

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН



А.Г. Забродский

**ПРОГРАММА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
УНУ "СФЕРИЧЕСКИЙ ТОКАМАК ГЛОБУС-М"
НА 2017-2019 ГОДЫ**

Программа научных исследований, проводимых на УНУ Глобус-М, разработана для выполнения актуальных фундаментальных и прикладных задач, соответствующих мировому уровню исследований, и направлена на решение комплексных междисциплинарных проектов по приоритетным направлениям развития науки и технологий Российской Федерации в области рационального природопользования и энергоэффективности, энергосбережения и ядерной энергетики.

Также программа исследований содержит комплекс мероприятий текущего и среднесрочного характера, являющихся частью исследований и разработок, проводимых с использованием современных объектов научной инфраструктуры по направлениям критических технологий: технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом, технологии новых и возобновляемых источников энергии, технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

1. Цель программы

Настоящая Программа научных исследований является продолжением Программы, реализованной в период 2014-2016 гг. В течение данного периода было достигнуто существенное развитие инфраструктуры УНУ. Ключевым фактором стало изготовление новой электромагнитной системы, направленное на увеличение магнитного поля и тока плазмы в 2-2,5 раза до значений $B_T = 1$ Тл и $I_p = 0,5$ МА. Фотография новой электромагнитной системы показана на рисунке 1. Для проведения экспериментов с повышенными значениями поля и тока была проведена реконструкция источников питания. Был введен в строй реверсивный источник питания центрального соленоида,

рассчитанный на ток ± 70 кА, а также источник для обмотки тороидального магнитного поля, рассчитанный на ток 110 кА.



Рисунок 1 – Фотография электромагнитной системы установки Глобус-М2

Были изготовлены устройства для переключения обмоток анодных трансформаторов ТМПИ-32000/10У1 на удвоенное напряжение. Для нагрева плазмы был закуплен второй инжектор, способный создавать пучок атомов водорода или дейтерия мощностью 1 МВт, с энергией частиц 50 кэВ и длительностью импульса до 1 секунды. Для экспериментов по генерации безындукционного тока был модернизирован комплекс ниже-гибридной генерации тока. Получил развитие диагностический комплекс УНУ. Было изготовлено диагностическое оборудование для исследования параметров периферийной плазмы. Разработано большое количество измерительных методик и методик проведения эксперимента.

Перечисленные мероприятия по модернизации основных систем УНУ и развитию ее инфраструктуры позволяют достигнуть существенно более высоких параметров плазмы – температуры, плотности, теплового давления и других. При этих параметрах, приближенных к параметрам устройств масштаба термоядерного источника нейтронов, будет осуществляться реализация настоящей Программы. Исследования, проводимые в рамках Программы, направлены на решение проблем энергетики, в том числе атомной и

термоядерной, в рамках решения приоритетной научной задачи «Исследование и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики».

2. Задачи исследований, решаемые Программой

2.1. Конкретные научные проблемы, решаемые в ходе выполнения Программы

Уникальная научная установка сферический токамак Глобус-М к настоящему времени оснащена мощными сетевыми источниками питания, системами управления, системами дополнительного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока, многочисленными диагностиками для измерения параметров основной и периферийной плазмы, технологическими системами защиты обращенной к плазме поверхности. Все это позволяет проводить комплексные исследования по ключевым направлениям, лежащим в основе создания термоядерных устройств. Эти исследования затрагивают следующие научные проблемы:

- нагрев плазмы сферического токамака и процессы переноса;
- турбулентные процессы в основной и периферийной плазме;
- безындукционный старт и поддержание тока плазмы;
- физика режимов с улучшенным удержанием;
- взаимодействие плазмы с быстрыми частицами;
- физика процессов в диверторной области;
- срыв тока плазмы;
- разработка интегрированного сценария.

Исследования по комплексным междисциплинарным проектам финансируются в рамках следующих научных программ и грантов:

- Фундаментальные научные исследования в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.
- Программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.11П "Теплофизика высоких плотностей энергии. Материя при высоких давлениях. Фундаментальные проблемы удержания и нагрева плазмы в магнитных ловушках".
- Грант Президента РФ 14.W01.16.5846.МК «Исследование термоизоляции ионного компонента плазмы сферического токамака Глобус-М». 2016-2017 г.
- Грант РФФИ № 16-32-60114 "Исследование режимов удержания плазмы сферических токамаков Глобус-М и Глобус-М2 в поддержку проекта термоядерного источника нейтронов на основе сферического токамака". 2016-2018 г.
- Грант РФФИ № 16-08- 00387-а «Анализ процессов, возникающих при срыве тока в сферическом токамаке Глобус-М». 2016-2017

- Грант РФФИ 16-32-00027 мол_а «Влияние контр-инжекции высокоэнергетических атомов на удержание плазмы в сферическом токамаке» 2016-2017 г.

Грант РФФИ № 16-32-00454 мол-а «Исследования возбуждения и поддержания безындукционного тока, генерируемого путем нейтральной инжекции, в сферическом токамаке». 2016-2017 г.

- Грант РФФИ № 16-02-00622 «Разработка комплексного подхода для изучения транспортных процессов на токамаке Глобус-М (М2) на основе измерений кинетических параметров и радиационных потерь плазмы». 2016-2018 г.

- Грант РФФИ 16-08-00338-а «Разработка импульсного ускорителя для получения потоков плазмы с большой кинетической энергией». 2016-2018 г.

Часть работ по перечисленным программам и грантам проводится с участием организаций-пользователей УНУ. Также в интересах пользователей будут проводиться исследования по таким важным направлениям, как физика диверторной области токамака, процессы развития неустойчивостей в периферийной плазме, взаимодействие быстрых частиц с плазменной мишенью, энергетический баланс основной и периферийной плазмы. Экспериментальная база данных УНУ будет использована для развития методов численного моделирования плазменных процессов. В процессе реализации настоящей Программы будут подаваться конкурсные заявки по другим тематикам исследований.

2.2 Современное состояние проблем

Работы, проводимые на сферических токамаках, занимают особое место в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Данные устройства, благодаря своей компактности и высоким характеристикам плазмы, рассматриваются в ближайшей перспективе в качестве основы для создания термоядерного источника нейтронов (ТИН), работающего с малым содержанием трития. В более отдаленной перспективе рассматривается сооружение компактного термоядерного реактора с малым аспектным отношением. В России и ряде зарубежных лабораторий определены основные требования к такому источнику и его параметры. В течение истекшего десятилетия значительная часть этих параметров, таких, например, как давление плазмы, форма сечения плазменного шнура, доля безындукционного тока и ряда других достигнуты по отдельности на действующих сферических токамаках, включая установку Глобус-М в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В проведенных экспериментах были убедительно продемонстрированы все ожидаемые преимущества концепции магнитной конфигурации плазмы с малым аспектным отношением. Следующей задачей на пути создания ТИН является реализация интегрированного сценария работы, при котором различные высокие параметры плазмы, близкие к параметрам ТИН, достигаются в эксперименте

одновременно. Такой результат может быть получен только на исследовательской установке, обладающей высокоразвитой инфраструктурой и позволяющей проводить исследования по широкому кругу тематик. Необходимыми условиями являются создание плазмы с сильно вытянутым сечением, удерживаемой в магнитных конфигурациях диверторного типа, нагрев плазмы до высоких значений температуры и давления, поддержание в плазме значительной доли безындукционного тока различными способами, защита обращенной к плазме поверхности. Для проведения исследований необходимы мощные источники питания, быстродействующие системы управления, системы для дополнительного нагрева плазмы и безындукционной генерации протекающего по ней тока. Уникальная научная установка сферический токамак Глобус-М в основном отвечает перечисленным требованиям. Крупным шагом в развитии УНУ является проводимая в настоящее время модернизация электромагнитной системы, направленная на увеличение магнитного поля и тока плазмы в 2-2.5 раза, что позволит значительно улучшить основные параметры плазмы и расширить возможности эксперимента.

Глобус-М не имеет аналогов в России. Это не только единственный в стране сферический токамак, но и единственная установка, в которой плазма удерживается в диверторной магнитной конфигурации со сложной формой поперечного сечения. Всего в мире насчитывается 17 установок типа токамак с малым аспектным отношением. Подробный обзор современных результатов исследований на сферических токамаках можно найти в работе [1]. В настоящее время большинство сферических токамаков представляют собой сравнительно небольшие устройства со слабым магнитным полем, исследования на которых направлены на решение какой-либо отдельно взятой проблемы. Исключение составляют три сферических токамака – NSTX (США) [2,3], MAST (Великобритания) [4] и Глобус-М [5]. Данные установки располагают необходимыми средствами для проведения комплексных исследований, связанных с созданием устройств типа ТИН. На всех трех установках осуществляется модернизация электромагнитной системы в целях увеличения магнитного поля и тока плазмы. Также значительные усилия затрачиваются на увеличение мощности источников для дополнительного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока.

Установка PEGASUS, США [6] имеет предельно низкое аспектное отношение. Работы на ней сфокусированы на исследовании старта плазменного разряда. На сферическом токамаке CDX-U/LTX, США, [7,8] изучается использование жидкого лития в качестве защитного материала обращенной к плазме поверхности. Установка НТ-II, США, [9] создана для исследования безындукционного старта тока с помощью электродного разряда в разьеме камеры поперек тороидального магнитного поля (helicity injection). Крупнейший японский сферический токамак QUEST/CPD [10] сооружен для демонстрации

длительного поддержания безындукционного тока плазмы. В университете Токио работают несколько установок с малым аспектным отношением TST-2 [11], TS-3 [12], UTST [13]. Эксперименты на этих установках направлены на получение старта тока плазмы с помощью резонансного электромагнитного излучения (TST-2) и развитие сценариев формирования плазмы за счет слияния двух начальных конфигураций (схема merging start-up, используемая в TS-3 и UTST). В университете г. Киото имеется сферический токамак LATE [14], задачей которого является демонстрация формирования плазмы только с помощью излучения на частоте электронного циклотронного резонанса. В университете префектуры Хиого, Япония, действует сферический токамак HIST [15]. Целью экспериментов является демонстрация квазинепрерывного поддержания тока плазмы с помощью инъекции спиральных структур в электродном разряде. В Национальном университете г. Сеула сооружен сферический токамак VEST [16], программа работы которого ориентирована на достижение высоких значений параметра бета (отношения давления плазмы к давлению магнитного поля), исследование процессов в диверторной области и т.д. Работы в Китае проводятся на сферическом токамаке SUNIST [17]. Эксперименты направлены на получение безындукционного старта тока плазмы излучением в альфвеновском и электронном циклотронном диапазонах длин волн. Из других плазменных установок с малым аспектным отношением следует отметить ТОКАSTAR в Нагойском университете, Япония [18], ETE в Бразилии [19] и сферический токамак нового типа PROTO-SPHERA в Италии [20].

Существенным отличием сферического токамака от обычного токамака с большим аспектным отношением является соотношение между током плазмы I_p и суммарным током в обмотках тороидального магнитного поля I_{TF} . В сферическом токамаке эти токи оказываются сравнимыми по величине, тогда как в обычном токамаке I_{TF} гораздо больше I_p . Пониженное по сравнению с обычными токамаками значение I_{TF} позволяет сконструировать термоядерные устройства с использованием теплых медных обмоток тороидального магнитного поля. Условием эксплуатации таких устройств является возможность периодической замены центрального вертикального стержня этих обмоток, подверженного нейтронным нагрузкам. Сферический токамак с обмотками на основе медных проводников выглядит особенно привлекательным для создания термоядерного источника нейтронов (в литературе часто используется сокращение FNSF – Fusion Neutron Source Facility), в котором задача производства электроэнергии не является первостепенной [21,22]. Существует два способа генерации термоядерных нейтронов – в реакции теплового синтеза в плазме с высокой температурой и давлением и при взаимодействии пучка быстрых частиц с плазменной мишенью. В последнем случае размеры нейтронного источника оказываются несколько меньше.

На основе экспериментальных данных, полученных на сферических токамаках, разработан целый ряд термоядерных устройств с малым аспектным отношением. В таблице 1 в качестве примера приведены параметры трех проектов термоядерного источника нейтронов, разработанных в Оак-Риджской Национальной Лаборатории ORNL в США [23], Принстонской Лаборатории Физики Плазмы PPPL, США [24] и Калэмского Центра Энергии Синтеза CCFE, Великобритания [25]. Данные в Таблице 1 приведены в соответствии с работой [1].

Таблица 1. Параметры установок типа термоядерного источника нейтронов

Параметр	FNSF-1	FNSF-2	FNSF-3
R (м)	1.3	1.0	0.85
A	1.7	1.7	1.55
B_T (Тл)	2.9	3.0	2.5
I_p (МА)	6.7	7.5	6.5
κ	3.1	3.0	2.4
δ	0.5	0.5	0.4
q^*	4.1	3.5	2.3
q_{95}	10	7.3	6.6
β_T (%)	10.1	19.5	16.6
β_N	3.3	4.6	3.5
f_{BS}	0.45	0.8	0.4
H	≤ 1.25	1.2	1.3
N_G	0.4	0.8	0.59
P_{Fusion} (МВт)	76	60	35
W_L (МВт/м ²)	1	1	1

В таблице 1 FNSF-I, FNSF-II и FNSF-III являются разработками ORNL, PPPL и CCFE соответственно. Используются следующие обозначения: R – большой радиус плазмы; $A = R/a$ – аспектное отношение, где a – малый радиус плазмы; B_T – тороидальное магнитное поле в центре камеры; κ – вытянутость плазмы в вертикальном направлении; δ – треугольность сечения плазмы; q^* – цилиндрический запас устойчивости на границе плазмы; q_{95} – запас устойчивости на уровне магнитной поверхности, соответствующей 95% магнитного потока плазмы; β_T – отношение давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля; β_N – нормализованная величина β_T , $\beta_N = \beta_T(aB_T)/I_p$, f_{BS} – доля генерируемого плазмой безындукционного бутстрэп-тока; H – фактор улучшенного удержания энергии плазмы; N_G – коэффициент в формуле Гринвальда для предельной

плотности плазмы; P_{Fusion} – термоядерная мощность; W_L – нейтронная нагрузка на обращенную к плазме поверхность.

Как видно из таблицы 1, все три устройства имеют относительно небольшие размеры. Их большой радиус мало отличается от радиуса действующих установок MAST и NSTX. Принципиальным отличием является тороидальное магнитное поле, величина которого должна достигнуть 2.5-3 Тл, тогда как в действующих крупных сферических токамаках имеющуюся величину $B_T \sim 0.5$ Тл планируется увеличить до 1 Тл только после модернизации электромагнитной системы. Увеличение магнитного поля в установках масштаба FNSF достигается за счет отказа от центрального соленоида для возбуждения тока плазмы или минимизации его размеров. Во всех трех проектах обмотки тороидального магнитного поля медные. Центральная часть этих обмоток съемная и нуждается в периодической замене после определенного воздействия нейтронных нагрузок. Ток плазмы величиной порядка 7 МА поддерживается безындукционным способом. Примерно 50% величины I_P обеспечивается самогенерируемым бутстрэп-током, а остальные 50% поддерживаются за счет инъекции в плазму нейтральных пучков высокой энергии. Величины β_T и β_N являются весьма умеренными. Они были достигнуты на современных сферических токамаках. Также близка к достигнутым значениям требуемая величина фактора улучшенного удержания H .

Все три проекта, приведенные в таблице 1, рассчитаны на одинаковую нейтронную нагрузку на стенку камеры $W_L \approx 1$ МВт/м². Требуемая мощность термоядерной реакции P_{Fusion} в этих установках невелика. Она сильно зависит от размеров устройства. Для сравнения уменьшение радиуса R с 1.3 м до 0.85 м приводит к снижению P_{Fusion} более чем вдвое. Также в проекте FNSF-III с наименьшими размерами плазмы для поддержания достаточно высокого значения тока плазмы необходимо снижать запас устойчивости q , что повышает риск нарушения стационарного режима работы из-за развития плазменных неустойчивостей. Для увеличения термоядерной мощности в установках реакторного масштаба необходимо увеличивать размер устройства. По оценкам установка с мощностью термоядерной реакции 645 МВт [26] имеет радиус $R = 2.2$ м при аспектном отношении $A = 1.7$, ток плазмы 18 МА, тороидальное магнитное поле 2.4 Тл. В США проработан проект термоядерной установки с малым аспектным отношением 1.6, рассчитанный на выработку 1000 МВт электрической мощности при величине P_{Fusion} около 3000 МВт [27]. Радиус плазмы в такой установке увеличивается до $R = 3.2$ м. Ток плазмы 28 МА в основном поддерживается за счет протекания бутстрэп-тока. Требуемая для поддержания тока плазмы мощность составляет 28 МВт. Тороидальное магнитное поле на оси 2.1 Тл создается обычными теплыми обмотками, в которых рассеивается мощность резистивных

потерь 329 МВт. По оценкам такая установка должна работать, однако, при весьма высоких значениях $\beta_T = 50\%$ и $\beta_N = 7.4$.

Таким образом, сферический токамак может стать основой для создания термоядерных устройств различного типа, которые имеют не только компактные размеры, но и обладают электромагнитной системой, выполненной из обычных проводников. Отметим, что водородный прототип устройств масштаба приведенных в таблице 1 может быть создан на базе инфраструктуры ФТИ им.А.Ф.Иоффе. Такая установка стала бы следующим этапом исследований, проводимых на установках Глобус-М и Глобус-М2.

2.3. Актуальность и значимость планируемых исследований

В среднесрочной перспективе планируемые исследования направлены на создание компактного источника нейтронов на базе сферического токамака и его применение в гибридной схеме синтез-деление. В долгосрочной перспективе работы, проводимые на сферических токамаках, направлены на создание термоядерного реактора для производства электроэнергии. В разделе 2.2 настоящей Программы отмечено, что подобное устройство, основанное на концепции сферического токамака, имеет сравнительно малые размеры и может быть создано без использования сверхпроводников для основных обмоток электромагнитной системы. С другой стороны, плазменные исследования на сферических токамаках существенно дополняют и расширяют экспериментальную базу данных, сформировавшуюся в результате многочисленных работ на обычных токамаках и легшую в основу создания международного экспериментального реактора ИТЭР.

Существенным шагом в развитии исследований является модернизация электромагнитной системы установки Глобус-М и дальнейшие работы на модернизированной установке Глобус-М2. В результате увеличения таких инженерных параметров как магнитное поле и протекающий через плазму ток должны существенно вырасти температура и давление плазмы. Ожидаемым следствием роста температуры станет снижение безразмерного параметра плазмы – приведенной частоты столкновений заряженных частиц ν^* . Согласно данным экспериментов на установках MAST и NSTX [28,29] время удержания тепловой энергии плазмы увеличивается с уменьшением приведенной частоты столкновений электронов $\nu_e^* \sim n_e/T_e^2$ примерно как $\tau_E \sim \nu_e^{*-1.0}$. Процессы переноса в плазме при высокой температуре в области низких частот столкновений к настоящему времени мало изучены на токамаках. Модернизация электромагнитной системы позволит провести исследования в новой области повышенных температур, что является крайне важным для выработки экспериментальных законов подобия и надежного прогнозирования параметров термоядерных установок.

2.4. Методы, подходы и способы решения проблемы

Магнитные конфигурации плазмы в сферическом токамаке Глобус-М соответствуют современным представлениям о требуемых конфигурациях плазмы в термоядерных установках. Плазма вытянута в вертикальном направлении, а ее границей является оторванная от стенки магнитная сепаратриса. Вытянутость плазмы достигает значений $\kappa = 2$, а треугольность сечения $\delta = 0.5$. Для реконструкции магнитного равновесия используются данные магнитных диагностик, для обработки которых применяется код EFIT [30] и алгоритм подвижных токовых колец [31,32]. Положение плазмы в вертикальном и радиальном направлениях контролируется контурами автоматического управления с отрицательной обратной связью. В установке Глобус-М используется дивертор открытого типа. Потоки частиц и тепла из плазмы поступают на верхние и нижние диверторные пластины, установленные на куполах камеры. Свободный доступ внутрь камеры позволяет использовать различные защитные материалы диверторных пластин и обращенной к плазме поверхности. Диагностики для измерения параметров периферийной плазмы позволяют исследовать физику процессов в диверторной области.

Основным методом дополнительного нагрева плазмы является инжекция пучков атомов водорода или дейтерия большой энергии и мощности. В предыдущих экспериментах был использован инжектор с мощностью пучка до 1 МВт при энергии частиц до 30 кэВ. В экспериментах на модернизированной установке Глобус-М2 будет использован второй инжектор также с мощностью пучка до 1 МВт при энергии частиц до 50 кэВ. Инжекция атомных пучков позволяет не только нагреть плазму, но и обеспечить переход плазмы в режим улучшенного удержания. Вторым возможным способом нагрева плазмы является ее нагрев электромагнитным излучением на частотах ионного циклотронного резонанса.

Наличие мощных инжекторов и развитый диагностический комплекс позволяют исследовать процессы переноса в плазме и разнообразные турбулентные процессы в условиях мощного дополнительного нагрева, что отвечает требованиям современных экспериментов, проводимых на токамаках.

Оба применяемых способа дополнительного нагрева – инжекция пучков и ионный циклотронный нагрев приводят к появлению в плазме быстрых частиц. В относительно низком магнитном поле сферического токамака поведение таких частиц подобно поведению альфа-частиц в термоядерных установках с большим магнитным полем. Большой интерес представляет исследование взаимодействия быстрых частиц с основной плазмой, процессов их удержания и влияния на развитие плазменных неустойчивостей.

Инжекция в плазму пучков высокой энергии направлена также на решение проблемы поддержания безындукционного тока. Из-за нагрева плазмы пучком растет доля

самогенерируемого плазмой бутстрэп-тока. Также безындукционный ток может возникать из-за циркуляции вдоль окружности тора быстрых ионов пучка, удерживаемых в плазме. Вторым способом возбуждения и дальнейшего поддержания безындукционного тока является ввод в плазму электромагнитного излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса. В экспериментах используются два типа антенн. Антенна типа «гребенка» применяется для ввода в плазму излучения на частоте 900 МГц. С помощью этой антенны достигается безындукционный старт тока. Грилл, состоящий из десяти волноводов, используется для ввода излучения на частоте 2.45 ГГц. Согласно расчетам, доля безындукционного тока, генерируемого как инжектируемым пучком, так и резонансным электромагнитным излучением, существенно возрастет в модернизированной установке Глобус-М2 с увеличенным магнитным полем и током плазмы.

Применение методов дополнительного нагрева плазмы большой мощности и генерации безындукционного тока в установке Глобус-М2 позволит продвинуться в разработке интегрированного сценария работы сферического токамака.

В связи с планируемым увеличением тока плазмы до величины 0.5 МА на УНУ Глобус-М начаты исследования полного спонтанного срыва тока, сопровождаемого быстрым неконтролируемым движением плазмы в вертикальном направлении. Проблема большого срыва подробно исследуется на многих токамаках, т.к. такой срыв представляет опасность для конструкций действующих установок и экспериментального термоядерного реактора ИТЭР [33,34]. Наличие магнитных диагностик и алгоритма подвижных токовых колец для их обработки позволяет не только детально исследовать быстрый процесс срыва, но и определить электродинамические нагрузки на вакуумную камеру токамака, вызванные наведенными при срыве токами.

2.5. Имеющийся задел

Многие члены коллектива УНУ Глобус-М имеют многолетний опыт исследований на термоядерных установках типа токамак в ФТИ им.А.Ф.Иоффе. Некоторые из них участвовали в экспериментах на сферических токамаках START, MAST (Великобритания), NSTX, CDX-U (США), на крупнейших токамаках JET (Великобритания), ASDEX-U (Германия). Под руководством и при непосредственном участии исполнителей работ был спроектирован, изготовлен, запущен и выведен на проектные параметры сферический токамак Глобус-М. Также по их инициативе и под непосредственным руководством была спроектирована и изготовлена новая электромагнитная система для модернизированного токамака Глобус-М2.

В период 2014-2016 инфраструктура УНУ Глобус-М получила существенное развитие благодаря поддержке Министерства образования и науки РФ и ФАНО России в

рамках заключенных соглашений. Было закончено изготовление новой электромагнитной системы. Для системы сетевого питания УНУ суммарной мощностью 125 МВт были закуплены два новых тиристорных источника на ток +/-70 кА для центрального соленоида и ток 110 кА для обмотки тороидального магнитного поля. Был проведен капитальный ремонт трансформаторной подстанции УНУ. При этом источники питания были оснащены новыми комплектными распределительными устройствами (КРУ) с вакуумными выключателями, что повышает надежность работы этих устройств и обеспечивает аварийную защиту источников.

Для систем дополнительного нагрева и генерации безындукционного тока плазмы был закуплен новый инжектор с системой сетевого питания и системой управления. Выполнен ремонт системы водяного охлаждения, при этом увеличена ее производительность. На установке Глобус-М2 при одновременном включении двух инжекторов суммарная мощность нагрева увеличится до двух мегаватт. Клистронный генератор для ввода в плазму электромагнитного излучения на частоте 2.45 ГГц оснащен новым источником питания и волноводным трактом для подвода мощности к антенне типа грилл.

Получил развитие диагностический комплекс. Была усовершенствована система зондовых измерений параметров периферийной плазмы. Кроме того, был изготовлен прыгающий зонд, способный сканировать область плазмы за пределами сепаратрисы в период разряда. Модернизирован комплекс корпускулярной диагностики, состоящий из двух анализаторов АКОРД-12 и АКОРД-24М, позволяющих измерять температуру ионов и исследовать процессы взаимодействия быстрых частиц с плазмой. Диагностика излучения плазмы дополнена 4-х канальным вакуумным спектрометрическим модулем на основе XUV приемников SPD.

В период 2014-2016 г. был разработан ряд измерительных методик и методик проведения плазменных экспериментов. В их числе методика измерений температуры приемных пластин дивертора бесконтактным способом, методика измерения времени торможения быстрых ионов при инжекционном нагреве, методика измерений потоков нейтронов с помощью газоразрядных счетчиков СНМ-11 и другие методики.

В установке Глобус-М2 будет использована вакуумная камера установки Глобус-М и ее технологические системы, в число которых входят:

- система высоковакуумной откачки до давления не хуже 1×10^{-7} мм рт. столба насосами не содержащими масла;
- система прогрева до температуры 200⁰С;
- система защиты обращенной к плазме поверхности (плитки из графита марки РГТ, всего 614 штук площадью примерно 4 м²);

- система импульсного напуска рабочих газов;
- система очистки поверхности тлеющим разрядом;
- система нанесения пленочных защитных покрытий на основе карборана (боронизация).

Следует особо отметить, что приобретенное оборудование является уникальным. Оно было, в основном, разработано и изготовлено в Российской Федерации. К числу отечественных разработок относится и значительная часть кодов, используемых для численного моделирования и обработки экспериментальных данных.

2.6. Ожидаемые результаты исследований

Ближайшим ключевым мероприятием исследовательской программы установки Глобус-М является модернизация электромагнитной системы, следствием которой станет сооружение и запуск установки Глобус-М2. В результате планируется увеличение магнитного поля до величины масштаба 1 Тл и тока плазмы до 0.5 МА. Как ожидается, такое увеличение основных инженерных параметров приведет к сокращению потерь из плазмы быстрых сверхтепловых частиц и увеличению эффективности методов дополнительного нагрева. Вследствие этого должно произойти существенное увеличение температуры и давления плазмы. Предполагается применение одновременно двух инжекторов нейтрального пучка суммарной мощностью до 2 МВт, что позволит не только повысить температуру плазмы, но и значительно увеличить долю безындукционного тока.

Результатами выполнения программы научных исследований на базе УНУ Глобус-М2 будут новые знания в следующих областях:

- ядерной физики и физики плазмы;
- энергетики, в том числе атомной и термоядерной, проблем преобразования энергии.

Эти знания будут получены путем применения модернизированных диагностических систем и новых разработанных методик измерений, которые составляют основу измерительно-диагностического комплекса для модернизированной установки УНУ Глобус-М2 с магнитным полем 1 Тл.

Получат развитие методы дополнительного нагрева плазмы и методы возбуждения и поддержания безындукционного тока как быстрыми ионами, так и резонансным электромагнитным излучением на различных частотах.

На фоне улучшенных инженерных и физических параметров будут сделаны выводы об удержании плазмы в основном объеме и в диверторной области. При увеличении мощности нагрева плазмы вырастут тепловые нагрузки на диверторные пластины, что создаст условия для исследования свойств защитных материалов.

С использованием методов корпускулярной диагностики и других диагностик будут

получены данные о взаимодействии быстрых частиц с плазменной мишенью.

Будут получены данные о турбулентных процессах в основной и периферийной плазме и их влиянии на основные плазменные параметры.

Будут систематизированы данные о большом срыве тока плазмы и определены электродинамические нагрузки на вакуумную камеру.

Результаты исследований будут опубликованы в статьях в научных журналах и представлены в докладах на конференциях.

2.7. Научная новизна и значимость результатов исследований

Как отмечено выше в разделе 2.2, Глобус-М не только единственный в России сферический токамак, но и единственная установка, в которой может быть получена и исследована плазма со сложным поперечным сечением, ограниченная магнитной сепаратрисой. Для такой плазмы применяются методы дополнительного нагрева и генерации безындукционного тока. В экспериментах используется разнонаправленный диагностический комплекс. Для обработки и интерпретации данных применяются современные математические коды. Все это позволяет проводить исследования на уровне, в основном соответствующем современным мировым требованиям.

Сферические токамаки занимают особое место в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и УТС. Работы на них начаты относительно недавно, а накопленный объем данных значительно меньше объема данных, полученных на обычных токамаках. Тем не менее, сферический токамак уже сейчас рассматривается в качестве потенциальной основы для сооружения в среднесрочной перспективе компактного источника нейтронов, а в более длительной перспективе - термоядерного реактора. Оценки показывают, что такие устройства могут работать с теплыми обмотками электромагнитной системы. Отказ от использования сверхпроводящих обмоток уменьшает стоимость установки и значительно упрощает ее конструкцию и эксплуатацию.

В отличие от сферических токамаков MAST и NSTX Глобус-М имеет более плотную компоновку электромагнитной системы и вакуумной камеры. При меньших размерах плазмы использование инжекторов с суммарной мощностью пучков 2 МВт приведет к рекордному вкладу мощности на единицу объема плазмы.

Безындукционный старт и дальнейшее поддержание тока плазмы имеет первостепенное значение для любого термоядерного устройства, созданного на основе токамака. На установке Глобус-М впервые в мире проводятся эксперименты согласно отечественной теоретической идее генерации тороидального тока плазмы с помощью волн на частотах нижнего гибридного резонанса, замедленных в полоидальном направлении.

Также впервые на сферических токамаках будет апробирована генерация тока при традиционном замедлении волны в тороидальном направлении.

В установке Глобус-М впервые в мире использован графит марки РГТ для защиты обращенной к плазме поверхности. Также впервые на сферических токамаках для защиты области дивертора применяются сорта вольфрама, рекомендованные для ИТЭРа, и исследуется эрозия поверхности данного материала.

3. Перечень выполняемых и планируемых к выполнению научно-исследовательских работ в 2017-2019 годах

Для успешного проведения исследований по всем перечисленным направлениям необходимо сооружение и запуск модернизированной установки Глобус-М2. Ее новая электромагнитная система способна выдерживать значительно большие электродинамические нагрузки, что позволит увеличить в эксперименте магнитное поле и ток плазмы в 2-2.5. Изготовлены все компоненты новой установки и осуществляется ее сборка. В течение 2017 года планируется подключить источники питания, основное диагностическое и технологическое оборудование и продолжить работы по Программе научных исследований.

В модернизированной установке сохраняется имеющаяся вакуумная камера и средства защиты обращенной к плазме поверхности. В настоящее время примерно 90% внутренней поверхности камеры площадью четыре квадратных метра облицовано плитками из легированного титаном рекристаллизованного графита марки РГТ. При наличии средств целесообразно провести полномасштабную очистку графитовых плиток (всего 600 штук) с промывкой в ультразвуковой ванне и отжигом при температуре 900⁰С в вакууме.

В период пусконаладочных работ существующая база данных позволяет проводить анализ различных плазменных процессов, таких как полный срыв тока плазмы, энергетический баланс ионов и электронов, генерация безындукционного тока, поведение радиационных потерь из основной и периферийной плазмы и т.д. Будет продолжена подготовка к экспериментам нового диагностического оборудования.

В 2017-18 годах предполагается выполнить следующие основные работы, связанные с запуском установки и увеличением основных параметров:

- физический пуск УНУ Глобус-М2;
- поэтапное увеличение тороидального магнитного поля от исходного значения 0,4 Тл при постоянном токе плазмы 0,2-0,25 МА;

- исследование неоднородных по пространству магнитных полей ошибок, создаваемых погрешностями конструкции электромагнитной системы и их компенсация с помощью обмоток коррекции;
- поэтапное увеличение тока плазмы от исходного значения 0,2 МА до максимального значения 0,4-0,5 МА при повышенном магнитном поле;
- наладка систем управления вертикальным и радиальным положением плазмы при повышенных значениях магнитного поля и тока;
- настройка алгоритмов реконструкции равновесных магнитных конфигураций кодом EFIT и алгоритмом подвижных токовых колец с учетом параметров новой электромагнитной системы;
- получение оторванных от диафрагмы магнитных конфигураций диверторного типа с вытянутостью в вертикальном направлении в диапазоне 1,5-2;
- реконструкция оптической схемы диагностики Томсоновского рассеяния лазерного излучения и измерения пространственных распределений температуры и плотности электронов в режиме омического нагрева в широком диапазоне магнитного поля и тока плазмы;
- измерение и анализ диамагнетизма плазмы;
- предварительный анализ энергетического баланса плазмы при повышенных значениях магнитного поля и тока в режиме омического нагрева;
- проведение пробных экспериментов с инжекцией в плазму нейтрального пучка мощностью до 1 МВт, энергией до 30 кэВ с использованием одного инжектора;
- измерение параметров плазмы в экспериментах с инжекцией при повышенном значении магнитного поля и повышенном значении магнитного поля и тока плазмы;
- проведение пробных измерений параметров периферийной плазмы подвижным Ленгмюровским зондом;
- подготовка к экспериментам «прыгающего» Ленгмюровского зонда;
- подготовка к экспериментам клистронного ВЧ генератора с новым модулятором и волноводным трактом;
- эскизная проработка диагностического пучка тяжелых ионов;
- исследование температурных условий работы дивертора при облучении вольфрамовых образцов-прототипов в струе гелиевой плазменной пушки.

Будут выполняться работы по действующим программам и грантам, направленные на исследования по перечисленным выше научным направлениям. Планируется подготовить к экспериментам второй инжектор мощностью 1 МВт с энергией частиц 50 кэВ, систему нагрева плазмы излучением в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса, систему для ввода в плазму излучения на частоте 2.45 ГГц.

4. Контроль за реализацией Программы

На УНУ Глобус-М еженедельно под председательством руководителя УНУ Глобус-М, проходят научно-технические совещания, на которых обсуждаются результаты и планы проведения текущих экспериментов и проблемы, связанные с обеспечением эксплуатации установки УНУ Глобус-М, ход работ по модернизации. Совещание проводится регулярно с начала 2000-х годов. К началу 2017 года проведено около 900 совещаний, состав участников и принятые решения протоколируются.

Текущие результаты научной работы и предложения по постановке и проведению новых экспериментов и использования новых методик измерений регулярно обсуждаются на внутренних семинарах сотрудников, принимающих участие в работах на УНУ Глобус-М. На этих семинарах заслушиваются и обсуждаются работы, представляемые на научные конференции и конкурсы, а также выступления на ученых советах по защите диссертаций и дипломных работ. Информация о проведении семинаров рассылается заблаговременно по электронной почте всем заинтересованным лицам.

На УНУ Глобус-М создан научно-технический совет (НТС), основной задачей которого является формирование планов и программы научных исследований на УНУ, в том числе, проведение конкурсного отбора заявок на проведение исследований с использованием инфраструктуры УНУ. В состав НТС входят представители ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ведущие специалисты других научных и образовательных организаций, имеющие значимые достижения в области управляемого термоядерного синтеза.

Со стороны базовой организации – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, контроль над выполнением программы осуществляют: заведующий лабораторией физики высокотемпературной плазмы доктор физ.-мат. наук, проф. Е.З. Гусаков, со стороны дирекции - первый зам. директора, доктор физ.-мат. наук, проф. С.В. Лебедев, руководитель отделения Физики плазмы, атомной физики и астрофизики, доктор физ.-мат. наук. А.М. Быков и лично директор института академик РАН, проф. А.Г. Забродский. Дирекцией института утверждаются отчеты о выполнении научных работ и заявки на участие в конкурсах. Ряд отчетов предварительно рассматривается на ученых советах отделений института. Е.З. Гусаков и С.В. Лебедев принимают непосредственное участие в научной программе УНУ Глобус-М. Все перечисленные ученые регулярно посещают УНУ сферический токамак Глобус-М, как лично, так и в составе различных делегаций, для которых устраиваются ознакомительные экскурсии. Периодически руководитель УНУ д. ф.-м. наук В.К. Гусев выступает с докладами перед Ученым Советом ФТИ, который, таким образом информируется о ходе выполнения программы.

Еженедельный контроль над выполнением Программы осуществляется в ходе

личных встреч заведующего лабораторией физики высокотемпературной плазмы, проф. Е.З. Гусаков с руководителем УНУ Глобус-М В.К. Гусевым, который одновременно является его заместителем.

Периодически наиболее значимые результаты представляются на институтские конкурсы научных работ, по итогам которых присуждаются Премии научных отделений и Премии ФТИ. Выступления на конкурсах заслушиваются и обсуждаются научной общественностью института.

5. Результаты реализации Программы, оценка ее эффективности

Настоящую Программу исследований УНУ Глобус-М, рассчитанную на 2017-2019 годы, следует рассматривать как этап среднесрочной перспективной программы, которую можно осуществить в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Результатом реализации настоящей программы будет решение ряда фундаментальных и прикладных задач, относящихся к области физики плазмы, энергетики, в том числе атомной и термоядерной, проблем преобразования энергии. Работы, выполняемые в рамках настоящей программы, направлены на решение приоритетной научной задачи «Исследование и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики». В долгосрочной перспективе они затрагивают задачу «Разработка новых методов переработки и использования возобновляемого и техногенного сырья». Ожидаемые результаты явятся шагом в получении новых знаний, необходимых для создания термоядерного источника нейтронов на базе сферического токамака, и создании перспективных методов диагностики плазмы и технологий проведения плазменного эксперимента.

В результате реализации Программы будет завершена модернизация УНУ Глобус-М, осуществлен физический пуск установки Глобус-М2 и начаты первые эксперименты.

Результаты реализации Программы могут быть использованы в российских научных центрах, проводящих исследования по данному направлению. В их числе НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), ТРИНИТИ (Троицк, Московская Обл.), Институт общей физики им. А.М. Прохорова (Москва), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, АО «НИИЭФА» (С. Петербург), ИПФ, (Нижний Новгород), Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск). Результаты работ междисциплинарного характера представляют интерес для специалистов по системам управления (ПМПУ СПб ГУ и АО "НИИЭФА"), специалистов математиков (ИПМ РАН им. М.В.Келдыша), специалистов химиков (ИФХ РАН им. М.В.Фрумкина).

В рамках реализации программы с использованием инфраструктуры и оборудования УНУ будут подготовлены магистерские, кандидатские и докторские диссертации сотрудников УНУ и организаций - пользователей.

Литература

1. Masayuki Ono and Robert Kaita. Phys. Plasmas 22, 040501 (2015)
2. M. Ono, S. M. Kaye, Y.-K. M. Peng et al, Nucl. Fusion 40, 557 (2000).
3. S. M. Kaye, M. Ono, Y.-K. M. Peng, et al, Fusion Technol. 36, 16 (1999).
4. M. Cox and MAST Team, Fusion Eng. Des. 46, 397 (1999).
5. V. K. Gusev, S. E. Aleksandrov, V. Kh Alimov et al, Nucl. Fusion 49, 104021 (2009).
6. G. D. Garstka, S. J. Diem, R. J. Fonck et al., Phys. Plasmas 10, 1705 (2003).
7. R. Majeski, R. Doerner, T. Gray et al, Phys. Rev. Lett. 97, 075002 (2006).
8. R. Majeski, L. Berzak, T. Gray et al, Nucl. Fusion 49, 055014 (2009).
9. J. Redd, B. A. Nelson, T. R. Jarboe et al, Phys. Plasmas 9, 2006 (2002).
10. K. Hanada, K. N. Sato, H. Zushi, K. Nakamura et al, IAEA Fusion Energy Conference (2008), No. FT/P3-25.
11. Y. Takase, A. Ejiri, N. Kasuya et al, Nucl. Fusion 41, 1543 (2001).
12. Y. Ono, T. Kimura, E. Kawamori et al, Nucl. Fusion 43, 789 (2003).
13. Y. Ono, R. Imazawa, H. Imanaka et al, in IAEA Fusion Energy Conference (2008), No. EX/P9-4.
14. T. Maekawa, Y. Terumichi, H. Tanaka et al, Nucl. Fusion 45, 1439 (2005).
15. M. Nagata, T. Kanki, N. Fukumoto, and T. Uyama, Phys. Plasmas 10, 2932 (2003).
16. K. J. Chung, Y. H. An, B. K. Jung et al, Plasma Sci. Technol. 15, 244 (2013).
17. W. H. Wang, Y. X. He, Z. Gao et al, Plasma Phys. Controlled Fusion 47, 1 (2005).
18. K. Yamazaki, Y. Taira, T. Oishi, H. Arimoto, and T. Shoji, J. Plasma Fusion Res. 8, 1044 (2009).
19. G. O. Ludwig, E. Del Bosco, and J. G. Ferreira, Nucl. Fusion 45, 675 (2005).
20. F. Alladio, P. Costa, A. Mancuso, P. Micozzi, S. Papastergiou, and F. Rogier, Nucl. Fusion 46, S613 (2006).
21. M. A. Abdou, S. E. Berk, A. Ying et al, Fusion Technol. 29, 1 (1996).
22. E. T. Cheng, Y. K. Martin Peng, R. Cerbone et al, Fusion Eng. Des. 38, 219 (1998).
23. Y. K. M. Peng, J. M. Canik, S. J. Diem et al, Fusion Sci. Technol. 60, 441 (2011).
24. J. Menard, T. Brown, J. Canik et al, in IAEA Fusion Energy Conference (2012), No. FTP/3-4
25. G. M. Voss, S. Davis, A. Dnestrovskij et al, Fusion Eng. Des. 83, 1648 (2008).
26. J. Menard, T. Brown, J. Canik et al, in IAEA Fusion Energy Conference (2012), No. FTP/3-4
27. F. Najmabadi, M. Billone, L. Bromberg et al, Fusion Eng. Des. 65, 143 (2003)
28. J. E. Menard, S. Gerhardt, M. Bell et al, Nucl. Fusion 52, 083015 (2012).
29. S. M. Kaye, S. Gerhardt, W. Guttenfelder et al, Nucl. Fusion 53, 063005 (2013)
30. Lao L.L., John H. St., Stambaugh R.D., et al. Nucl. Fusion. 1985. V. 25. P.1611 – 1622.
31. Vasiliev V.I., Kostsov Yu.A., Lobanov K.M., et al. // Nucl. Fusion, 2006. V. 46. S625-S628.
32. Н. В. Сахаров, А. В. Воронин, В. К. Гусев *и др.*, *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2015, том 41, № 12, с. 115–119.

33. Eidietis N.W., Gerhardt S.P., Granetz R. Et al./ Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 063030.
34. Sugihara M., Shimada M., Fujieda H. et al Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. 337.

Заведующий лабораторией
физики высокотемпературной плазмы,
профессор, доктор физ.-мат. наук

Е.З. Гусаков

Руководитель УНУ Глобус-М,
Гл. научный сотр., доктор физ.-мат. наук

В.К. Гусев