

## ХРОНИКА

В апреле 2009 г. Государственная корпорация «Росатом» создала комиссию по выбору путей оптимального развития термоядерной энергетики России на основе токамаков. Руководителем комиссии был назначен С.В. Мирнов.

В состав комиссии вошли представители РНЦ «Курчатовский институт», ТРИНИТИ, НИИЭФА, ВНИИНМ, НИКИЭТ, ФТИ РАН, МИФИ, т.е. представители практически всех институтов, связанных с работами на токамаках.

Комиссия подтвердила, что создание так называемого «чистого» термоядерного реактора должно быть основной стратегической линией развития программы УТС в России. В то же время стало актуальным использование современных достижений физики и технологии УТС для решения задач атомной энергетики.

Комиссия пришла к заключению, что исследования физических процессов в токамаках и развитие токамаков как основы термоядерной энергетики и новейшие разработки должны обеспечить научную и технологическую поддержку как программы ИТЭР, так и гибридных систем.

Комиссия сочла необходимым:

- в ближайшие годы модернизировать и развить экспериментальную базу токамаков;
- выполнить комплекс работ по созданию стационарного источника нейтронов для решения задач атомной энергетики;
- институтам, вовлечённым в программу работ по УТС, обеспечить подготовку нового поколения физиков, инженеров и технического персонала как для выполнения национальных задач, так и для участия в проекте ИТЭР;
- РНЦ «Курчатовский институт» необходимо выполнять функцию руководителя и координатора работ по токамакам в стране.

На основе выводов комиссии Росатома руководство РНЦ «Курчатовский институт» приняло решение выделить работы по токамакам как базовому направлению программы УТС в РНЦ «Курчатовский институт» в отдельный институт с целью концентрации научных, технических и финансовых ресурсов в этом направлении. Кроме того, путём консолидации работ руководство РНЦ «Курчатовский институт» намерено решить и социальные проблемы успешного выполнения работ по токамакам.

В этом состоит основная причина реорганизации Института ядерного синтеза и организации на его базе Института физики токамаков (ИФТ).

Перед ИФТ руководство программы УТС поставило следующие задачи:

- техническое перевооружение токамака Т-10 как базы научно-образовательного центра совместно с МИФИ по подготовке физиков для национальной программы УТС и для ИТЭР, а также для проведения на нём исследований по физике плазмы в поддержку ИТЭР и термоядерного источника нейтронов (ТИН);
- ввод в действие модернизированного токамака Т-15 как стенда по разработке и испытаниям систем поддержания стационарной работы ТИН и токамаков-реакторов;
- создание и ввод в действие квазистационарного диверторного токамака с длительностью более 30 с, полем на оси более 2 Тл и током 1 МА;
- разработка технического проекта и создание демонстрационного термоядерного источника нейтронов для наработки топлива и трансмутации высокоактивных продуктов отработанного ядерного топлива (ОЯТ);
- выполнение обязательств России по ИТЭР. Проведение расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, испытаний, диагностических и технологических разработок в поддержку ИТЭР;
- поддержка деятельности РНЦ «Курчатовский институт» как национального Агентства ИТЭР;
- поддержка взаимно полезного международного сотрудничества с основными плазменными и термоядерными лабораториями мира.

Сформированная в соответствии с перечисленными задачами, структура института подразумевает ответственность руководителя каждого подразделения за объём и качество выполняемых работ по принятым институтом обязательствам. Процесс перехода на такой способ организации выполнения работ не прост, но необходим.

## Структура Института физики токамаков

Административно-хозяйственный отдел	ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ТОКАМАКОВ Руководство института				Инженерно-производственные подразделения
Отдел Т-10	Отдел термоядерных реакторов	Отдел Т-15	Отдел теории плазмы	Отдел ИТЭР	Отдел криогенных установок
Лаборатория физики горячей плазмы	Расчетно-теоретическая лаборатория	Лаборатория проектирования и эксплуатации систем Т-15	Лаборатория динамических и транспортных процессов	Лаборатория симуляторов плазменных процессов	Отдел главного энергетика-механика
Лаборатория исследований транспортных процессов в плазме	Лаборатория реакторных проблем	Лаборатория проектирования и эксплуатации Т-10	Лаборатория теории излучения	Лаборатория диагностики плазмы	Лаборатория конструкторских работ
Лаборатория организации и моделирования эксперимента	Лаборатория дивертора и пристеночной плазмы	Лаборатория разработок и эксплуатации систем энергетики	Лаборатория теории турбулентной плазмы	Лаборатория ВЧ- и СВЧ-нагрева плазмы	Служба ТБ и РБ
Лаборатория информационного управления систем	Лаборатория системных исследований	Лаборатория технологических диагностик и средств связи	Лаборатория взаимодействия плазмы с поверхностью		Служба поддержки сети
Научно-образовательный центр		Лаборатория инжекционного нагрева			

В настоящее время представлены планы работ на 2010 год.

## ОТДЕЛ Т-10

Удержание плазмы и примесей в режимах с мощностью СВЧ-нагрева до 4 МВт при низком коэффициенте рециклинга в Т-10.

Организация на базе Т-10 совместно с МИФИ Научно-образовательного центра.

Программа исследований на Т-10:

— изучение физики процессов в плазме с целью увеличения давления плазмы с использованием гиروتронов суммарной мощностью до 5 МВт и длительностью до 0,5 с;

— получение режимов улучшенного удержания плазмы;

— управление неустойчивостями и профилями параметров плазмы в режиме реального времени;

— получение и исследование режимов с полным замещением омического тока при вводимой в токамак СВЧ-мощности до 5 МВт;

— получение данных по удержанию энергии и частиц плазмы в широком диапазоне соотношений электронной и ионной температур ( $T_e/T_i \approx 1—10$ );

— получение режимов с параметрами, характерными для плазменной мишени, требуемой для инжекции пучка быстрых атомов с целью получения двухкомпонентной плазмы в токамаке;

— получение данных о связи коэффициентов переноса с турбулентностью при мощном дополнительном СВЧ-нагреве плазмы в широком диапазоне изменений токов и концентрации;

— получение данных по взаимодействию плазмы с внутрикамерными элементами в энергонапряжённых режимах, включая режимы с развитием неустойчивости срыва;

— получение данных по динамике генерации ускоренных электронов в этих режимах, проверка методики «смягчения» воздействия плазмы на внутрикамерные элементы в результате развития срыва инжекцией рабочего газа и примесей;

— совершенствование техники инжекции в плазму газовых струй и макрочастиц;

— модернизация существующих и разработка новых диагностик;

— тестирование диагностик ИТЭР.

## ОТДЕЛ Т-15

Федеральная целевая программа «Ядерные технологии нового поколения» предусматривает технические перевооружения инженерных и технологических систем Т-15.

Модернизироваться должны система вакуумной откачки, электромагнитная система и разрядная камера, система электропитания, система криогенного обеспечения, система инжекционного нагрева, система СВЧ-нагрева плазмы, система автоматизации сбора данных, инженерные системы, диагностический комплекс.

Модернизация технологических и инженерных систем Т-15 позволит:

- повысить надежность эксплуатируемого оборудования, его бесперебойную работу;
- уменьшить количество сменного эксплуатационного персонала за счёт автоматизации технологических систем;
- повысить холодопроизводительность криогенного комплекса до необходимого уровня при  $T = 4,5 \text{ К}$ ;
- уменьшить тепловые потери в криогенных коммуникациях, доведя их до  $0,1\text{—}0,2 \text{ Вт/м}$ ;
- сократить потери азота в азотной системе;
- повысить скорость вакуумной откачки камеры в рабочем режиме до  $20\,000 \text{ л/с}$ .

Будут созданы системы ВЧ- и НГ-нагрева плазмы и разработаны стационарные инжекторы быстрых атомов.

**Модернизация Т-15 — первый этап создания термоядерного источника нейтронов (в соответствии с решением Комиссии и секции НТС Росатома).** Исследования на модернизированной экспериментальной термоядерной установке токамак Т-15 внесут вклад в экспериментальное обоснование технологических решений проектируемых термоядерных реакторов и отработку систем стационарного ТИН:

- системы поддержания стационарного тока плазмы;
- стационарного комплекса гиротронного нагрева электронов;
- стационарной инжекции быстрых атомов;
- стационарно функционирующей первой стенки и дивертора;
- стационарной системы циркуляции дейтерия-третия между плазмой и стенкой камеры.

Программа исследований на Т-15 ориентирована на изучение:

- поддержания стационарного состояния плазменного шнура с высокой мощностью дополнительного нагрева с помощью инжекции быстрых атомов или ВЧ-полей;
- контроля МГД-устойчивости плазмы в стационарном режиме;
- контроля профилей тока и давления в стационарном режиме;
- взаимодействия плазмы с различными материалами первой стенки, включая графит, вольфрам и литий;
- технологии высокоресурсной первой стенки.

## ОТДЕЛ ТЕОРИИ ПЛАЗМЫ

Основные задачи:

- моделирование НЧ-турбулентности и результирующего аномального транспорта в центральной области плазмы токамака;
- развитие теории излучения применительно к плазме с сильным магнитным полем для задач диагностики параметров плазмы токамаков;
- исследование турбулентных и радиационных процессов на периферии токамака;
- исследование возможности сохранения осевой квазисимметрии токамака при наложении внешнего вращательного преобразования с использованием непрерывных винтовых обмоток;
- моделирование бесстолкновительной генерации бутстреп-тока в присутствии электрического поля и магнитных островов — прямое моделирование без упрощений дрейфовой и неоклассической теории;

— устойчивость вращающейся плазмы, в том числе геодезических и акустических мод и зональных течений;

— теоретические проблемы образования и поведения пылевого компонента и наноструктурных плёнок в токамаках.

### ОТДЕЛ ИТЭР

#### Исследования по физике плазмы по программе ИТЭР:

— физика удержания и транспортных процессов;

— устойчивость (МГД, сценарии работы катушек полоидального поля и систем управления);

— физика пристеночной плазмы;

— физика управляемого разряда (интегрированные сценарии, многопараметрическое управление плазмой, физика частиц высокой энергии и т.д.);

— способы нагрева и поддержания тока плазмы;

— интегрированное моделирование разрядов.

**Создание системы плазменных симуляторов ИТЭР на основе параллельного развития модулей и интегрирующего ядра.** Интегрирующее ядро — транспортный код (ASTRA + DINA). Модули:

— физические: равновесие, МГД-устойчивость, дополнительный нагрев-генерация тока, примеси, убегающие электроны, быстрые частицы;

— инженерные: инженерные системы ИТЭР, контролеры;

— диагностические: данные зондов, старт-эффект на диагностическом пучке, изучение интенсивности свечения линии  $H_{\alpha}$ , нейтроны и т.д.

Для верификации кодов необходима экспериментальная проверка на действующих токамаках в широком диапазоне параметров и соответствующая их корректировка, поэтому эксперименты в поддержку создания симуляторов ИТЭР на всех имеющихся российских токамаках востребованы.

**Создание диагностического комплекса ИТЭР.** Россия должна поставить диагностическое оборудование в размере 13,9% от полной стоимости диагностики ИТЭР: головной исполнитель — РНЦ «Курчатовский институт» при участии ФТИ, ТРИНИТИ, НИИЭФА и др.

В настоящее время разрабатываются 9 систем диагностики параметров плазмы: спектроскопия водородных линий (РНЦ «Курчатовский институт»); рефлектометрия (РНЦ «Курчатовский институт»); томсоновское рассеяние в диверторе (ФТИ); анализатор атомов перезарядки (ФТИ); вертикальная нейтронная камера (ТРИНИТИ); активная спектроскопия (ТРИНИТИ); лазерная флуоресценция (РНЦ «Курчатовский институт»); гамма-спектрометрия (ФТИ); монитор нейтронов в диверторе (ТРИНИТИ).

**Создание гиротронного комплекса ИТЭР.** В РНЦ «Курчатовский институт» разработан и создан высоковольтный источник, работающий в непрерывном режиме с выходной электрической мощностью 4 МВт.

Для проведения приемо-сдаточных испытаний штатных гиротронов ИТЭР в РНЦ «Курчатовский институт» создан новый стенд, в состав которого входят следующие системы:

— вакуумный зеркально-волноводный тракт для транспортировки СВЧ-энергии от гиротрона к нагрузке;

— автоматизированная система вакуумной откачки, включающая в себя систему контроля давления в тракте в режиме реального времени;

— система водяного охлаждения гиротрона, элементов СВЧ-тракта и СВЧ-нагрузки с расходом дистиллированной воды до  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

— система защит гиротрона и элементов зеркально-волноводного тракта;

— система сбора данных о параметрах гиротрона.

Получена выходная СВЧ-мощность гиротрона в виде гауссова пучка  $P = 600 \text{ кВт}$  при длительности импульса 800 с. При выходной СВЧ-мощности 1 МВт длительность импульса  $\tau = 160 \text{ с}$ .

**Программа обеспечения качества оборудования для ИТЭР.** Программа обеспечения качества направлена на удовлетворение требований по качеству, предъявляемых к оборудованию и услугам, предоставляемым Российской Федерацией в рамках проекта ИТЭР.

Производственные и технологические процессы, которые влияют на качество предметов поставки:

- соответствие выполняемых операций требованиям, установленным в технологической документации и соответствующих программах и методиках;
- соответствие состояния внешних условий выполнения операций установленным требованиям, включая периодический контроль внешних условий;
- понимание особой роли и ответственности выполняемой работы;
- квалификация и сертификация персонала;
- требования заказчика (конкретно изложенные, а не ссылки на применяемые коды и стандарты);
- характеристики используемого оборудования, требования по поверке и калибровке этого оборудования;
- требования к содержанию и оформлению отчетных документов;
- наличие всех установленных согласующих и утверждающих подписей на используемых документах, правильность учёта и внесения изменений в используемую документацию.

### ОТДЕЛ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

#### **Основные задачи:**

- проектирование термоядерного реактора для опытной термоядерной электростанции;
- разработка технического предложения на демонстрационный термоядерный источник нейтронов (ТИН);
- разработка концепции трансмутатора минорных актинидов на основе компактного токамака;
- пылевые технологии для термоядерного реактора;
- исследование тепловых и механических характеристик дивертора токамака Т-15 и развитие технологий создания и испытания внутрикамерных элементов и дивертора;
- исследования взаимодействия водорода с материалами термоядерного реактора (в рамках программы поддержки молодых учёных).