 петаватт каждый и инженерную инфраструктуру лазерного комплекса.

Лазерная установка для экспериментов по управляемому термоядерному синтезу с инерциальным удержанием плазмы создается в Сарове. ТРИНИТИ – партнер ядерного центра в проекте. В настоящий момент работы ведутся на исследовательском стенде для изучения физических процессов и явлений, возникающих при диодной накачке и активном газовом криогенном охлаждении. На данной экспериментальной стендовой базе проводятся моделирование и испытание лазерных схем и отрабатываются подсистемы установки криогенного охлаждения, удаленной диодной накачки и др. Итогом работ будет разработка, создание и исследование экспериментального образца усилительного модуля с диодной накачкой с частотой повторения импульсов 10 Гц для отработки физических принципов, концепций и конструкторских решений создания модуля лазерной установки килоджоульного класса и на их основе разработка концепции создания канала лазерной системы с энергией в импульсе 10 кДж.

2.4 Разработка инновационных плазменных технологий, в т. ч. опытно-промышленных

Большое внимание в Проекте уделено развитию плазменных технологий. Выполнение мероприятий по направлению «Разработка инновационных плазменных технологий, в том числе опытно-промышленных» позволит продемонстрировать продуктивность термоядерной науки путем разработки устройств и технологий, пригодных для освоения промышленностью на современном этапе. Будут разработаны образцы промышленных установок по нанесению технологических покрытий различного назначения, технологии создания компонент радиационно стойкой электронной элементной базы на основе монокристаллических алмазов, полностью отечественные высокотемпературные сверхпроводники и др. Будет сделан качественный скачок в разработке и создании мощных плазменных ракетных двигателей нового поколения со значениями параметров, в 5–10 раз превышающими значения параметров существующих электрореактивных двигателей.

Институт традиционно занимается разработкой плазменных технологий различного применения, поэтому в рамках данного направления исследований имеет большой круг задач. Так будет разработан прототип плазменного ракетного двигателя на основе плазменного ускорителя с мощностью не ниже 300 кВт, удельным импульсом не менее 100 км/с. Такие устройства необходимы как для осуществления дальних перелетов, так и для сохранения паритета в космосе в околоземном пространстве. В 2021 г. учеными Института были определены габариты и достигнут параметр удельного импульса разрабатываемого двигателя. В 2022–2023 гг. будет подтвержден ресурс электродов ключевого элемента двигателя и КПД электрореактивного двигателя на основе плазменного ускорителя.

На площадке Института ведется создание установки источника нейтронов на базе столкновения плазменных сгустков, которая будет применяться для:

- проведения материаловедческих исследований в области термоядерной энергетики;
- использования в качестве источника нейтронов для гибридных систем, ядерной медицины и т. п.

Целью работы до 2024 г. является создание импульсного источника нейтронов синтеза с выходом 10^{14} Д-Д (в пересчете 10^{16} Д-Т) нейтронов за импульс на базе столкновения высокоскоростных плазменных сгустков, генерируемых импульсными ускорителями плазменных тороидов.

Следующее направление работ в рамках создания инновационных плазменных технологий – разработка технологии комплексного воздействия на материалы мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения. Новизна работы заключается в совместном использовании технологии лазерного наклепа и обработки импульсными плазменными потоками. Обработка поверхности изделия импульсными плазменными потоками позволяет в одном процессе совместить быструю закалку, легирование ионами плазмообразующего газа и облагораживание поверхности. Такая обработка позволяет существенно увеличить коррозионную стойкость и износостойкость, снизить коэффициент трения и налипание на поверхность. Обработка импульсным лазерным излучением (лазерный наклеп) также позволяет увеличить коррозионную стойкость и значительно повысить сопротивление усталости, не изменяя при этом качество обработки поверхности. Совместное использование воздействия импульсными плазменными потоками и метода лазерного наклепа открывает дополнительные возможности в упрочнении материалов. В частности, одним из основных факторов, ограничивающих применение импульсных плазменных потоков, является формирование в результате обработки в поверхностном слое материала «растягивающих» напряжений (имеет место при формировании модифицированных слоев в несколько десятков и сотен микрон). Лазерное ударное упрочнение позволяет снизить величину напряжений, убрать их или изменить знак напряжений. Ожидается, что использование импульсных плазменных потоков совместно с лазерным упрочнением позволит реализовать схему управления величиной и знаком напряжений в поверхностном слое материала и существенно расширить возможности каждого из методов.

Объектами исследования являются конструкционные и функциональные материалы, применяемые для изготовления ответственных элементов различных машин и аппаратов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации по температуре, агрессивности среды, циклическому механическому воздействию. В таких условиях кратковременно (менее 10 000 ч) работают лопатки турбореактивных двигателей, в т. ч. лопатки перспективных двигателей, работающих на принципах сжигания водород-кислородной смеси. В течение длительного времени (более 10 000 ч) в данных условиях работают резьбовые соединения бурильных замков,

дейдвудные подшипники гребных валов ледоколов, металлические имплантаты суставов.

В ходе выполнения работы будут проведены исследования возможности по улучшению комплекса свойств (износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности) для выбранных материалов.

Все работы данного направления имеют своей целью получение образца новой техники мирового уровня.

2.5 Разработка нормативной базы термоядерных и гибридных систем, обеспечение лицензионной деятельности, обмен научно-технической информацией

Наконец, в рамках мероприятий по направлению «Разработка нормативной базы термоядерных и гибридных систем, обеспечение лицензионной деятельности, обмен научно-технической информацией» впервые в мире при взаимодействии с МАГАТЭ на основе проведенных НИР будет создана основа нормативной базы, регламентирующей полный жизненный цикл термоядерных и гибридных систем, работающих в нейтронных режимах. Исследованы основные факторы опасности термоядерных и гибридных систем и определены пределы и условия их безопасной эксплуатации. Разработаны методы и средства анализа и оценки ключевых факторов опасности. Также будет разработана и внедрена система информационного и проектного обмена, охватывающая все организации участников Проекта, и система удаленного доступа к базам данных отечественного термоядерного эксперимента. В рамках данного направления исследований на площадке Института будут проведены работы по комплексному анализу возможных факторов опасности, присущих перспективным установкам, для разработки и обоснования необходимости внесения изменений в нормативные правовые акты, а также в ряд федеральных норм и правил в области использования атомной энергии с учетом специфики термоядерных и плазменных установок для успешной реализации подобных технологий.

3. Заключение

В заключение следует отметить, что фактически набор задач, которые предлагается решить в рамках Проекта, связан с формированием нового технологического уклада экспериментально-стендовой базы термоядерных исследований и технологий и говорит о масштабности вызовов, которые надо купировать. Прежде всего это относится к воссозданию широкого спектра наукоемких технологий точного машино- и приборостроения, отечественного материаловедения и электротехники, развитию элементной базы информационно-технологического сектора, разработке большого объема отечественного управляющего программного обеспечения. Плазменные технологии, разработанные в процессе термоядерных исследований, дадут толчок развитию фундаментальной науки и многочисленных новых приложений в различных отраслях науки и техники, включая атомную энергетику и космические исследования.

Тем самым реализация Институту намеченных планов становится серьезным стимулом к развитию различных секторов экономики, восстановлению высококвалифицированных кадров для производственного, технологического и научно-исследовательского секторов экономики и должна рассматриваться как приоритетное направление исследований и разработок в России.

Сведения об авторах:

Марков Дмитрий Владимирович, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», доктор технических наук, генеральный директор, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12.

Кирилл Игоревич Ильин, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, ilyin@triniti.ru.

DIRECTIONS OF RESEARCH WITHIN THE FRAMEWORK OF THE FEDERAL PROJECT "DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR CONTROLLED FUSION AND INNOVATIVE PLASMA TECHNOLOGIES" IN TRINITI JSC

D. V. Markov, K. I. Ilyin

Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Russia

The Joint Stock Company State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research is one of the basic platforms for the implementation of the project activities on "Development of thermonuclear fusion control technologies and innovative plasma technologies". This article presents the main areas of research implemented in the project at the site of the Institute.

Key words: thermonuclear research, controlled thermonuclear fusion