



МВт с энергией частиц до 50 кэВ. Второй аналогичный источник также введен в эксплуатацию и использован для электропитания генератора электромагнитного излучения частотой 2,45 ГГц.

Для подготовки к экспериментам элементов конструкции вакуумной камеры и материалов для защиты обращенной к плазме поверхности введены в эксплуатацию ультразвуковая ванна и высоковакуумная печь. Печь позволяет проводить длительный отжиг загруженного содержимого при температуре до 1300<sup>0</sup>С в вакууме или в атмосфере инертных газов.

Получил дальнейшее развитие диагностический комплекс УНУ. Разработано большое количество измерительных методик и методик проведения эксперимента.

К настоящему времени были достигнуты следующие основные инженерные параметры:

- большой радиус плазмы,  $R = 0,34-0,36$  м;
- малый радиус плазмы,  $a = 0,22-0,24$  м;
- аспектное отношение тора,  $A = R/a \approx 1.5$
- объем плазмы  $0,55-0,65$  м<sup>3</sup>;
- площадь поперечного сечения плазмы,  $S_p = 0,25-0,3$  м<sup>2</sup>;
- вытянутость плазмы в вертикальном направлении,  $k \leq 2,1$ ;
- треугольность плазмы,  $\delta \leq 0,35$ ;
- ток плазмы,  $I_p \leq 0,43$  МА;
- тороидальное магнитное поле на оси плазмы  $B_T \leq 0,8$  Тл;
- суммарная мощность сетевых источников питания 125 МВА (питание от городской сети 110кВ);
- максимальная мощность инжекции пучка,  $P_b \leq 1,5$  МВт;
- вводимая мощность излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса  $\leq 0,2$  МВт;
- вводимая мощность излучения в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса  $\leq 0,2$  МВт.

Проведенные мероприятия по модернизации основных систем УНУ и развитию ее инфраструктуры позволили достигнуть существенно более высоких параметров плазмы – температуры, плотности, теплового давления, доли безындукционного тока и других. Дальнейшее улучшение параметров, приближенных к параметрам устройств масштаба термоядерного источника нейтронов, ожидается в процессе эксплуатации УНУ в период реализации 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».

Фотография токамака Глобус-М2 показана на рисунке 1. Вид сверху на установку показан на рисунке 2.

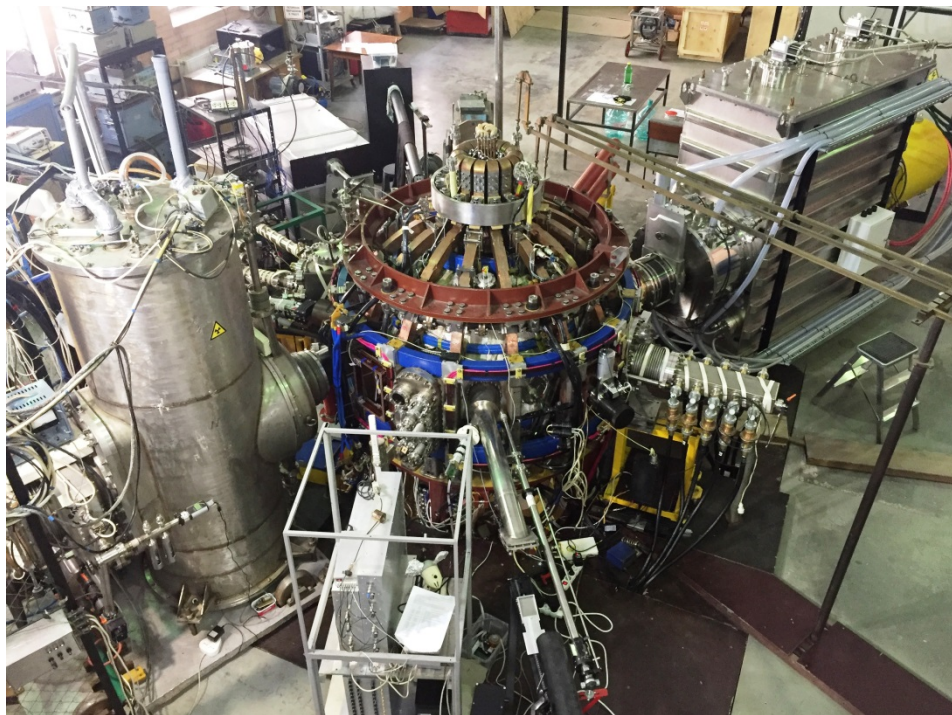


Рисунок 1 – Фотография УНУ Глобус-М2 в экспериментальном зале

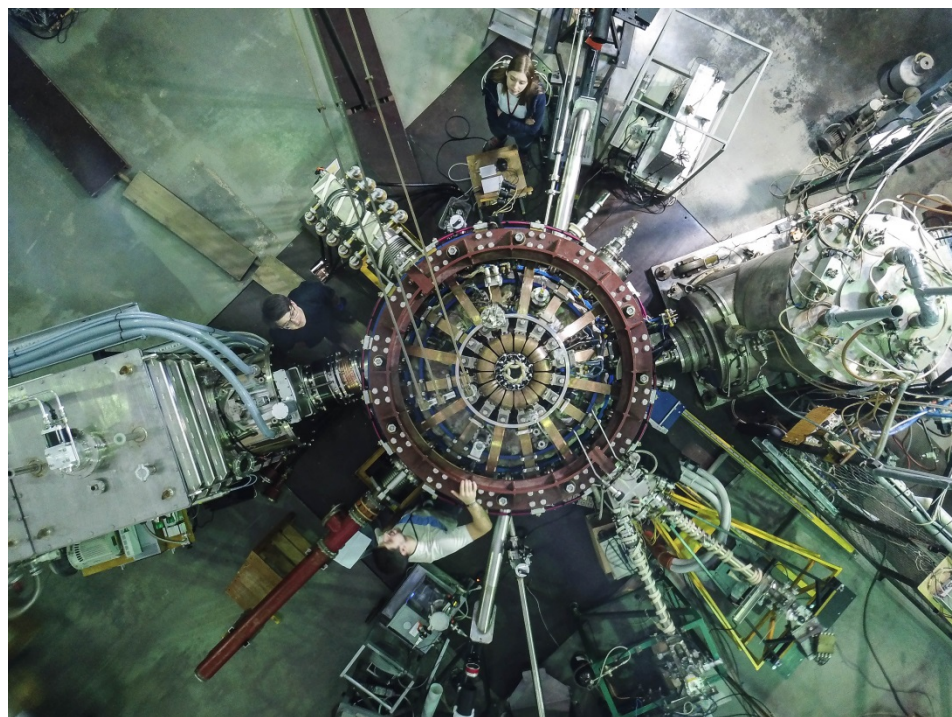


Рисунок 2 – Вид сверху на УНУ Глобус-М2

## **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, вакуумным оборудованием, замкнутыми системами водяного охлаждения, технологическими системами защиты обращенной к плазме поверхности, многочисленными диагностиками для измерения параметров основной и периферийной плазмы, цифровыми системами записи экспериментальных данных. Для обработки полученных результатов и прогностического моделирования используются разнообразные численные коды. Все это позволяет проводить комплексные исследования ряду по ключевых направлений, лежащих в основе создания термоядерных устройств, в числе которых в области физики плазмы:

- разработка и экспериментальная апробация методов нагрева и генерации тока в высокотемпературной плазме компактной термоядерной установки токамак;
- удержание и устойчивость плазмы сферического токамака при повышенных значениях магнитного поля и плазменного тока;
- 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;
- взаимодействие горячей плазмы с электромагнитным излучением в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса (единственный в мире эксперимент, проводимый на сферических токамаках);
- физика процессов в периферийной плазме, удерживаемой в диверторных магнитных конфигурациях со сложной формой поперечного сечения;
- турбулентные процессы в основной и периферийной плазме.
- физика режимов с улучшенным удержанием частиц и энергии;
- разработка интегрированных сценариев;
- разработка методов диагностики плазмы.

В области прикладных исследований:

- изучение взаимодействия плазмы с материалами обращенной к плазме поверхности;
- разработка методов автоматического управления параметрами плазмы;

- разработка электромагнитных систем сферических токамаков;
- разработка сильноточных источников питания для установок типа токамак;
- разработка методов подачи топлива в горячую зону плазменного шнура;
- разработка систем сбора и обработки информации для целей одновременного доступа большого числа удаленных пользователей
- разработка прототипов термоядерных источников нейтронов.

В период 2022-24 годов планируется проводить исследования в рамках следующих программ и грантов:

- Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Атомные столкновения и диагностика плазмы и конденсированных сред на их основе; удержание и нагрев высокотемпературной плазмы в токамаке», тема 0040-2019-0023
- Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Разработка и экспериментальная апробация методов нагрева и генерации тока в высокотемпературной плазме компактной термоядерной установки токамак», тема 0034-2021-0001
- Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Создание и испытание для действующих и перспективных отечественных установок высокоэффективных систем нагрева плазмы и генерации тока путем инжекции высокочастотных электромагнитных волн, включая геликоны», тема 0034-2021-0002
- Грант РФФИ 21-79-20201 «Управление плотностью плазмы в разряде сферического токамака при помощи дисперсионной интерферометрии»
- Грант РФФИ 21-79-20133 «Исследование инженерно-физических параметров компактного токамака с целью создания водородного прототипа термоядерного источника нейтронов»
- Грант РФФИ 21-72-20007 «Удержание ионов высокой энергии в сферическом токамаке нового поколения»
- Грант РФФИ 21-72- 21-79-20180 ««Разработка и создание специализированной высокотехнологичной компьютерной платформы реального времени и развитие на ней цифровых методов и систем диагностики, идентификации и магнитного управления высокотемпературной плазмой в сферическом токамаке Глобус-М2 с последующим применением в эксперименте»

- Соглашение в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме 0784-2020-0020 «Развитие численных и экспериментальных методов исследования плазмы сферического токамака и их применение на установке Глобус-М2» с Санкт-Петербургским Политехническим Университетом Петра Великого
- Соглашение в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме 0723-2020-0043 «Методы дистанционного контроля накопления и удаления изотопов водорода из стенок термоядерных установок» с Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ», г. Москва
- Работы в поддержку проекта ИТЭР по теме «Разработка диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения для диверторной области плазмы токамака»
- Соглашение о сотрудничестве и совместной деятельности с АО «НИИЭФА» от 18 января 2018 года
- Программа научных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке на 2021–2023 годы

В течение указанного периода работы УНУ предполагается подача заявок на конкурсы, проводимые Минобрнауки, РНФ, РФФИ и другими финансирующими организациями. Значительная часть работ по перечисленным программам и грантам проводится с участием организаций-пользователей УНУ. Экспериментальная база данных УНУ будет использована для развития методов численного моделирования плазменных процессов.

## 2.2 Современное состояние проблем

В настоящее время тенденции развития термоядерных исследований на установках с магнитным удержанием плазмы в разных странах отличаются друг от друга. В России за последние годы появился ряд публикаций, в которых предлагается сосредоточить основные усилия на разработке и сооружении гибридных систем синтез-деление [1,2]. Данная позиция сводится к следующему. Энергию нужно производить в реакторах деления. Обеспечить реактор деления дефицитным делящимся топливом должен реактор синтеза. Тритий вместе с энергией целесообразно и экономично производить в реакторах деления, освободив реакторы синтеза от этой обузы. Использование термоядерных нейтронов для конверсии сырьевых изотопов в делящиеся может быть реализовано в бланкете гибридных термоядерных реакторов, где в результате радиационного захвата нейтронов сырьевыми изотопами ( $^{232}\text{Th}$  или  $^{238}\text{U}$ ) происходит их превращение в делящиеся. В качестве перспективного рассматривается ториевый цикл, в котором в реакторе деления

избыточные при реакции деления нейтроны используются для получения трития из лития, а термоядерные нейтроны, полученные в дейтерий-трیتیевой реакции гибридного термоядерного реактора, используются для получения делящегося изотопа  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$ . Использование тория обосновывается его большим весом в энергетических ресурсах России [3], который составляет более 42% при энергетическом весе сырьевого изотопа  $^{238}\text{U}$  примерно 16%.

Требования к термоядерному устройству гибридной системы оказываются существенно ниже требований к термоядерному реактору для производства электроэнергии. Как отмечается в работе [2], разработка гибридного термоядерного реактора (ГТР), ориентированного на производство топлива для АЭС, может быть выполнена в довольно сжатые сроки. ГТР можно (и даже следует) вообще освободить от необходимости производства электроэнергии — это существенно упростит конструкцию реактора и заметно смягчит требования к его эксплуатационным параметрам.

Компактный сферический токамак рассматривается в качестве перспективной основы для создания термоядерного устройства в гибридной системе. В России разрабатывается установка ТИН-СТ, которая можно рассматривается как прототип стационарного компактного источника термоядерных нейтронов. [4]. Особенности конструкции и функционирования этой установки рассмотрены в работах [5-11]. ТИН-СТ имеет следующие основные параметры:

Большой и малый радиус плазмы $R$ и $a$ , м	0,5/0,3
Тороидальное поле на оси плазмы $B_{t0}$ , Тл	1,5
Вытянутость и треугольность плазмы $k/\delta$	2,75/0,5
Ток плазмы $I_p$ , МА	1,5
Запас устойчивости на границе шнура $q_{95}$	~7,5 ~8
Внутренняя индуктивность плазмы $l_{i3}$	0,4
Концентрация и температура плазмы $n_e, 10^{20} \text{ м}^{-3}/T_e(0)$ , кэВ	1/4,7
Мощность дополнительного нагрева $P_{aux}$ , МВт	6,5
Энергия частиц пучка $E_b$ , кэВ	130
Мощность, выделяемая в нейтронах $P_N$ , МВт	1,2
Нейтронная нагрузка на стенку, МВт/м <sup>2</sup>	0,2

Данная установка имеет небольшие размеры. При этом ожидаемая нейтронная нагрузка на стенку не превышает величины 0,2 МВт/м<sup>2</sup>, что в значительной степени снимает проблему радиационной стойкости материалов при их облучении термоядерными нейтронами.

Похожие устройства разрабатываются, и довольно давно, в ряде зарубежных научных центров - Оак-Риджской Национальной Лаборатории ORNL в США,

Принстонской Лаборатории Физики Плазмы PPPL, США и Калэмского Центра Энергии Синтеза CCFE, Великобритания. С данными этих разработок можно ознакомиться в обзоре [12]. Параметры установок FNSF (Fusion Neutron Test Facility) приведены в таблице 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
$\kappa$	3,1	3,0	2,4
$\delta$	0,5	0,5	0,4
$\beta_T$ (%)	10,1	19,5	16,6
$f_{BS}$	0,45	0,8	0,4
$H$	$\leq 1,25$	1,2	1,3
$P_{Fusion}$ (МВт)	76	60	35
$W_L$ (МВт/м <sup>2</sup> )	1	1	1

Устройства 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;  $\kappa$  – вытянутость плазмы в вертикальном направлении;  $\delta$  – треугольность сечения плазмы;  $\beta_T$  – отношение давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля;  $H$  – фактор улучшенного удержания энергии плазмы;  $P_{Fusion}$  – термоядерная мощность;  $W_L$  – нейтронная нагрузка на обращенную к плазме поверхность.

Размеры приведенных в таблице 1 установок, магнитное поле и ток плазмы больше, чем в ТИН-СТ. Соответственно большей является ожидаемая выделяемая термоядерная мощность и нейтронные нагрузки на компоненты обращенной к плазме поверхности.

Уменьшение размеров и мощности, выделяемой в нейтронах, снижает стоимость сооружения самой установки и расходы на ее эксплуатацию. При этом, однако, может возникнуть ряд серьезных ограничений, анализ которых приведен в работе [13]. Согласно авторам работы, а также благодаря накопленному экспериментальному опыту, можно сделать ряд перечисленных ниже выводов.

Мощность вводимого пучка дейтронов, которая при заданных размерах определяет стационарную мощность генерации нейтронов, ограничивается сечением ввода пучка, а



также мощностью, приходящей на единицу поверхности первой стенки, ограниченной на уровне 0,3—0,4 МВт/м<sup>2</sup>.

Имеется проблема старта тока плазмы. Полностью безындукционный сценарий разряда с поддержанием тока плазмы внешними источниками, согласно сегодняшним представлениям, обходится очень дорогой ценой, если вообще осуществим. Разумная величина генерируемого индуктором тока должна быть  $>40\% I_p$ .

Вытянутость сечения плазмы ограничена. В рассматриваемых проектах нейтронных источников на основе токамака принимается, что в ходе сценария разряда при переходе к неиндуктивному режиму соленоид убирается (выдвигается). Расчёты показывают, что при отсутствии центрального соленоида заявленных значений вытянутости плазмы ( $\kappa = 2,75$ ) не получить. Большая вытянутость  $\kappa = 2,7$  была получена в экспериментах на сферическом токамаке NSTX [14] и токамаке TCV [15]. Условием достижения такой вытянутости является либо очень широкий профиль плотности тока плазмы, которому соответствует нормализованная внутренняя индуктивность  $l_i \leq 0,5$ , либо сложная система обмоток полоидального магнитного поля. Стационарное поддержание плоского профиля плотности тока плазмы проблематично, а установка большого числа дополнительных обмоток технически невозможна;

База данных для сферических токамаков недостаточна для вывода надежной параметрической зависимости, описывающей удержание плазмы, особенно в области значений тороидального магнитного поля установок масштаба ТИН. Эксперименты на токамаках MAST [16] и NSTX [17] показали, что зависимость времени удержания энергии от  $B_T$  и  $I_p$  существенно отличается от принятого для ИТЭРа скейлинга IPB98(y,2) [18]. Аналогичный вывод был сделан на сферическом токамаке Глобус-М2 [19], в том числе и в экспериментах при увеличенном до 0,8 Тл тороидальном магнитном поле [20].

В настоящее время в мире существует более двадцати установок, представленных на рисунке 3, которые можно отнести к классу сферических токамаков. Абсолютное большинство этих устройств работает при низком тороидальном магнитном поле, не превышающем 0,3 Тл, и с коротким разрядным импульсом. Также большинство установок не обладает мощными источниками питания и средствами для дополнительного нагрева плазмы. Технология изготовления и эксплуатации сферических токамаков, работающих с низким тороидальным магнитным полем, достаточно хорошо освоена. Самая новая установка EXL-50 [21] была сооружена в ENN Energy Research Institute, КНР, в рекордно короткие сроки. Решение о ее создании было принято в октябре 2018 года, работы начались в декабре, а первая плазма была получена августе 2019 года.

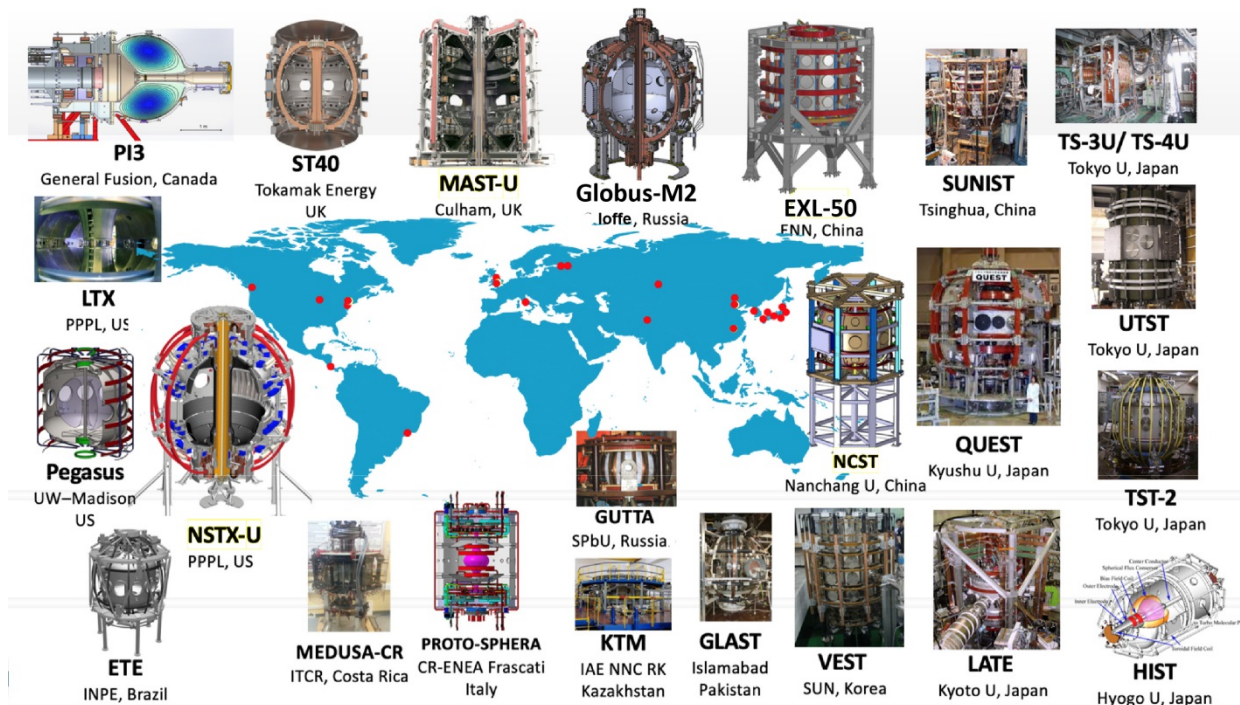


Рисунок 3 – Действующие сферические токамаки

Практика исследований, проводимых на сферических токамаках, показывает, что установки с низким магнитным полем вряд ли имеют серьезную перспективу использования в энергетических проектах. Для этого есть целый ряд причин, одной из которых является плохое удержание ионов высокой энергии, образующихся при инжекции в плазму атомных пучков и нагреве плазмы электромагнитным излучением в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса. Создание сферического токамака с магнитным полем масштаба 1 Тл представляет сложную инженерную задачу. Из всего семейства сферических токамаков на рисунке 3 следует выделить четыре проекта, в которых проводятся или планируются к проведению эксперименты с повышенным  $B_T$ . Сферические токамаки MAST (Великобритания), NSTX (США) и Глобус-М начали работу в начале 2000-х годов. В дальнейшем на всех трех токамаках была одновременно начата модернизация электромагнитной системы с целью увеличения тороидального магнитного поля в 2-2,5 раза до  $B_T \sim 1$  Тл с пропорциональным увеличением тока плазмы. Задача такой модернизации оказалась весьма сложной и потребовала решения целого ряда технических проблем.

Модернизированный токамак Глобус-М2 был запущен весной 2018 года. К началу реализации настоящей Программы достигнуто тороидальное магнитное поле 0,8 Тл и ток плазмы 0,43 МА. Основные эксперименты проводились с инжекцией в плазму атомного пучка суммарной мощностью до 1 МВт с энергией частиц до 30 кэВ, а также при вводе резонансного электромагнитного излучения частотой 2,45 ГГц. Планируемое увеличение магнитного поля до величины 1 Тл связано, главным образом, с доработкой новых сетевых

источников питания, работающих по схеме 3-х фазного выпрямления на тиристорах типа Т-3200 и рассчитанных на ток в нагрузке до 120 кА.

На установке NSTX-U в начале 2022 года модернизация не закончена. На сферическом токамаке MAST-U [22] планируется проводить эксперименты в тороидальном магнитном поле до 0,6 Тл и токе плазмы до 1 МА [23]. Максимальное магнитное поле в дальнейшем не превысит 0,75 Тл на радиусе  $R = 0,85$  м при токе плазмы 2 МА. Напомним, что до модернизации в установке MAST были достигнуты значения  $B_T = 0,55$  Тл и  $I_p = 1,3$  МА. Несмотря на возникшие сложности с модернизацией, власти Соединенного Королевства намерены развивать исследования на сферических токамаках. В октябре 2019 года на сайте [www.gov.uk](http://www.gov.uk) появилось сообщение о выделении 220 миллионов фунтов стерлингов на проектирование термоядерной электростанции для выработки электроэнергии, работающей на основе сферического токамака [24]. Проектные работы планируется завершить в 2024 году, а сооружение в 2040 году.

Из-за серьезных технических проблем запуск NSTX-U ожидается не ранее конца 2022 года [25]. Экспериментальная программа до 2029 года предполагает поэтапное использование различных защитных материалов обращенной к плазме поверхности, включая углерод, материалы с высоким атомным номером и литий. Планируется увеличение тороидального магнитного поля с 0,5 до 1 Тл, тока плазмы с 1 до 2 МА и длительности импульса с 1 до 5 с. Большой радиус плазмы 0,8-1 м. Основным методом дополнительного нагрева будет инжекция атомных пучков мощностью до 15 МВт.

В презентации [25] приводятся рекомендации Комитета по стратегическому планированию, касающиеся программы термоядерных исследований США (“Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research” 2019):

1. США остаются партнером проекта ИТЭР
2. В США должна стартовать национальная программа, включающая научные исследования и разработку технологий, направленные на создание опытного компактного реактора для производства электроэнергии на основе реакции термоядерного синтеза.

Таким образом, в как в Великобритании, так и в США существуют намерения по созданию чисто термоядерного реактора для производства электроэнергии.

Особое место в исследованиях на сферических токамаках занимает установка ST40, сооруженная в частном предприятии Tokamak Energy Ltd (<https://www.tokamakenergy.co.uk>). Ее геометрические размеры  $R = 0,4-0,6$  м, аспектное отношение  $R/a = 1,6-1,8$  близки к размерам токамака Глобус-М. Одной из основных заявленных задач проекта ST40 является достижение тороидального магнитного поля величиной 3 Тл, тока плазмы 2 МА, длительности импульса 1-3 с [26]. Для подъема тока

плазмы применяется сценарий слияния двух плазменных витков с последующим сжатием плазмы вдоль большого радиуса тора (merging-compression), который ранее использовался в сферических токамаках START и MAST [27]. В установке ST40 в результате перезамыкания колец был достигнут ток плазмы в диапазоне 200-350 кА в импульсе длительностью около 10 мс при тороидальном магнитном поле до 1 Тл [28]. Применение такого метода в энергетической установке является проблематичным, т.к. часть обмоток полоидального магнитного поля должна быть размещена внутри вакуумной камеры.

При проектировании и эксплуатации электромагнитных системы токамака используется величина, называемая конструктивной плотностью тока в центральном стержне обмотки тороидального магнитного поля (ОТП)  $\langle j_{TF} \rangle$ . Под ней подразумевается отношение полного тока по обмотке к полной площади сечения, включающей изоляцию, каналы охлаждения и поддерживающие структуры. Как отмечается в работе [29], достигнутый уровень  $\langle j_{TF} \rangle$  в созданных ОТП крупных токамаков с длинным рабочим импульсом составляет 20 – 25 МА/м<sup>2</sup>. При сравнительно небольшой длительности разряда (секунды) возможно достижение значений  $\langle j_{TF} \rangle = 35 - 45$  МА/м<sup>2</sup> при допустимом перегреве обмотки. В случае короткого разрядного импульса (доли секунды) конструктивная плотность тока может быть гораздо выше. В модернизированной установке Глобус-М2 достигается рекордно высокая величина  $\langle j_{TF} \rangle = 140$  МА/м<sup>2</sup> при максимальном тороидальном магнитном поле 1 Тл.

Для сооружения ОТП с большой конструктивной плотностью тока и длинным рабочим импульсом рассматривается применение сверхпроводящих материалов. Обычные сверхпроводники на основе сплава Nb-Ti или Nb<sub>3</sub>Sn успешно используются в электромагнитных системах ряда действующих токамаков. В последнее время активно обсуждается использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), в том числе и для создания устройств типа термоядерных источников нейтронов. В рамках комплексной программы «Развитие техники, технологии и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года», направление «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий», разрабатывается проект установки ТРТ (Токамак с Реакторными Технологиями) [30], электромагнитная система которой полностью выполнена на основе ВТСП.

### 2.3. Актуальность и значимость планируемых исследований

На сегодняшний день большинство проектов термоядерных источников нейтронов, в том числе и на основе компактного сферического токамака, имеют весьма поверхностную проработку. Техническая реализация таких проектов в среднесрочной перспективе и их экономическая целесообразность подвергаются сомнению и обоснованной критике. Можно выделить следующие проблемы:

- термоядерные источники нейтронов для гибридных систем находятся на стадии экспериментальных исследований, и требования, предъявляемые к ним ядерной энергетикой, до настоящего времени практически не учитывались;
- необходимость создания гибридного реактора следует обосновать, т.к. проблемы ядерной энергетики деления могут быть решены в рамках развития системы АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах и замкнутого топливного цикла (правда при условии, что система быстрых реакторов будет развита);
- отработка интегрированного сценария работы токамака, при котором одновременно достигаются все требуемые инженерные и физические параметры, до сих пор не осуществлена;
- требуются испытания радиационной стойкости различных материалов обращенной к плазме поверхности при их облучении не только термоядерными нейтронами с энергией 14 МэВ, но и плазменными потоками большой удельной мощности.

В целом в экспериментах на сферических токамаках удалось продемонстрировать ранее предсказанные основные преимущества данной концепции, сформулированные в работе [31]. Однако накопленная база данных получена, в основном, на небольших установках, работающих с очень низким магнитным полем. Между тем, для сооружения термоядерного устройства необходимы знания об удержании энергии плазмы при сопоставимых величинах  $B_T$ . Выполненные к настоящему времени эксперименты показали, что параметрическая зависимость времени удержания энергии сильно отличается выведенного для проекта ИТЭР эмпирического закона  $IPB98(y,2)$ . Данный скейлинг, следовательно, не может быть использован при разработке ТИН на основе сферического токамака. Необходимы дополнительные данные об удержании быстрых ионов в конфигурации с малым аспектным отношением, возникающих при нагреве плазмы атомными пучками и резонансным электромагнитным излучением. Большое значение представляет реализация интегрированного сценария, в котором заложенные в проекты предельные параметры плазмы достигаются одновременно. При этом необходимо отработать методы нагрева плазмы и генерации безындукционного тока в компактном сферическом токамаке.



Глобус-М является первым сферическим токамаком, на котором завершена модернизация электромагнитной системы и начаты эксперименты с дополнительным нагревом плазмы при повышенных значениях тороидального магнитного поля и плазменного тока. Развитие этих экспериментов в поддержку создания термоядерных устройств следующего поколения определяет научную актуальность планируемых исследований.

Упомянутая выше высокая конструктивная плотность тока приводит к увеличению нагрузки на центральный стержень обмотки тороидального магнитного поля. Если  $B_c$  – магнитное поле на поверхности центрального столба, то произведение  $\langle j_{TF} \rangle \times B_c$  характеризует действующее на него давление. Достигнутая величина произведения  $\langle j_{TF} \rangle \times B_c$  в современных токамаках ограничена на уровне 150 – 180 МА×Тл/м<sup>2</sup>. Ее значение  $\langle j_{TF} \rangle \times B_c$  для токамака Глобус-М2 при поле  $B_T = 1$  Тл оказывается рекордно большим  $\sim 800$  МА×Тл/м<sup>2</sup>. Наиболее близкое давление  $\sim 400$  МА×Тл/м<sup>2</sup> ожидается только в проекте стационарного нейтронного источника FNSF [32]. Демонстрация надёжной работы установок при таких уровнях нагрузок представляет практический интерес. При уже достигнутой величине  $B_T = 0,8$  Тл токамаке Глобус-М2 давление  $\langle j_{TF} \rangle \times B_c$  примерно в полтора раза меньше расчетного максимального значения. Выполненные расчеты напряженно-деформированного состояния показали, что для выбранных материалов в узлах конструкции установки возникающие локальные напряжения в целом не превышают допустимых значений. Опасность, тем не менее, представляют, например, касательные напряжения в изоляции при циклических нагрузках и повышенной температуре. Исследование условий работы электромагнитной системы токамака Глобус-М при рекордно высоких нагрузках определяет инженерную актуальность планируемых исследований.

В рамках упомянутой выше действующей комплексной программы на УНУ Глобус-М проводятся работы по теме «Разработка и экспериментальная апробация методов нагрева и генерации тока в высокотемпературной плазме компактной термоядерной установки токамак». Результаты этих работ будут применены на установке ТРТ. В ближайшей перспективе накопленный на УНУ опыт научных и технических исследований будет использован в экспериментах на новом токамаке Т-15МД [33], сооруженном в НИЦ «Курчатовский институт».

## 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, включая конфигурацию ИТЭРа. Плазма вытянута в вертикальном

направлении, а ее границей является оторванная от стенки магнитная сепаратриса. Вытянутость плазмы достигает значений  $\kappa = 2,1$ , а треугольность сечения  $\delta = 0,35$ . Эти геометрические характеристики сечения плазмы были продемонстрированы и после модернизации ЭМС. Для реконструкции магнитного равновесия используются данные магнитных диагностик, для обработки которых применяется код EFIT [34], алгоритм подвижных токовых колец [35,36], код PET [37]. Для использования алгоритмов разработана новая математическая модель модернизированной ЭМС. 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 совместно с математическими кодами позволяют исследовать физику процессов в диверторной области.

Основным методом дополнительного нагрева плазмы является инжекция пучков атомов водорода или дейтерия большой энергии и мощности. В экспериментах на модернизированной установке Глобус-М2 будут использоваться два инжектора с мощностью пучка до 1 МВт каждый. Один из инжекторов имеет сетевой источник питания, обеспечивающий большую длительность рабочего импульса.

Вторым методом является нагрев плазмы электромагнитным излучением на частотах ионного циклотронного резонанса. Эксперименты планируется проводить как в режиме малой добавки водорода в плазму дейтерия, так и в трехкомпонентной плазме с добавкой  $^3\text{He}$ . Для проведения экспериментов имеются антенны двух типов. В 2024 году планируется совместное использование обоих методов нагрева плазмы.

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 и ВЧ нагрев направлены также на отработку методов поддержания безындукционного тока. Из-за нагрева плазмы 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 поддержания безындукционного тока является ввод в

плазму электромагнитного излучения в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса. Грилл, состоящий из десяти волноводов, используется для ввода излучения на частоте 2.45 ГГц. Имеется уникальная возможность поворота грилла на 90 градусов с шагом 15 градусов. Согласно расчетам, доля безындукционного тока, генерируемого как инжектируемым пучком, так и резонансным электромагнитным излучением, существенно возрастает при увеличении магнитного поля и тока плазмы.

## **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.

Последнее время происходит заметное омоложение научного коллектива УНУ. В исследованиях принимают участие аспиранты ФТИ (5-10 человек), а также аспиранты из организаций – пользователей УНУ и студенты старших курсов профильных ВУЗов.

Была завершена модернизация электромагнитной системы и физический пуск токамака Глобус-М2. Была продемонстрирована работоспособность новой ЭМС при тороидальном магнитном поле, повышенном до 0,8 Тл и токе плазмы до 0,43 МА. Апробирован нагрев плазмы нейтральным пучком и генерация безындукционного тока резонансным излучением частотой 2,45 ГГц.

При поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках заключенных соглашений была проведена реконструкция системы сетевого питания суммарной мощностью 125 МВА. Помимо ранее закупленных и введенных в эксплуатацию двух тиристорных преобразователей на ток +/-70 кА для центрального соленоида и ток 110 кА для обмотки тороидального магнитного поля система питания была укомплектована новыми комплексными распределительными устройствами (КРУ) с вакуумными выключателями, что повышает надежность работы всей системы и обеспечивает аварийную защиту источников. Ячейки КРУ были заменены как на основной площадке ФТИ, так и на 29-й трансформаторной подстанции СПб. Также на территории подстанции была выполнена реконструкция кабельной трассы напряжением 10 кВ.

Для подготовки вакуумного оборудования к эксперименту были закуплены и введены в эксплуатацию ультразвуковая ванна и вакуумная печь с автономной системой

водяного охлаждения. Размеры обоих устройств позволяют проводить промывку и прогрев вакуумных деталей и узлов с габаритными размерами до 500 мм.

Получил развитие диагностический комплекс.

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**

Основными ожидаемыми результатами будут данные о поведении плазмы сферического токамака и сведения о его функционировании в различных режимах эксплуатации при значениях тороидального магнитного поля, тока плазмы, вытянутости сечения в вертикальном направлении и других параметрах, близких к параметрам компактного термоядерного источника нейтронов. Ожидается вывод токамака на предельные проектные значения тороидального магнитного поля 1 Тл и тока плазмы 0,5 МА.

Получит дальнейшее развитие разработка и экспериментальная апробация методов нагрева и генерации тока в высокотемпературной плазме компактной установки токамак. При использовании двух инжекторов суммарная мощность нагрева плазмы превысит 2 МВт. При объеме плазмы  $0,6 \text{ м}^3$  ожидается рекордно высокий удельный вклад мощности на единицу объема более  $3 \text{ МВт/м}^3$ . В этих условиях будут получены данные об удержании ионов высокой энергии, включая данные о нейтронном выходе при инжекции пучка дейтерия в плазму дейтерия.

Будет апробирован нагрев плазмы излучением на частотах ионного циклотронного резонанса в компактном токамаке с повышенным тороидальным магнитным полем. Будут получены данные о нагреве плазмы и удержании ионов с большой поперечной энергией.

Будут апробированы сценарии с одновременной инжекцией в плазму атомных пучков и вводом электромагнитного излучения на резонансных частотах.

На основе результатов экспериментов с инжекцией пучков и ИЦР нагревом получат уточнение параметрические зависимости времени удержания энергии плазмы в сферическом токамаке.

При улучшенных инженерных и физических параметрах будут сделаны выводы об удержании в диверторной области. Вырастут тепловые нагрузки на диверторные пластины, что создаст условия для исследования свойств защитных материалов.

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

## 2.7. Научная новизна и значимость результатов исследований

На первую половину 2022 года Глобус-М является единственным в мире сферическим токамаком, на котором завершена модернизация электромагнитной системы и начаты эксперименты по дополнительному нагреву плазмы атомным пучком и генерации безындукционного тока излучением 2,45 ГГц в увеличенном до 0,8 Тл тороидальном магнитном поле и повышенном плазменном токе.

При увеличении мощности нейтральной инжекции до 2 МВт ожидается рекордная удельная мощность нагрева плазмы в расчете на единицу объема  $\sim 3 \text{ МВт/м}^3$ , а также рекордная средняя плотность теплового потока на обращенную к плазме поверхность  $\sim 0,5 \text{ МВт/м}^2$ . Данная величина превышает предельные значения 0,3—0,4 МВт/м<sup>2</sup>, которые приводятся в работе [13]. Опыт проведения плазменных экспериментов в таких условиях является уникальным. Для сравнения в сферическом токамаке NSTX-U при заявленной максимальной мощности инжекции 15 МВт и объеме плазмы примерно 10 м<sup>3</sup> удельная мощность нагрева составит  $\sim 1,5 \text{ МВт/м}^3$ .

Нагрев плазмы электромагнитным излучением в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса на других сферических токамаках не применяется. Расчеты показывают, что поглощение резонансного излучения существенно улучшается при увеличении магнитного поля. Ожидается также улучшение удержания ионов с большой поперечной энергией, образующихся при применении данного метода нагрева.

Будет накоплен опыт эксплуатации электромагнитной системы в условиях рекордно высоких механических нагрузок, действующих на центральную колонну ОТП. Данный опыт будет востребован при конструировании установок следующего поколения с использованием сверхпроводников и сильными магнитными полями.



### 3. Перечень выполняемых и планируемых к выполнению научно-исследовательских работ в 2022-2024 годах

Сферический токамак Глобус-М является сложной электрофизической установкой с мощными сетевыми источниками питания и системами дополнительного нагрева плазмы. Все планируемые на ней научно-исследовательские работы неразрывно связаны с модернизацией и подготовкой основных инженерных систем. Заметная часть используемого оборудования является уникальной. Приобретенные за последний период устройства требуют некоторой доработки.

В период действия настоящей Программы планируется достижение предельных проектных параметров модернизированной УНУ - тороидального магнитного поля 1 Тл и тока плазмы 0,5 МА. Магнитному полю 1 Тл на радиусе  $R = 0,36$  м соответствует ток в витке ОТП 112,5 кА. Для получения такого тока потребуются дополнительная настройка систем защит источника питания – сетевого тиристорного выпрямителя, рассчитанного на ток в нагрузке 120 кА. Настройка проводится поэтапно по мере увеличения тока в ОТП.

Для вывода УНУ на максимальные проектные параметры также потребуются:

- круглосуточная откачка камеры с проверкой вакуумных уплотнений путем обдува гелием при комнатной температуре и при температуре 200<sup>0</sup>С;
- длительный циклический прогрев камеры и чистка тлеющим разрядом в гелии до достижения остаточного давления не хуже  $1 \times 10^{-5}$  Па;
- боронизация обращенной к плазме поверхности тлеющим разрядом в смеси гелия и паров карборана;
- профилактика контактных соединений ОТП, включая замеры электрического сопротивления контактов и, при необходимости, демонтаж контактных узлов обмотки тороидального магнитного поля с зачисткой поверхностей контактов и наложением защитной смазки типа Циатим-203.

При получении плазменных разрядов с предельным током потребуются дополнительная наладка систем автоматического управления положением и током плазмы.

Для применения второго инжектора необходимо изготовить и установить в камере графитовую приемную ловушку пучка.

Для проведения экспериментов с повышенной мощностью нагрева плазмы будет выполнена полномасштабная чистка защитного графитового покрытия. Планируется полный демонтаж всех графитовых плиток (всего 614 плиток, покрывающих площадь примерно 5 м<sup>2</sup>) и стальных подложек с их последующей двусторонней механической очисткой, промывкой в ультразвуковой ванне и длительным прогревом в вакууме при температуре 900<sup>0</sup>С. До и после очистки будут выборочно исследованы структура и химический состав поверхности графита.

В период реализации Программы основные исследования будут проводиться с использованием всех источников вводимой в плазму мощности – двух инжекторов, системы генерации тока излучением частотой 2,45 ГГц, системы нагрева на частотах ионного циклотронного резонанса.

Научно-исследовательские работы будут выполняться в соответствии с утвержденными планами Госзадания, соглашений и грантов, перечень которых представлен в разделе 2.1. Значительная часть работ будет проведена в интересах и при участии организаций – пользователей УНУ.

#### 4. Контроль за реализацией Программы

На УНУ Глобус-М еженедельно под председательством руководителя УНУ или его заместителей проходят научно-технические совещания, на которых обсуждаются результаты и планы проведения текущих экспериментов и проблемы, связанные с обеспечением эксплуатации установки. Совещание проводится регулярно с начала 2000-х годов. К началу 2022 года проведено около 1100 совещаний, состав участников и принятые решения протоколируются.

Текущие результаты научной работы и предложения по постановке и проведению новых экспериментов и использованию новых методик измерений регулярно обсуждаются на внутренних семинарах с участием сотрудников ФТИ и организаций-пользователей 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, проф., доктор физ.-мат. наук Е.З. Гусаков, директор института доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН С.В. Иванов, зам. директора по научной работе, доктор физ.-мат. наук П.Н. Брунков, руководитель отделения Физики плазмы, атомной физики и астрофизики, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН А.М. Быков. Перечисленные ученые регулярно посещают УНУ сферический токамак Глобус-М, как лично, так и в составе различных делегаций. Руководитель УНУ д. ф.-м. наук В.К. Гусев или его заместители периодически выступают с докладами перед Ученым советом ФТИ с информацией о ходе выполнения работ. Дирекцией института утверждаются отчеты о выполнении научных работ и заявки на участие в конкурсах. Е.З. Гусаков принимает 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, его заместители и сотрудники УНУ выступают с докладами перед Ученым Советом ФТИ, который, таким образом,

информируется о ходе выполнения программы.

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 2022-2024 годы, следует рассматривать как составную часть комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» по направлению «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

Основным результатом реализации программы будет разработка методов неиндуктивного поддержания квазистационарного тока и нагрева плазмы в компактном токамаке - источнике нейтронов. Апробация результатов с оценкой их эффективности будет проведена на модернизированном токамаке Глобус-М2. В период реализации Программы по основным показателям - тороидальному магнитному полю, току плазмы и вводимой в плазму мощности УНУ будет выведена на проектные параметры.

В период реализации Программы будут выполнены все обязательства перед организациями-пользователями УНУ.

Результаты реализации Программы могут быть использованы в российских научных центрах, проводящих исследования по данному направлению. В их числе НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований ТРИНИТИ (Троицк, Московская обл.), Институт общей физики им. А.М. Прохорова (Москва), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, АО «НИИЭФА» (С. Петербург), Институт прикладной физики (Нижегород), Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), Московский государственный университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), Национальный ядерный центр РК (г. Курчатов, Республика Казахстан).

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 дипломные работы, кандидатские и докторские диссертации сотрудников УНУ и организаций - пользователей.

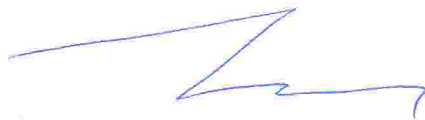


## Литература

1. Е.П. Велихов, М.В. Ковальчук, Э.А. Азизов, В.В. Игнатьев, С.А. Субботин, В.Ф. Цибульский, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с.5
2. Е.П. Велихов, М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, В.В. Игнатьев, В.Ф. Цибульский, Е.А. Андрианова, В.Ю. Бландинский ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4, с.5
3. E.P. Velikhov, Igor Kurchatov and the Russian Fusion Program, Proc. 25 IAEA FEC, St.-Petersburg, 13-18 Oct. 2014, O/3
4. B.V. Kuteev, E.A. Azizov, A.S. Bykov et al, Nucl. Fusion 51 (2011) 073013 (6pp)
5. Kuteev B.V., Borisov A.A., Golikov A.A. et al. In: DOE Workshop on Fusion-Fission Hybrid Reactors. Gaithersburg, Maryland, USA, September 30 — October 2, 2009.
6. Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. Физика плазмы, 2010, т. 36, с. 307—346.
7. Голиков А.А., Кутеев Б.В. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 2, с. 50—58.
8. Днестровский А.Ю., Голиков А.А., Кутеев Б.В., Хайрутдинов Р.Р., Грязневич М.П. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 4, с. 26—35.
9. Клищенко А.В., Кутеев Б.В., Шпанский Ю.С. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 4, с. 36—39.
10. Шпанский Ю.С., Кутеев Б.В., Лукаш В.Э., Петров В.С. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 4, с. 40—47.
11. Kuteev B.V., Bykov A.S., Dnestrovsky A.Yu. et al. In: IAEA Fusion Energy Conf. Daejeon, Republic of Korea, 11—16 Oct. 2010. Report FTP/P6-10.
12. Masayuki Ono and Robert Kaita. Phys. Plasmas 22, 040501 (2015)
13. Э.А. Азизов, А.Б. Минеев, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2, с.5
14. Gates D.A., Ahn J., Allain J. et al. Overview of results from the National Spherical Torus Experiment (NSTX). — Nucl. Fusion, 2009, vol. 49, p. 104016
15. Hofmann F., Sauter O., Behn R., Reimerdes H. Observation of beta-limits in highly elongated tokamak plasmas. — In: Proc. 25<sup>th</sup> EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. Praha, ECA, 1998, vol. 22C, p. 703; see also Reimerdes H., MHD Stability Limits in the TCV Tokamak, EPFL: Preprint LRP 7001/01, 2001
16. Valovic M. et. al. 2009 Nuclear Fusion **49** 075016
17. Kay S.M. et.al. 2006 Nuclear Fusion **46** 848-857
18. ITER Physics Basis 1999 Nuclear Fusion **39** 217
19. Kurskiev G.S., Bakharev N.N., Bulanin V.V., et al, “Thermal energy confinement at the Globus-M spherical tokamak”, Nucl. Fusion, 2019, v.59, 6, #066032

20. G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, et al., “Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T”, *Nucl. Fusion*, 2022, v.62, 1, #016011
21. Y.K. Martin Peng, B.S. Yuan, M.S. Liu and the EXL-50 Team, “EXL-50, An Introduction”, Proc. of 20<sup>th</sup> International Spherical Torus Workshop, Oct. 28-31 2019, Frascati, Italy
22. Brian Lloyd for the MAST-U team, “MAST Upgrade- features & status”. Proc. of 20<sup>th</sup> International Spherical Torus Workshop, Oct. 28-31 2019, Frascati, Italy
23. [https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/2019/12/MAST-U\\_RP\\_2019\\_v1.pdf](https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/2019/12/MAST-U_RP_2019_v1.pdf)
24. <https://www.gov.uk/government/news/uk-to-take-a-big-step-to-fusion-electricity>
25. S.M. Kaye, “NSTX-U: Recent Results and Plans”. Proc. of 20<sup>th</sup> International Spherical Torus Workshop, Oct. 28-31 2019, Frascati, Italy
26. M Gryaznevich and Tokamak Energy team, “Faster Fusion: ST40, engineering, commissioning, first results”, Proc. of 20<sup>th</sup> International Spherical Torus Workshop, Oct. 28-31 2019, Frascati, Italy
27. M.P. Gryaznevich and A. Sykes 2017 *Nucl. Fusion* **57** 072003
28. P.F. Buxton, O Asunta, A Dnestrovskij et al., “Overview of ST40 results and planned upgrades”, Proc. of 46th EPS Conference on Plasma Physics, Vol. 43C (2019), P2.1014
29. Э.А. Азизов, Г.Г. Гладуш, А.Б. Минеев, «УТС с магнитным удержанием и разработка гибридного реактора синтез - деление на основе токамака». Москва. 2016
30. А. В. Красильников, С. В. Коновалов, Э. Н. Бондарчук и др., *Физика плазмы*, 2021, Т. 47, № 11, стр. 970-985
31. Peng Y.K.M., Strickler D.J. // *Nucl. Fusion*. 1986. V. 26. P. 769
32. Y.K.M. Peng, J.M. Canik, S.J. Diem et al., Fusion Nuclear Science Facility (FNSF) before upgrade to Component Test Facility (CTF), *Fusion Science and Technology*, 2011, V. 60, P.441
33. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н. и др., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез Том: 42 Номер: 1 Год: 2019 Страницы: 15-38
34. Lao L.L., John H. St., Stambaugh R.D., et al. *Nucl. Fusion*. 1985. V. 25. P.1611 – 1622.
35. Vasiliev V.I., Kostsov Yu.A., Lobanov K.M., et al. // *Nucl. Fusion*, 2006. V. 46. S625-S628.
36. Н. В. Сахаров, А. В. Воронин, В. К. Гусев и др., *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2015, том 41, № 12, с. 115–119.
37. Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu. and Poshekhonov Yu.Yu. Comparison of tokamak axisymmetric mode growth rates from linear MHD and equilibrium evolution approaches — *Nuclear Fusion*, 1997, vol. 37, № 10, p. 1455

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



Е.З. Гусаков

Зам. руководителя УНУ Глобус-М,  
ст. научный сотр., кандидат физ.-мат. наук



Н.В. Сахаров

Зам. руководителя УНУ Глобус-М,  
вед. научный сотр., кандидат физ.-мат. наук



В.Б. Минаев