

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
академик РАН



Г. Забродский

**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ УНИКАЛЬНОЙ НАУЧНОЙ УСТАНОВКИ
"СФЕРИЧЕСКИЙ ТОКАМАК ГЛОБУС-М"
НА 2017-2019 ГОДЫ**

Программа развития УНУ Глобус-М на 2017-2019 годы (далее Программа) разработана с учетом отечественных и мировых тенденций развития исследований в области физики высокотемпературной плазмы и УТС. Основные мероприятия Программы связаны с решением Приоритетной научной задачи «Исследования и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики». Программа предусматривает как развитие материально-технической базы УНУ, так и улучшение инженерных и физических параметров проводимых экспериментов и расширение перечня тематик исследований и используемых методик.

Ключевым мероприятием Программы является завершение модернизации электромагнитной системы (ЭМС) УНУ с последующим физическим пуском модернизированной установки и поэтапным достижением проектных параметров. Новая ЭМС рассчитана на увеличение магнитного поля и тока плазмы в 2-2.5 раза по сравнению с действующими значениями. Достижению указанных параметров способствует проведенная ранее реконструкция сетевых источников питания суммарной мощностью 125 МВт. Одновременно будут существенно улучшены характеристики систем нагрева плазмы и генерации безындукционного тока.

Модернизация основных систем УНУ, наряду с развитием кадрового потенциала и постоянным совершенствованием методик эксперимента, будет способствовать повышению привлекательности УНУ для организаций пользователей.

Раздел 1. Характеристика УНУ

1.1. Краткое описание УНУ и ее основные параметры и характеристики.

В 1999г. в ФТИ им. А.Ф. Иоффе произведен физический пуск сферического токамака Глобус-М (УНУ Глобус-М). Наряду со сферическими токамаками NSTX (США) и MAST (Великобритания) исследования на УНУ Глобус-М направлены на демонстрацию концептуальных преимуществ тороидальных магнитных конфигураций с малым аспектным отношением. Достигнутые на сферических токамаках результаты позволяют рассматривать установки данного типа в качестве привлекательной потенциальной основы для создания устройств масштаба термоядерного источника нейтронов, а также, в долгосрочной перспективе, термоядерного реактора.

Основная проблема, возникающая при сооружении токамака с малым аспектным отношением, связана с относительно малым внутренним отверстием тора. Из-за ограниченного диаметра отверстия расположенные в нем проводники ограничены в размерах и подвержены большим электромагнитным и тепловым нагрузкам. Для достижения достаточно больших значений магнитного поля и тока плазмы в конструкции установки использованы современные высокопрочные проводники, изготовленные из холоднокатанной меди с большой электрической проводимостью и механической прочностью, превышающей прочность обычной меди в 4-5 раз.

Токи в обмотках электромагнитной системы УНУ Глобус-М поддерживаются сетевыми источниками питания суммарной мощностью 125 МВт. Девять пар обмоток полоидального магнитного поля позволяют получать магнитные конфигурации плазмы, подобные конфигурации ИТЭРа, границей которых является магнитная сепаратриса с нижним или верхним положением X-точки. Вертикальное и горизонтальное положение плазмы, а также протекающий по плазме ток, контролируются автоматическими системами управления с отрицательной обратной связью.

Обращенная к плазме поверхность вакуумной камеры защищена плитками, изготовленными из графита марок РГТ с малой пористостью и низкими коэффициентами распыления. Размеры камеры и наличие патрубков диаметром 400 мм обеспечивают свободный доступ внутрь камеры с возможностью проведения сложных монтажных работ по установке защитных элементов и диагностических датчиков. В экспериментах, в частности, исследовано поведение вольфрама в качестве защитного материала нижних диверторных пластин.

Основным методом дополнительного нагрева плазмы является инжекция нейтрального пучка водорода или дейтерия мощностью до 1 МВт с энергией атомов до 30 кэВ. Вторым методом является нагрев электромагнитным излучением на частоте ионного циклотронного резонанса. Инжекция пучка используется также для замещения части индукционного тока плазмы на безындукционный. Еще одним способом генерации безындукционного тока является ввод в плазму излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса. Имеются генераторы и антенны на частоты 900 МГц и 2.45 ГГц.

В экспериментах на УНУ Глобус-М используется уникальная плазменная пушка. С ее помощью формируется сгусток плазмы высокой плотности, который может использоваться как для подачи топлива в центральную зону плазмы, так и для исследования радиационной стойкости материалов для защиты обращенной к плазме поверхности. В последнем случае пушка имитирует ELM (Edge Localized Mode) – событие в плазме термоядерных установок.

В экспериментах используется большое количество диагностических методик, которые постоянно совершенствуются, а их перечень непрерывно пополняется.

К настоящему времени УНУ Глобус-М имеет следующие основные инженерные параметры:

- большой радиус плазмы, $R = 0.34-0.36$ м;
- малый радиус плазмы, $a = 0.24$ м;
- аспектное отношение тора, $A = R/a = 1.5$
- объем плазмы $0.4-0.5$ м³;
- площадь поперечного сечения плазмы, $S_p = 0.2-0.25$ м²;
- вытянутость плазмы в вертикальном направлении, $k \leq 2.1$;
- треугольность плазмы, $\delta \leq 0.3$;
- ток плазмы, $I_p \leq 0.25$ МА;
- тороидальное магнитное поле на оси плазмы $B_T \leq 0.5$ Тл;
- суммарная мощность сетевых источников питания 125 МВт (питание от городской сети 110кВ);
- мощность инжектируемого пучка, $P_b \leq 1$ МВт;
- энергия частиц пучка, $E_b \leq 30$ кэВ.

1.2. Приоритетные направления развития науки и технологий и критические технологии, в рамках которых работает УНУ

Работу УНУ Глобус-М можно отнести к двум приоритетным направлениям из списка «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации», утвержденных Указом Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года:

- Рациональное природопользование;
- Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика (основное).

Также УНУ работает в рамках критических технологий из Перечня критических технологий Российской Федерации:

- Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.
- Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.
- Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Кроме этого работа УНУ Глобус-М укладывается в рамки Технологических платформ Ядерные и радиационные технологии (платформа 12 Управляемый термоядерный синтез) и Энергетика (платформа 16 Перспективные технологии возобновляемой энергетики).

1.3. Основные направления научных исследований, проводимых с использованием УНУ

Основные направления научных исследований, проводимых с использованием УНУ Глобус-М, отражены в Программе научных исследований, размещенной на сайте УНУ. В настоящее время исследования осуществляются по следующим финансируемым программам и грантам:

- 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.

Эти исследования затрагивают ряд актуальных научных проблем.

В области физики плазмы и УТС:

- 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;
- разработка диагностических систем.

В области систем управления:

- разработка числовых и аналоговых методов автоматического управления параметрами плазмы.

В области конструирования и материаловедения:

- разработка электромагнитных систем компактных токамаков с малым аспектным отношением;
- разработка сильноточных источников питания для установок типа токамак;
- изучение взаимодействия плазмы с материалами, подвергающимися воздействию потоков плазмы большой мощности,

-разработка методов защиты обращенных к плазме поверхностей и исследование материалов для защиты первой стенки.

В области энергетических систем и источников нейтронов на базе токамака-реактора, в т.ч.:

- разработка методов диагностики реакторной плазмы;
- разработка новых методов подачи топлива в горячую зону плазменного шнура;
- разработка прототипов термоядерных источников нейтронов.

В области вычислительных и компьютерных систем, в т.ч.:

- разработка систем сбора и обработки информации для целей одновременного доступа большого числа удаленных пользователей.

Исследования по основным направлениям осуществляются с участием организаций-пользователей УНУ Глобус-М.

1.4. Использование УНУ в мероприятиях по подготовке кадров высшей квалификации

УНУ сферический токамак Глобус-М активно используется в процессе подготовки кадров высшей квалификации. На УНУ Глобус-М регулярно проходят практику и участвуют в экспериментальном процессе студенты ряда ВУЗов Санкт-Петербурга и других городов, обучающиеся по программе бакалавров, магистров, специалистов – СПбГПУ, СПбГУ, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», МИФИ, МФТИ и др. За время научной эксплуатации УНУ студентами было защищено более 30 диссертаций на соискание степени бакалавра и магистра.

Оборудование УНУ используется для подготовки аспирантов. На протяжении последних лет ежегодно на УНУ зачисляются новые аспиранты. Их руководство осуществляется сотрудниками УНУ. Также сотрудники УНУ читают курсы лекций для аспирантов разных лет обучения.

На основе анализа результатов, полученных на УНУ сферический токамак Глобус-М, был защищен ряд кандидатских и докторских диссертаций. Результаты работы УНУ вошли в 12 диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, защищенных сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), СПб ГУ (Санкт-Петербург), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, «Курчатовский институт» (Москва), ТРИНИТИ (Троицк, Московская обл).

Данные, полученные на УНУ Глобус-М, также вошли в семь диссертаций на соискание ученых степеней доктора физико-математических и доктора технических наук, защищенных сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе АО «НИИЭФА» (Санкт Петербург), НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

Сотрудники УНУ Глобус-М регулярно проводят ознакомительные экскурсии для студентов начальных курсов профильных вузов и для школьников старших классов физико-математических школ Санкт Петербурга.

Молодые сотрудники, аспиранты и студенты регулярно выступает с докладами о своей исследовательской работе на научно-техническом совещании УНУ Глобус-М и семинаре лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ. Они участвуют в днях науки, проводимых Правительством г. Санкт Петербурга на базе ведущих университетов и в тематических российских рабочих совещаниях и конференциях, где выступают с докладами.

Молодые ученые и аспиранты постоянно принимают участие в международных конференциях. В их числе ежегодная Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, ежегодная Конференция Европейского Физического Общества по физике плазмы, Конференция МАГАТЭ по термоядерной энергии. На 42-й конференции Европейского физического общества по физике плазмы аспирантом Бахаревым Н.Н. был успешно представлен устный обзорный приглашенный доклад "Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development.

Молодые ученые и аспиранты УНУ Глобус-М регулярно участвуют в конкурсах на получение стипендий и грантов на научные исследования. В 2017 году под руководством молодых ученых проводятся исследования по Гранту Президента РФ 14.W01.16.5846.МК и трем грантам РФФИ.

1.5. Наиболее значимые научные результаты, полученные с использованием оборудования УНУ за последние 3 года.

За период 2014-2016 годов на УНУ Глобус-М были достигнуты следующие значимые результаты:

1. Проведены комплексные исследования процессов, происходящих при взаимодействии пучка атомов высокой энергии с плазменной мишенью. Мощность инжектируемого пучка водорода или дейтерия достигала 1 МВт при энергии атомов до 30 кэВ. Изучен нагрев плазмы и особенности удержания быстрых ионов в плазме сферического токамака. Построен эмпирический скейлинг для нейтронного выхода в компактном токамаке от параметров плазмы в режиме "плазма-пучок" (N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov, et al, «Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak» Nucl. Fusion. 2015. 55. 043023).

2. При инжекции в плазму нейтрального пучка обнаружено возбуждение неустойчивостей в альфвеновском диапазоне длин волн. В условиях экспериментов на сферическом токамаке Глобус-М быстрые ионы пучка воздействуют на устойчивость плазмы аналогично альфа-частицам в термоядерных установках. Показано, что альфвеновские неустойчивости влияют на удержание быстрых ионов (Yu. V. Petrov, N. N. Bakharev, V. K. Gusev et al, «*Effect of toroidal Alfvén eigenmodes on fast particle confinement in the spherical tokamak Globus-M*» J. Plasma Phys. 2015, vol. 81, 515810601.
3. Инжекция в плазму нейтрального пучка параллельно направлению тока плазмы приводила к возникновению в плазме безындукционного тока, который, в существующих условиях эксперимента, достигал 30 % от полного тока. Исследованы зависимости эффективности генерации этого тока от изотопного состава пучка и плазмы. Исследовано влияние параметров разряда, таких как магнитное поле, ток плазмы и плотность, и параметров пучка (энергия частиц) на эффективность генерации безындукционного тока в плазме. Проведено моделирование процессов генерации безындукционного тока в плазме с помощью кодов ASTRA и NUBEAM. (П.Б. Щеголев, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев и др., «*Первые эксперименты по генерации токов увлечения с помощью атомарного пучка в сферическом токамаке Глобус-М*» Журнал технической физики, 2015, том 8, вып. 9, с. 62-66
4. Замещение доли индукционного тока безындукционным было также достигнуто при вводе в плазму электромагнитного излучения на частоте 2.45 ГГц. Для ввода излучения использовался созданный в ФТИ грилл из десяти волноводов. Вращение грилла позволяло вводить в плазму волны с замедлением как в тороидальном, так и в полоидальном направлении (V.V. Dyachenko, O.N. Shcherbinin, E.Z. Gusakov et al, «*The first lower hybrid current drive experiments in the spherical tokamak Globus-M*» Nucl. Fusion 55. 2015. 113001)
5. Получили развитие методы формирования и реконструкции равновесных магнитных конфигураций диверторного типа с вытянутостью плазмы в вертикальном направлении $k \leq 2$ и треугольностью поперечного сечения $\delta \leq 0.5$. Было продемонстрировано хорошее соответствие реконструкции границы плазмы кодом EFIT и алгоритмом подвижных токовых колец. Данные реконструкции также соответствуют данным наблюдения инфракрасной камерой. (Н. В. Сахаров, А. В. Воронин, В. К. Гусев и др., «*Реконструкция равновесных магнитных конфигураций*

плазмы в сферическом токамаке Глобус-М» ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2015, том 41, № 12, с. 115–11)

6. Исследованы свойства периферийной плазмы в области магнитной сепаратрисы. По данным измерений и с помощью численного моделирования показано, что в режиме улучшенного удержания (H-мода) ширина диверторного слоя (SOL – scrape-off layer) обратно пропорциональна току плазмы, что характерно для токамаков с обычным аспектным отношением. Определены тепловые потоки на нижние диверторные пластины (E Vekshina, I Senichenkov, V Rozhansky, E Kaveeva, N Khromov, G Kurskiev, M Patrov and Globus-M team «*Globus-M plasma edge modeling with B2SOLPS5.2 code*» Plasma Phys. Control. Fusion 58 (2016) 085007)
7. С помощью разработанной в ФТИ уникальной плазменной пушки было исследовано воздействие импульсной плазменной струи на поверхность сортов вольфрама, планируемых к использованию в ИТЭР. Ударная нагрузка на поверхность в таких опытах близка к ELM событию, ожидаемому в ИТЭР. Обнаружены значительные изменения структуры и морфологии поверхностного слоя. 1000-кратное облучение радикально изменяет характер топографии. Поверхность становится грубой, формируется рекристаллизованный слой глубиной 100 μm . Образуется рыхлый слой под облучаемой поверхностью. (Воронин А.В., Гусев В.К., Демина Е.В., Новохацкий А.Н., Прусакова М.Д., «*Исследование вольфрама при циклическом воздействии струи плазменной пушки*», ПЖТФ, 2014, том 40, выпуск 24, с. 120-126).
8. Проведено сравнительное исследование циклического воздействия плазмы на образцы вольфрама после их облучения пушкой и плазмой токамака в области нижних диверторных пластин. Показано, что морфология поверхности вольфрама, облученного водородной плазмой пушки и дейтериевой плазмой токамака Глобус-М, изменилась — структура сглаживалась. Характерная глубина слоя, в котором накапливались примеси, превышала 0.5 μm . Для образца, облученного 1000 импульсами пушки и 2370 импульсами токамака, эта глубина была наибольшей. Показано, что гелиевая струя плазменной пушки позволяет моделировать воздействия ионов гелия на материалы дивертора ИТЭР — создавался слой субмикрочастиц (пузыри). (А.В. Воронин, А.Е. Александров, Б.Я. Бер и др., «*Экспериментальное изучение циклического воздействия плазмы на вольфрам*», Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 3, с. 51-57)

9. Исследованы характеристики большого срыва тока плазмы. Показано, что масса иона рабочего газа (водород, дейтерий) практически не влияет на процесс срыва, а наведенный в камере ток нарастает с увеличением времени срыва. Сделаны предварительные оценки электромагнитных нагрузок на камеру токамака, связанных с индуцированным при срыве тороидальным током в камере (Н.В.Сахаров, В.К. Гусев, А.Д.Ибляминова и др., «Характеристики большого срыва плазменных разрядов в сферическом токамаке Глобус-М», Физика плазмы, 2017, том 41, №4, с.1-12)

Основные результаты работ на сферическом токамаке Глобус-М за последние годы приведены в обзорах:

1. V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, B.Ya. Ber, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, A.S. Bykov, F.V. Chernyshev, E.V. Demina, V.V. Dyachenko, P.R. Goncharov, A.E. Gorodetsky, E.Z. Gusakov, A.D. Iblyaminova, A.A. Ivanov, M.A. Irzak, E.G. Kaveeva, S.A. Khitrov, M.V. Khokhlov, N.A. Khromov, V.V. Kolmogorov, V.A. Kornev, S.V. Krasnov, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, S.A. Lepikhov, N.V. Litunovsky, I.V. Mazul, A.D. Melnik, V.V. Mikov, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatsky, A.D. Ovsyannikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, N.V. Sakharov, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, V.Yu. Sergeev, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, V.S. Tanaev, V.N. Tanchuk, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, E.O. Vekshina, A.V. Voronin, S.P. Voskoboinikov, F. Wagner, A.Yu. Yashin, G.V. Zadvitskiy, A.P. Zakharov, R.Kh. Zalavutdinov and E.G. Zhilin «Review of Globus-M spherical tokamak results» Nucl. Fusion 55 (2015) 104016
2. V K Gusev, N N Bakharev, B Ya Ber, V V Bulanin, F V Chernyshev, V V Dyachenko, P R Goncharov, E Z Gusakov, A D Iblyaminova, M A Irzak, E G Kaveeva, S A Khitrov, N A Khromov, V A Kornev, G S Kurskiev, A D Melnik, V B Minaev, A B Mineev, M I Mironov, A N Novokhatsky, M I Patrov, A V Petrov, Yu V Petrov, V A Rozhansky, N V Sakharov, A N Saveliev, I Yu Senichenkov, P B Shchegolev, O N Shcherbinin, S Yu Tolstyakov, V I Varfolomeev, A V Voronin and A Yu Yashin «Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development» Plasma Phys. Control. Fusion (2015) 014032

1.6. Перечень услуг, оказываемых УНУ внешним и внутренним пользователям

УНУ Глобус-М оказывает услуги пользователям уникальным научным оборудованием по всему перечню исследований, проводимых на Глобус-М. Услуги оказываются:

- в постановке экспериментов по заказам пользователей;
- в проведении измерений;
- в испытаниях образцов макетов приборов;
- в испытаниях материалов;
- в испытаниях оборудования;
- в отработке методик измерений;
- в предоставлении экспериментальной базы данных.

Кроме этого оказываются консультационные услуги пользователям.

Значительная часть услуг - это образовательные услуги. Например, организация практики студентов, аспирантов по заявкам пользователей.

Также оказываются услуги по экспертизе результатов НИР и НИОКР.

Сотрудники УНУ регулярно участвуют в рецензировании статей по близким тематикам исследований, направляемых в российские и зарубежные научные журналы.

Раздел 2. Цель и задачи Программы

2.1 Цель Программы

Целью Программы развития является расширение функциональных возможностей и качественного улучшения характеристик УНУ Глобус-М для ее эффективного использования в реализации ПНЗ «Исследования и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики».

Модернизация УНУ и ее материально-технической базы направлена на достижение значимых научных результатов мирового уровня. Программа способствует развитию базовой организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе и укреплению связей с ведущими мировыми исследовательскими центрами. В процессе реализации Программы будет обеспечена доступность УНУ для организаций пользователей, в том числе за счет улучшения информационного обеспечения УНУ, расширения перечня услуг и разработки новых методик исследований.

Основными целями Программы развития УНУ Глобус-М является проведение исследований, направленных на решение ПНЗ, по следующим основным направлениям:

- Взаимодействие горячей термоядерной плазмы с быстрыми сверхтепловыми частицами, образующимися в процессе дополнительного нагрева плазмы волнами и пучками атомов высокой энергии.

- Взаимодействие горячей плазмы с электромагнитным излучением в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса при возбуждении в плазме безындукционного тока.
- Физика процессов в периферийной плазме, удерживаемой в диверторных магнитных конфигурациях со сложной формой поперечного сечения.

2.2. Задачи программы

Основной задачей Программы развития на текущий период является завершение модернизации УНУ с использованием новой электромагнитной системы. Модернизация осуществляется в целях повышения основных инженерных параметров – магнитного поля и тока плазмы в 2-2.5 раза до максимальных значений тороидального магнитного поля $B_T = 1$ Тл и тока $I_p = 0.5$ МА. Численное моделирование, выполненное с учетом полученных на УНУ экспериментальных данных, показывает, что такое увеличение магнитного поля и тока приведет к существенному, в несколько раз, росту температуры и давления плазмы. При этом следует ожидать заметного уменьшения безразмерной частоты столкновений заряженных частиц, влияющей на потери энергии.

Сферические токамаки являются относительно новыми устройствами в исследованиях по физике высокотемпературной плазмы и УТС. Ограничение магнитного поля в них связано с относительно малым диаметром внутреннего отверстия тока. Размещенные в отверстии проводники подвержены высоким тепловым и механическим нагрузкам. Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные на трех крупнейших сферических токамаках MAST (Великобритания), NSTX (США) и Глобус-М, показали, что увеличение магнитного поля и тока плазмы приведет к целому ряду положительных физических эффектов. Ожидается существенное снижение потерь быстрых частиц, возникающих при нагреве плазмы атомными пучками высокой энергии и электромагнитным излучением на частоте ионного циклотронного резонанса. При этом увеличится вкладываемая в плазму полезная мощность и вырастет эффективность взаимодействия пучков с плазменной мишенью, что особенно важно для работы устройств масштаба термоядерного источника нейтронов. Кроме этого, при увеличении магнитного поля вырастет доля безындукционного тока плазмы. По проведенным оценкам безындукционный ток в модернизированной установке Глобус-М2 может достигать 100% от полного тока плазмы, что имеет принципиально-важное значение для стационарной работы термоядерных установок. Рост доли безындукционного тока обусловлен как увеличением давления плазмы (возникает самогенерируемый бутстрэп ток), так и улучшением удержания быстрых ионов. Значительно улучшается поглощение

излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса, что также способствует генерации безындукционного тока. Ожидается и ряд других эффектов.

На всех трех крупных сферических токамаках было принято решение о модернизации этих установок в целях увеличения магнитного поля и тока плазмы. На протяжении последних лет проводились интенсивные конструкторские и технологические разработки, которые показали, что в действующих установках тороидальное магнитное поле может быть увеличено примерно в два раза при сохранении в отверстии тора обмотки для возбуждения тока плазмы индукционным путем.

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. Важнейшим следствием этой поддержки стало изготовление новой ЭМС УНУ Глобус-М. Система разработана и изготовлена в Санкт-Петербурге силами ФТИ им. А.Ф. Иоффе, АО «НИИЭФА» и ЗАО «ИНТЕХМАШ». Ее краткое описание приведено в докладе на 26-й Конференции МАГАТЭ по термоядерной энергии (V. Minaev, V. Gusev, N. Sakharov et al., “Spherical Tokamak Globus-M2: Design, Integration, Construction” Proc. of 26th FEC IAEA conf., FIP/P7-41, Kyoto, Japan, 17–22 October 2016). Фотография новой ЭМС показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фотография электромагнитной системы установки Глобус-М2 в экспериментальном зале

Для экспериментов с новой ЭМС была проведена модернизация 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, расположенные на площадке ФТИ, были оснащены новыми комплектными распределительными устройствами (КРУ) с вакуумными выключателями, что повышает надежность работы этих устройств и обеспечивает аварийную защиту источников.

Кроме того, 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.

В задачи Программы входит:

- сборка новой ЭМС с прежней камерой токамака и технологическими системами;
- физический пуск новой установки;
- реализация Программы научных исследований при повышенном значении магнитного поля с использованием нового оборудования;
- разработка и освоение новых методик исследований или измерений;
- расширение перечня оказываемых с использованием УНУ услуг;
- повышение доступности УНУ для внешних и внутренних пользователей;
- подготовка научных кадров

Раздел 3. Мероприятия Программы

3.1. Модернизация токамака Глобус-М

Модернизация УНУ Глобус-М находится в завершающей стадии. Весной 2017 года будет закончена сборка новой ЭМС с вакуумной камерой и начаты силовые испытания. В течение года будет установлено необходимое технологическое и диагностическое оборудование и продолжены работы по Программе научных исследований с использованием модернизированного токамака Глобус-М2.

Весь комплекс работ по модернизации как самой УНУ, так и ее систем включает следующие мероприятия, которые планируется выполнить с участием предприятий Санкт-Петербурга:

3.1.1. Модернизация электромагнитной системы токамака

3.1.1.1. Сборка модернизированной установки:

- Сборка установки (демонтаж вак. камеры и обмоток полоидального магнитного поля (ОПП), монтаж ЭМС с вак. камерой и ОПП, отключение/подключение установки к фидерам).

Соисполнители: ЗАО "ИНТЕХМАШ", ООО «КОНТАКТ», ЗАО "НПО "Электрум".

- Демонтаж/монтаж систем к токамаку (диагностики, откачка, прогрев, защита вакуумной камеры, системы дополнительного нагрева).

Соисполнитель: ООО ИФТ.

- Проведение предпусковых испытаний и физический пуск модернизированной установки.

Соисполнители: АО "НИИЭФА", ООО ИФТ, ЗАО "НПО "Электрум")

3.1.1.2. Модернизация системы управления токамаком

- Модернизация системы управления токами в ЭМС токамака

Соисполнители: ГНЦ РФ ТРИНИТИ, ООО ИФТ

3.1.2. Модернизация системы электропитания токамака

3.1.2.1. Запуск модернизированных источников питания установки

- Проведение работ по настройке системы управления новых управляемых выпрямителей.

Соисполнитель: ООО "РИЛ".

3.1.2.2. Модернизация оборудования питающей ПС29

- Реконструкция шинного моста

Исполнитель: ООО «КОНТАКТ».

- Реконструкция системы выключения и защиты

Исполнитель: ООО «Таврида Электрик СПб»

3.1.3. Модернизация систем дополнительного нагрева и диагностик токамака

3.3.3.1. 2017 г. Размещение оборудования и работы по модернизации систем

- Проектные работы по подключению систем к токамаку.

Соисполнители: АО "НИИЭФА", ООО ИФТ, ООО "Мрия".

- Монтаж систем питания инжектора и клистрона

Соисполнитель: ООО «КОНТАКТ».

- Модернизация системы охлаждения инжектора.

Соисполнитель: ООО "Эйркул".

- Модернизация системы охлаждения комплекса ВЧ-нагрева плазмы.

Соисполнитель: ООО "Эйркул".

- Модернизация системы сбора света диагностики CXRS.

Соисполнитель: ООО ИФТ

3.1.3.2. Запуск модернизированных систем дополнительного нагрева плазмы и работы по модернизации диагностик

- Запуск инжектора атомов и подключение его к токамаку.

Соисполнители: ИЯФ СО РАН, ООО ИФТ.

- Запуск системы питания клистрона.

- ИЯФ СО РАН.

- Модернизация диагностики Томсоновского рассеяния.

Соисполнитель: ЗАО "Спектрал-Тех".

- Модернизация комплекса интерферометрической диагностики.

Исполнитель: ИЯФ СО РАН.

Для физического пуска УНУ необходимы следующие мероприятия:

- частичный монтаж защитного графитового покрытия внутри камеры;
- заглушка фланцев, подключение к камере системы откачки, системы прогрева, термопар;
- подключение диагностической аппаратуры первой очереди;
- откачка камеры с одновременной проверкой вакуумных уплотнений путем обдува гелием при комнатной температуре и при температуре 200⁰С;
- длительный циклический прогрев камеры и чистка тлеющим разрядом в гелии до достижения остаточного давления не хуже 5×10^{-8} мм. рт. столба.

При получении плазменного разряда потребуются дополнительная настройка систем автоматического управления положением и током плазмы.

Последующие мероприятия должны быть направлены на постепенное достижение проектных параметров модернизированной установки Глобус-М2 и проведение научных исследований по основным направлениям. В их число входит:

- увеличение площади защитного покрытия обращенной к плазме поверхности с возможной заменой графита на тугоплавкие материалы (вольфрам, молибден);
- подключение обмоток коррекции полей ошибок и подбор токов в них;
- поэтапное подключение инжекторов для нагрева плазмы атомным пучком при повышении

энергии частиц инжектируемого нейтрального пучка от 30 кэВ до 40 кэВ в старом инжекторе;
- установка диагностического оборудования второй очереди.

Развитие высокочастотных методов нагрева плазмы в сферическом токамаке Глобус-М предполагается проводить по двум частотным и физическим направлениям. В низкочастотном диапазоне, порядка 10МГц, целесообразно продолжить эксперименты по нагреву ионов в режиме т.н. ионно-циклотронного резонанса. Для этих экспериментов изготовлена новая двухпетлевая антенна, излучающая более определенный спектр волн и рассчитанная на введение ВЧ мощности до 400 кВт. Для этой антенны разрабатывается новый фидерный тракт. Модернизированный ВЧ комплекс планируется использовать также для апробации новой идеи нагрева плазмы с использованием малой добавки третьего сорта ионов.

Другое направление – неиндукционная генерация тока с помощью высокочастотных волн дециметрового диапазона частот (2.45 ГГц). После модернизации токамака Глобус-М тороидальное магнитное поле будет увеличено вдвое, что позволит провести эксперименты по генерации тока по традиционному сценарию с тороидальным замедлением возбуждаемых волн. Будет реконструирован антенно-фидерный тракт с волноводным делением мощности на 10 каналов, что позволит увеличить уровень подводимой мощности до 400 кВт в импульсе длительностью до 50 мс.

Предполагается начать монтаж и настройку нового универсального источника питания (модулятора) для обоих генераторных комплексов с выходной мощностью до 2 МВт при длительности импульса до 100 мс. Высоковольтный импульс формируется прямо из промышленной электросети.

3.2. Дооснащение объекта научной инфраструктуры необходимыми материалами и оборудованием

Целесообразно дооснастить УНУ Глобус-М следующими материалами и оборудованием:

- ячейки КРУ для коммутации сетевых источников питания в помещениях ФТИ на площадке 29-й подстанции Калининского района СПб (в настоящее время используются устаревшие ячейки с масляными выключателями, аналогичная замена ячеек была осуществлена на территории ФТИ в 2015-2016 годах); возможный изготовитель – «Таврида-Электрик», г. Санкт-Петербург;
- защитное покрытие обращенной к плазме поверхности из тугоплавких материалов типа

вольфрама и молибдена (используемое графитовое покрытие препятствует проведению полноценных экспериментов по ИЦР нагреву плазмы из-за сильного поглощения излучения, требуется периодическая трудоемкая очистка графита); может быть разработано и изготовлено силами ФТИ, АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург и ЗАО «ИНТЕХМАШ», Санкт-Петербург;

- ультразвуковая ванна для промывки элементов вакуумного оборудования (соблюдение требований вакуумной гигиены);

- вакуумная печь для прогрева элементов вакуумного оборудования при температуре 600⁰С (соблюдение требований вакуумной гигиены); возможный поставщик – «ОКТАН ВАКУУМ», г. Фрязино Московской области.

3.3. Модернизация, содержание и ремонт оборудования УНУ

Требуется периодическое проведение ремонтно-профилактических работ и электрических испытаний на сетевых источниках питания УНУ силами специализированных организаций.

Целесообразно заменить фидеры для подключения источников питания к обмоткам полоидального магнитного поля в целях снижения потерь электрического напряжения и мощности в существующих алюминиевых кабелях с большим электрическим сопротивлением.

Предполагается продолжить разработки импульсных ускорителей коаксиального и рельсотронного типов для получения потоков плазмы с большой кинетической энергией. Планируется апробация источников, а также экспериментальное моделирование заполнения токамака Глобус-М2 при увеличенной плотности плазменной струи ($\sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$).

Планируется увеличить количество встроенных в диверторные пластины ленгмюровских зондов, установив их, в том числе, и на верхний купол камеры. Это позволит контролировать потоки тепла на дивертор и измерять параметры пристеночной плазмы при всех возможных магнитных конфигурациях.

Планируется провести модернизацию диагностического комплекса радиационных потерь плазмы. Для этого предполагается установить дополнительные линейки фотодиодов SPD для наблюдения основного объема плазмы с дополнительных ракурсов и диверторной области плазмы.

Планируется модернизация диагностики томсоновского рассеяния, включающая изменение оптической схемы зондирования/сбора рассеянного излучения, увеличение числа

пространственных точек в экваториальной плоскости до 15. Повышение чувствительности диагностики достигается путем уменьшения временной выборки измерений с 250 нс до значений, согласованных с длительностью импульса зондирования с применением быстрых малошумящих усилителей и цифрового регистратора с частотой оцифровки 2 ГГц.

3.4. Разработка и освоение новых методик исследований или измерений

В целях выполнения Программы научных исследований и получения новых экспериментальных данных планируется дальнейшая разработка методик исследований и измерений:

- планируется оснащение токамака диагностикой томсоновского рассеяния на основе лазера Nd:YAG 1064 нм для диверторной области с измерением параметров плазмы вблизи сепаратрисы в 5 пространственных точках;
- планируется оснащение токамака диагностикой лазерно-индуцированной флуоресценции для измерения параметров ионного компонента плазмы на основе лазеров на красителе и параметрического генератора света;
- планируется разработка новой оптической системы сбора света диагностики активной спектроскопии перезарядки (CXRS) с увеличением числа хорд наблюдения до 8-ми;
- планируется разработка методики определения электронной температуры при зондировании плазмы лазерным излучением с двумя длинами волн 1054 и 1064 нм;
- планируется разработка методики спектральной калибровки полихроматоров томсоновского рассеяния с использованием широкоспектральных импульсных источников света наносекундного диапазона.
- планируется разработка методики восстановления двумерного распределения радиационных потерь плазмы;
- в связи с планами по установке второго инжектора предполагается разработать методику нагрева плазмы компактного токамака двумя мощными пучками атомов;

3.5. Метрологическое обеспечение функционирования УНУ

Для улучшения метрологического обеспечения УНУ Глобус-М предусмотрены мероприятия по измерению одного и того же параметра плазмы с помощью независимых методов, основанных на разных физических принципах. Например, МГД устойчивость плазмы регистрируется с помощью магнитных зондов и с помощью камер мягкого рентгеновского излучения, ионная температура измеряется с помощью анализаторов потока

атомов, испускаемых плазмой, и диагностики активной спектроскопии перезарядки (CXRS). Реконструкция магнитных конфигураций плазмы по данным внешних магнитных измерений осуществляется кодом EFIT и алгоритмом подвижных токовых колец. Запасенная в плазме тепловая энергия определяется из измерений диамагнетизма плазмы и по данным кинетических измерений температуры и плотности. Плотность плазмы измеряется СВЧ-интерферометром и диагностикой томсоновского рассеяния лазерного излучения.

Регистрация сигналов осуществляется с помощью цифровой техники. Также с помощью цифровой техники периодически осуществляется калибровка измерительных трактов, содержащих гальванические развязки и интеграторы.

Для обработки данных кинетических измерений применяются методы численного моделирования.

3.5. Расширение перечня оказываемых с использованием УНУ услуг

Расширение перечня научно-исследовательских услуг обусловлено, в первую очередь, комплексной модернизацией УНУ, в результате которой будет повышен диапазон исследуемых параметров, увеличится число научных тематик и измерительных методик.

Информационные услуги обеспечиваются доступом к базе данных УНУ, которая постоянно расширяется.

Расширение перечня образовательных услуг также связано с модернизацией УНУ, т.к. это способствует привлечению студентов ВУЗов для подготовки дипломных работ и аспирантов.

Раздел 4. Контроль за реализацией Программы

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.

4.1. Порядок контроля за ходом реализации Программы со стороны руководителя УНУ

На УНУ Глобус-М еженедельно, по вторникам, под председательством руководителя УНУ Глобус-М, проходят научно-технические совещания, на которых обсуждается ход работ

по модернизации и проблемы, связанные с обеспечением текущей эксплуатации установки УНУ Глобус-М. Совещание проводится регулярно с начала 2000-х годов. Состав участников и принятые решения протоколируются. Рассматривается ход регламентных и ремонтных работ, проведения экспериментов, в том числе и по заявкам пользователей, Также постоянно контролируется выполнение пунктов программы, связанных с закупкой материалов и оборудования, созданием новых диагностик, методик исследований, состоянием приборной базы. Обсуждаются вопросы модернизации источников энергопитания УНУ, контролируется вакуумное оборудование и состояние разрядной камеры токамака. Также на отдельных совещаниях докладываются и обсуждаются предложения по развитию измерительных методик и полученные научные результаты, подготавливаемые для публикации.

4.2. Порядок контроля за ходом реализации Программы со стороны базовой организации

Со стороны базовой организации – ФТИ им. А.Ф. Иоффе, контроль над выполнением программы осуществляют:

Заведующий лабораторией физики высокотемпературной плазмы, проф. Е.З. Гусаков, со стороны дирекции, первый зам. директора, 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. Все перечисленные ученые регулярно посещают УНУ сферический токамак Глобус-М, как лично, так и в составе различных делегаций, для которых устраиваются ознакомительные экскурсии. Кроме этого Е.З. Гусаков, С.В. Лебедев принимают участие в реализации научной программы УНУ Глобус-М. Периодически на директорских совещаниях обсуждается ход работ по проекту. Также 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.

Финансовый контроль над ходом работ по Программе осуществляется главным экономистом отделения Физики плазмы, атомной физики и астрофизики В.Н. Кухновец, заместителем директора по экономике к. э. наук О.В. Дудник и главным бухгалтером ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.А. Чижовой. Финансовый контроль заключается в проверке целевого использования средств и необходимости получать необходимые согласования при оплате услуг, покупке материалов и оборудования.

Раздел 5. Результаты реализации Программы, оценка ее эффективности

Основным ожидаемым результатом реализации Программы станет создание и запуск модернизированной установки Глобус-М, конструкция которой позволит существенно улучшить основные инженерные и физические параметры плазмы. Модернизированная УНУ оснащена новыми источниками сетевого питания. В разы возрастет мощность систем для дополнительного нагрева плазмы и генерации безындукционного тока. По оценкам ряд параметров плазмы на модернизированной установке должен приблизиться к параметрам термоядерного источника нейтронов.

Представляет большой интерес исследование удержания и устойчивости такой плазмы как в экспериментах по взаимодействию пучков быстрых частиц с плазменной мишенью, так и в опытах по генерации безындукционного тока плазмы. Ожидаемое увеличение температуры и плотности плазмы должно привести к существенному возрастанию тепловых нагрузок на диверторные пластины, что позволит исследовать физические процессы в этой области и радиационную стойкость защитных материалов в условиях, приближенных к условиям термоядерных установок.

Улучшение параметров плазмы и расширение числа технологических систем и измерительных методик приведет к увеличению тематик проводимых работ, что повысит интерес к УНУ со стороны пользователей.

В целом реализация Программы будет способствовать решению Приоритетной научной задачи «Исследования и разработка физических принципов и технических решений эффективной и безопасной гибридной ядерной энергетики».

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

Е.З. Гусаков

Руководитель УНУ Глобус-М,
Гл. научн. сотрудник,
доктор физ.-мат. наук

В.К. Гусев