

Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

УДК 533.9

На правах рукописи

Минаев Владимир Борисович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ
НЕЙТРАЛЬНЫМ ПУЧКОМ
ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Гусев В.К.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Кисляков А.И.
ФТИ им. А.Ф.Иоффе


кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Мещеряков А.И.
ИОФ РАН

Ведущая организация: Институт ядерного синтеза
РНЦ "Курчатовский институт"

Защита состоится 25 декабря 2008 г. в 14 часов 30 минут на заседании
Диссертационного совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии
наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан 24 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук  Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Установки с магнитным удержанием плазмы типа токамак наиболее близко подошли к реализации идеи управляемого термоядерного синтеза (УТС). Одним из основных методов нагрева плазмы в токамаке для достижения температуры зажигания термоядерной реакции (~ 10 кэВ) является инжекция мощных пучков атомов изотопов водорода высокой энергии или нейтральная инжекция (НИ). Метод основан на передаче плазме энергии и импульса от пучка атомов, свободно проходящего сквозь удерживающее плазменный шнур магнитное поле. Начиная с 70-х годов прошлого века НИ многократно успешно применялась на токамаках во всем мире. Метод достаточно подробно исследован применительно к плазме с большим аспектным отношением $A = R/a$ (отношение большого радиуса плазмы к малому в тороидальной конфигурации), где гарантированно позволяет достигать высоких параметров разряда. К сожалению, в России такой опыт ограничен работами, проводившимися на установках Т-11 [1] в начале 80-х и Т-15 [2] в начале 90-х в ИЯС РНЦ "Курчатовский институт".

Во второй половине 80-х был предсказан ряд преимуществ тороидальной магнитной конфигурации плазмы с малым аспектным отношением ($A \leq 1.5$) и предложена идея создания сферического токамака (СТ). Первые экспериментальные подтверждения преимуществ конфигурации были продемонстрированы на установке START (Великобритания) [3]. В экспериментах были получены высокие значения относительного газокINETического давления плазмы $\beta_T = 2\mu_0 \langle p \rangle / B_T^2$ до 38%. При этом время удержания энергии в плазме сферического токамака незначительно отличалось от скейлинга ITER. К существенным недостаткам экспериментов следует отнести малую длительность разряда и относительно низкие параметры плазмы.

В токамаке Глобус-М [4], введенном в действие в конце 90-х годов, длительность разряда значительно превышает времена удержания частиц и энергии в плазме. Для получения горячей бесстолкновительной плазмы в качестве одного из методов дополнительного нагрева была выбрана нейтральная инжекция. Такое решение на завершающей стадии строительства токамака (НИ на токамаках в ФТИ им.А.Ф.Иоффе до этого не применялась) и потребовало дополнительной инженерной и научной проработки.

Цели работы

Основной целью данной работы было продемонстрировать в эксперименте возможность эффективного нагрева плазмы небольшого размера, тесно вписанной в камеру токамака с малым аспектным отношением, пучком атомов (водород, дейтерий) с мощностью, существенно превышающей мощность омического нагрева плазмы. В ходе работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать схему эксперимента по вводу в разряд сферического токамака Глобус-М мощного пучка атомов водорода или дейтерия высокой энергии для нагрева плазмы.
2. Подготовить комплекс инжекционного нагрева плазмы к экспериментам на токамаке Глобус-М. Произвести измерения и оптимизировать параметры инжектируемого пучка в составе установки Глобус-М. Обеспечить вывод инжектора на проектные параметры (мощность до 1.0 МВт, энергия частиц до 30 кэВ).
3. Провести экспериментальное исследование процессов, влияющих на нагрев ионов и электронов плазмы в токамаке Глобус-М, при различных параметрах мишени и инжектируемого пучка.
4. Получить режимы с максимальными параметрами плазмы (ионная температура, плотность и относительное давление) при инжекции нейтрального пучка большой мощности в сферический токамак Глобус-М.

Новизна работы

На сферическом токамаке Глобус-М, в условиях малого зазора между границей плазменного шнура и стенкой разрядной камеры, разработан и применен метод дополнительного нагрева плазмы, основанный на инжекции пучков атомов изотопов водорода с мощностью, существенно превышающей мощность омического нагрева. При этом в экспериментах достигнуты рекордные для сферических токамаков значения удельной мощности дополнительного нагрева, вводимой в плазму.

На токамаке Глобус-М в режиме с нейтральной инжекцией температура ионов превысила 0.7 кэВ при исходном значении ~ 0.2 кэВ в омической фазе разряда. Эффективный нагрев ионов позволил впервые в отечественной практике получить режимы, в которых ионная температура превысила электронную ($T_e \approx 0.5$ кэВ).

В режиме с нейтральной инжекцией, при величине тороидального поля на оси 0.4 Тл получены очень высокие значения средней электронной плотности $1.2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Относительное газокинетическое давление плазмы превысило 13%. Полученные значения являются рекордными для отечественных токамаков.

Достоверность научных результатов

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, сопоставлением данных измерений, выполненных различными диагностическими средствами, и результатов численного моделирования.

Практическая значимость работы

Главным практическим результатом работы стала демонстрация высокой эффективности нагрева плазмы при применении пучка атомов с высокой энергией и большой мощностью в сферическом токамаке Глобус-М. Это позволило использовать методику НИ для расширения области рабочих

параметров установки. Реализованные в эксперименте сценарии разрядов являются отправной точкой для дальнейшего улучшения параметров плазмы и могут быть использованы при разработке концепции термоядерного реактора на базе токамака с малым аспектным отношением.

В результате проведенного исследования отработаны методики нагрева ионов и электронов плазмы, проведены измерения временной и пространственной эволюции параметров плазмы, сделана оценка запасенной плазмой энергии и времени ее удержания. В ходе экспериментов получены режимы с высокими значениями отношения газокINETического давления к магнитному (параметр β) и плотностями, близкими к пределу Гринвальда.

Еще одним важным направлением, где могут быть использованы полученные результаты, является разработка объемного источника нейтронов (VNS) на основе сферического токамака. В предлагаемых в настоящее время проектах, также как и в токамаке Глобус-М, геометрические размеры пучка сопоставимы с размерами поперечного сечения плазмы. При этом в плазму относительно небольшого размера, тесно вписанную в разрядную камеру, с помощью нейтральной инжекции вводится большая мощность для обеспечения эффективного нейтронного выхода.

В целом, научная ценность работы состоит в том, что впервые в России для сферического токамака разработан и применен на практике метод дополнительного нагрева плазмы с помощью пучка атомов изотопов водорода большой мощности.

Личное участие автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Автором предложена и разработана схема эксперимента по НИ на сферическом токамаке Глобус-М, сформулированы основные требования к аппаратуре для дополнительного нагрева. При определяющем участии автора произведена разработка, изготовление и наладка систем и устройств комплекса нейтральной инжекции, выполнены работы по наладке и тренировке ионных источников, проведены измерения параметров "нагревных" пучков. Автором были сформулированы условия задачи для моделирования нагрева плазмы пучком атомов и проведен анализ полученных результатов. На основе результатов моделирования по коду АСТРА [5], выбран начальный диапазон параметров эксперимента.

При непосредственном участии автора были проведены эксперименты по исследованию торможения частиц пучка в плазме, оптимизации прицельного параметра инжекции, изучено влияние параметров пучка и плазменной мишени на эффективность нагрева ионного и электронного компонентов, получены режимы с предельными параметрами разряда.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка схемы эксперимента по инжекции пучков атомов в плазму сферического токамака Глобус-М. Выбор начального диапазона плазменных

параметров на основе анализа результатов предварительного моделирования с помощью транспортного кода АСТРА.

2. Экспериментальная проверка правильности выбора прицельного параметра инжекции и сравнение эффективности нагрева ионов плазмы пучками атомов водорода и дейтерия.
3. Определение оптимальной энергии нейтрального пучка и плотности плазмы-мишени для достижения максимальной температуры ионов при нейтральной инжекции.
4. Разработка методики получения режима с рекордной средней плотностью плазмы на токамаке в конфигурации с малым аспектным отношением в условиях превышения мощности инжекции над мощностью омического нагрева ($P_{\text{NBI}} > P_{\text{OH}}$) и тесно вписанной в камеру плазмы.
5. Разработка и применение методики получения на токамаке Глобус-М режимов с высокими значениями относительного газокINETического давления и запасенной плазмой энергией.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 1995 – 2008 г.г., представлены в 46 докладах на российских и международных конференциях и совещаниях и опубликованы в 19 статьях и научных отчетах. Результаты диссертации неоднократно представлялись автором на Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Конференции Европейского физического общества по физике плазмы, на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург), на Международных совещаниях по сферическим токамакам, на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе и Технологическим университетом г. Хельсинки (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 167 страниц печатного текста, в том числе: 50 рисунков, 2 таблицы и список литературы, состоящий из 132 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сделан краткий обзор экспериментальных результатов, полученных на традиционных токамаках с инжекцией, изложены основные особенности и преимущества концепции сферических токамаков, приведены первые результаты применения нейтральной инжекции на установках с малым аспектным отношением. Отмечается, что концепция сферического токамака рассматривается как перспективное направление для снижения стоимости и повышения КПД будущего термоядерного реактора. Обосновывается актуальность темы диссертационной работы.

В начале **первой главы** (параграф 1.1) приводится описание сферического токамака Глобус-М, анализируются особенности его конструкции и условия проведения плазменных экспериментов. В омическом режиме разряда токамак позволяет создавать и удерживать плазму с током I_p до 0.36 МА при относительно низком тороидальном магнитном поле B_T до 0.55 Тл. Большой радиус установки R равен 0.36 м, малый a – 0.24 м, что соответствует аспектному отношению 1.5. При этом вертикальная вытянутость шнура k может достигать 2.2, а треугольность δ – 0.4. Магнитная система токамака позволяет создавать магнитные конфигурации лимитерного и диверторного типов. Обращает на себя внимание очень малое расстояние (обычно 3-4 см) между внешней магнитной поверхностью плазменного шнура и стенкой разрядной камеры, что отличает токамак Глобус-М от других сферических токамаков. Приведено описание диагностического комплекса, используемого в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы. Он состоит из большого числа мониторинговых диагностик, работающих постоянно: датчики токов и напряжений в обмотках магнитной системы токамака, набор петель и зондов магнитной диагностики, СВЧ-интерферометр, детекторы оптического и рентгеновского излучения, болометры, зонды Ленгмюра и др. В зависимости от задач, стоящих перед экспериментом, могут подключаться сложные диагностические системы, такие как диагностика томсоновского рассеяния, диагностика потоков атомов перезарядки, рентгеновская камера-обскура, быстрая видеокамера оптического диапазона, массив датчиков МГД-колебаний. На основе данных магнитной диагностики, с помощью кода EFIT [6] производится реконструкция магнитной конфигурации и вычисляются такие параметры плазменного шнура, как запасенная энергия, бета и др.

В параграфе 1.2 изложены принципы работы инжектора атомов на основе источника с положительными ионами, приведено детальное описание отдельных устройств и систем, разработанных и подготовленных для проведения экспериментов в составе комплекса нейтральной инжекции на токамаке Глобус-М. Отмечается, что за основу были взяты отдельные узлы инжектора установки Т-11, произведена их реконструкция в соответствии с требованиями планируемого эксперимента. Приведены проектные параметры источников ионов, предполагаемых к использованию в составе комплекса.

В конце главы (параграф 1.3) представлены результаты экспериментального исследования параметров пучка с использованием ионных источников ИПМ-1 и ИПМ-2 [7]. Приводятся основные характеристики ионных и атомных пучков и описываются способы их определения в эксперименте. Для обоих источников в составе инжектора токамака Глобус-М измерена зависимость оптимального тока пучка от величины ускоряющего напряжения при работе, как на водороде, так и на дейтерии и определен диапазон рабочих энергий и выходная мощность пучка. Для источника ИПМ-2 максимальная мощность атомного пучка при работе на водороде составила 0.70 МВт, на дейтерии – 0.55 МВт, для источника ИПМ-1 – соответственно

1.0 МВт и 0.9 МВт. Диапазон изменения энергии частиц основного компонента пучка для источника ИПМ-2 составил 18-30 кэВ, для источника ИПМ-1 – 17-27 кэВ. Важно, что применение на инжекторе двух типов источников позволяет проводить плазменные эксперименты с приблизительно вдвое отличающимся уровнем мощности нейтрального пучка при одинаковой энергии частиц. Отдельный раздел посвящен определению энергетического спектра генерируемого инжектором пучка с помощью спектрометрической методики. Показано, что $2/3$ мощности содержится в основном компоненте с энергией E_0 , соответствующей ускоряющему напряжению.

Вторая глава посвящена разработке схемы эксперимента по инъекции пучков атомов в плазму сферического токамака Глобус-М. В начале параграфа 2.1 проводится анализ процессов взаимодействия частиц пучка с плазмой, определяются возможные источники потерь, делаются оценки времени, необходимого для торможения быстрых частиц в плазме. Утверждается, что для рабочего диапазона энергий частиц пучка, создаваемого инжектором, основным процессом, приводящим к ионизации "быстрых" атомов в плазме токамака Глобус-М является перезарядка. Неионизовавшаяся в плазме часть пучка определяет так называемые потери "напролет". Вторым важным источником потерь мощности пучка (особенно в условиях низкого тороидального поля и малого зазора между внешней магнитной поверхностью плазменного шнура и стенкой разрядной камеры) является попадание образовавшихся быстрых ионов на так называемые "неудерживаемые" орбиты. В этом случае частицы, не успев затормозиться, покидают плазменный шнур вследствие ухода на стенку разрядной камеры токамака. Еще одним источником потерь является перезарядка быстрых ионов на атомах, особенно, в периферийной области шнура. Уровень таких потерь определяется геометрией разрядной камеры, условиями в приграничной области шнура, а также, величиной плазменного тока, оказывающей влияние на траектории движения быстрых ионов. Все перечисленные механизмы относятся к прямым потерям мощности и не связаны с изменением удержания частиц и энергии в плазме. Оценка времени торможения быстрых ионов в плазме для типичных условий разряда в токамаке Глобус-М дала величину в 2-4 раза превышающую энергетическое время. Следует также отметить, что вначале "быстрые" ионы тормозятся преимущественно на электронах плазмы, а по мере замедления начинают передавать энергию ионам плазмы. Энергия E_c , при которой доли мощности, передаваемые ионам и электронам, сравниваются, называется критической.

Вторая часть параграфа посвящена анализу "прямых" потерь мощности пучка в токамаке Глобус-М. Для этого был использован компьютерный код, производящий расчет траекторий образующихся при прохождении пучка атомов через плазму ионов в магнитном. Показано, что при коинъекции максимальная энергия удерживаемых ионов в основном выше, чем при контринъекции. Кроме этого, при инъекции против тока удерживаются только

частицы, родившиеся на внутренней стороне плазменного шнура. Напротив, при коинжекции лучшее удержание наблюдается при рождении ионов на внешней стороне плазменного шнура. В последнем случае, сдвиг пучка наружу (увеличение прицельного параметра) должен приводить к некоторому снижению доли "прямых" потерь быстрых ионов. Также показано, что при одинаковой энергии переход с дейтериевого пучка на водородный должен приводить к заметному снижению потерь компонента пучка с полной энергией E_0 . В обоих случаях доля компонентов с энергией $E_0/2$ и $E_0/3$ в общей величине потерь мощности незначительна.

В заключительной части параграфа анализируются результаты априорного моделирования процесса поглощения мощности пучка на токамаке Глобус-М, произведенного с помощью численного кода АСТРА в РИЦ "Курчатовский институт". Для расчетов были заданы следующие параметры плазменного шнура: $R = 0.36$ м, $a = 0.24$ м, $B_T(0) = 0.45$ Тл, $I_p = 0.25$ МА, $k = 1.7$, $\delta = 0.3$. Пучок с гауссообразным профилем мощности был нацелен на середину малого радиуса с внутренней стороны шнура и инжектировался в направлении тока. Полная мощность пучка атомов $P_{\text{НВИ}}$ бралась равной 0.6 МВт и распределялась между компонентами E_0 , $E_0/2$ и $E_0/3$. В расчете определялась доля мощности пучка, переданная ионам и электронам плазмы, а также, величина потерь "напролет", с "неудерживаемых" орбит и вследствие перезарядки в зависимости от плотности плазменной мишени, сорта и энергии инжектируемых атомов. Также в расчетах варьировались величина плазменного тока, прицельный параметр и изотопный состав плазмы. Показано, что снижением энергии частиц дейтериевого пучка до 20 кэВ, можно добиться уменьшения доли потерь "напролет" меньше 10% начиная с плотностей плазмы-мишени $1.5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. С ростом плотности относительная величина прямых потерь уменьшается, и все большая доля мощности пучка поглощается плазмой. Начиная с плотностей $4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, более половины ее передается ионам и электронам. Переход от водородного пучка к дейтериевому, в основном, приводит к перераспределению мощности, передаваемой плазме, в пользу ионов вследствие возрастания критической энергии. Снижение плазменного тока ведет к возрастанию потерь частиц с "неудерживаемых" орбит, а изотопный состав плазмы почти не влияет на поглощение мощности пучка. Уменьшение прицельного параметра инжекции меньше 0.25 м должно приводить к росту потерь частиц с "неудерживаемых" орбит, напротив, увеличение почти не сказывается на величине потерь.

С учетом сделанных оценок и результатов моделирования, в параграфе 2.2 обосновывается выбор параметров разряда и анализируются возможные схемы ввода пучка в плазму для проведения экспериментов по НИ. С учетом возможностей токамака и аппаратуры инжектора были выбраны следующие реально достижимые параметры плазмы-мишени и инжектируемого пучка: ток плазмы 150-250 кА, тороидальное поле около 0.4 Тл, диапазон концентраций плазмы $1.5 - 7.0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, энергия частиц пучка от 18 до 30 кэВ, мощность

инжекции 0.3 – 0.8 МВт. Для ввода пучка в камеру был выбран патрубок круглого сечения диаметром 0.4 м, обеспечивавший необходимое проходное отверстие. При проектировании стыковочного устройства инжектора с токамаком был задан прицельный параметр 0.3 м. В выбранной геометрии эксперимента пучок проходит всю камеру токамака и достигает противоположной стенки в месте нахождения прямоугольного патрубка, в котором была размещена "ловушка" из графита, предотвращающая случайные повреждения камеры и снижающая поступление примесей в плазменный шнур.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований взаимодействия пучков атомов водорода и дейтерия различной энергии с плазмой, анализируется эффективность нагрева ионов и электронов от параметров пучка и плазменной мишени.

Параграф 3.1 посвящен изучению энергетических спектров потоков атомов перезарядки во время инъекции. Измерения проводились с помощью анализатора, линия наблюдения которого направлена вдоль большого радиуса токамака, т.е. перпендикулярно направлению инъекции. Тепловая часть спектров ($E < 3-5 kT_i$) имеет максвелловский характер, как в омическом режиме, так и в режиме с инъекцией. В диапазоне более высоких энергий потоки частиц регистрируются только в режиме с инъекцией пучка, и наблюдается значительный спад потока атомов для энергий выше критической. При таких энергиях торможение частиц пучка происходит преимущественно на электронах плазмы, и углы рассеяния ионов малы из-за малого изменения импульса при рассеянии на электронах. По мере снижения энергии, частицы пучка начинают взаимодействовать с ионами плазмы, передавая им свою энергию, отклоняются на более значительные углы и могут быть зарегистрированы анализатором. Отмечается, что в диапазоне энергий ниже критической спектр соответствует случаю классического кулоновского торможения быстрых ионов в предположении, что потери частиц несущественны. Производится сравнение времени распада потоков атомов перезарядки после выключения пучка с расчетным временем торможения "быстрых" ионов в плазме. Делается заключение о хорошем их соответствии и отсутствии аномально высоких потерь быстрых ионов.

В параграфе 3.2 описан эксперимент по проверке правильности выбора прицельного параметра инъекции, выполненный в течение одной экспериментальной сессии. С этой целью было произведено механическое перемещение инжектора в горизонтальной плоскости, обеспечившее изменение прицельного параметра с 30 до 33 см, без разгерметизации стыковочного узла (за счет деформации сильфонного компенсатора). При прочих одинаковых условиях эксперимента показано, что временной ход и абсолютные значения ионной температуры для обоих случаев практически одинаковы. Делается заключение, что геометрия эксперимента выбрана правильно, и прицельный параметр $R_s = 0.3$ м в последующем не менялся.

В параграфе 3.3 описывается сравнительный эксперимент эффективности нагрева ионов плазмы пучками атомов водорода и дейтерия. Для исключения трудностей с интерпретацией результатов из-за различий в параметрах плазменной мишени опыты были выполнены в течение одной экспериментальной сессии. Показано, что в диапазоне умеренных плотностей нагрев ионов плазмы пучком атомов дейтерия эффективнее, чем пучком атомов водорода, хотя и незначительно. При инжекции атомов дейтерия при прочих равных условиях наблюдается больший прирост температура ионов, однако скорость роста несколько ниже. Полученный результат качественно согласуется с результатами численного моделирования по коду АСТРА.

Анализ эффективности поглощения мощности пучка ионами плазмы при различных энергиях атомов (параграф 3.4) был сделан на основе результатов, полученных в лимитерных разрядах с умеренной плотностью $1-3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и током плазмы около 200 кА. В экспериментах использовался пучок атомов дейтерия с энергией от 20 до 29 кэВ. Оценка доли мощности, передаваемой ионам, производилась по производной роста ионной температуры в момент начала инжекции. Полагалось, что вся энергия, передаваемая ионам, идет на их нагрев, а характер ион-электронного обмена не меняется. Эффективность поглощения мощности пучка ионами в диапазоне энергий до 25 кэВ слабо зависит от энергии атомов и увеличивается с ростом плотности плазмы. Увеличение энергии частиц до 28-30 кэВ приводит к некоторому снижению эффективности нагрева, а возрастающая зависимость от плотности сохраняется. Такой результат, скорее всего, связан с ухудшением удержания ионов с большой энергией.

Наиболее сложную и трудоемкую задачу представляли эксперименты по изучению влияния плотности на нагрев плазмы (параграф 3.5). Эксперименты проводились в условиях с одинаковыми параметрами разряда, но различной плотностью плазмы-мишени перед включением импульса инжекции. Диапазон изменений средней плотности составил $(1-6) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Ток плазмы поддерживался на уровне около 0.2 МА. В плазму инжестировался дейтериевый пучок с оптимальной для нагрева ионов энергией 25 кэВ и мощностью около 0.5 МВт. В эксперименте рост ионной температуры (если он имел место) начинался с уровня 200-250 эВ, соответствующего значению параметра в омическом режиме, после включения импульса инжекции и прекращался по достижении нового стационарного уровня через 8-15 мс. Своих наибольших значений ионная температура достигала в разрядах с плотностью около $2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. С ростом концентрации электронов прирост ионной температуры снижался и совсем исчезал при плотностях выше $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При этом, согласно измерениям диагностики томсоновского рассеяния, электронная температура в указанном диапазоне плотностей во время инжекции менялась незначительно, проявляя тенденцию к снижению с ростом плотности мишени. Начиная с плотностей порядка $5-6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, во время инжекции наблюдалось увеличение запасенной в электронном компоненте энергии. Такое поведение

электронов объясняется тем, что поглощаемая ими мощность пучка относительно невелика и становится сравнимой с мощностью омического нагрева только при плотностях выше $6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, и только в этом случае наблюдается заметное увеличение энергии, запасенной в электронном компоненте. Отмеченное в эксперименте поведение плазмы удовлетворительно согласуется с результатами моделирования по коду АСТРА. Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах с энергией частиц пучка 25 кэВ и мощностью 0.5 МВт ионная температура не превышала значений электронной. По всей видимости, для более значительного роста температуры ионов и получения режима с так называемыми "перегретыми" ионами требуется увеличение мощности дополнительного нагрева. При этом инжекцию пучка лучше всего проводить при плотностях мишени $2-3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, где доля мощности, передаваемой ионному компоненту плазмы, велика и прирост ионной температуры наиболее значительный. Данное предположение было экспериментально подтверждено в последующих экспериментах.

Четвертая глава посвящена получению в токамаке Глобус-М режимов с максимальной температурой ионов, предельной плотностью и высокими значениями относительного газокINETического давления, приводится подробное описание методики подготовки токамака и сценариев разряда.

Как было отмечено выше, наибольший прирост ионной температуры при инжекции пучка атомов в плазму токамака Глобус-М следует ожидать в режимах с умеренной плотностью $2-3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Для достижения максимальной ионной температуры на инжектор был установлен источник ионов ИПМ-1, позволявший почти в два раза увеличить мощность атомного пучка при той же энергии частиц по сравнению с источником ИПМ-2. В эксперименте (параграф 4.1) был применен дейтериевый пучок атомов, при прочих равных условиях, увеличивающий долю мощности, передаваемой ионам при нейтральной инжекции, по сравнению с водородным. При энергии частиц пучка 25 кэВ в токамак в стационарной фазе дейтериевого разряда с током около 180 кА вводилась мощность около 0.8 МВт. Анализатором потоков атомов перезарядки была зафиксирована рекордная температура ионов 650 эВ (см. рис.1). Следует отметить, что применяемая для определения температуры методика, когда потоки атомов регистрируются вдоль всей линии наблюдения прибора, дает заниженное значение из-за ослабления потоков атомов, выходящих из центральной области шнура. Для расчета поправки при определении центральной

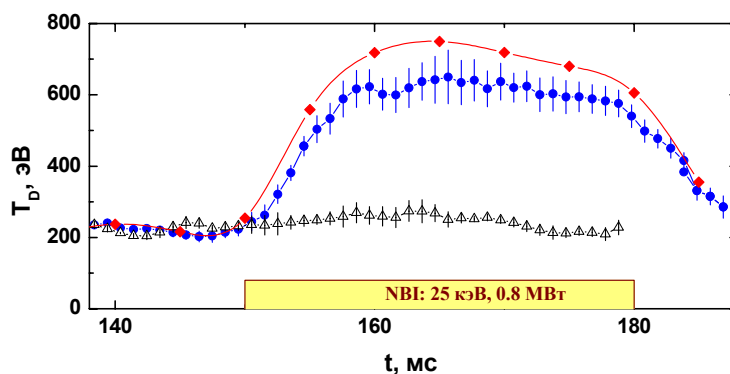


Рисунок 1. Температура ионов в разряде:

- – с инжекцией (#15315), Δ – базовом омическом.
- ◆ – реконструкция по коду DOUBLE.

ионной температуры было проведено моделирование с помощью кода DOUBLE [8], рассчитывающего распределение атомов вдоль сечения плазменного шнура, а также, интенсивности потоков атомов перезарядки, выходящих из плазмы. Процедура моделирования заключалась в подборе расчетного спектра, наиболее точно соответствующего экспериментальному. С учетом предположения о возможной форме профилей ионной температуры ее значение в центральной области шнура превышает 750 эВ. В любом случае, даже с учетом погрешностей измерений при подобранных параметрах эксперимента температура ионов существенно превысила температуру электронов, которая была около 500 эВ.

Получению режимов с предельной плотностью, описанных в параграфе 4.2, предшествовал ряд технологических усовершенствований подготовки вакуумной камеры (длительный прогрев при температуре 200°C, чистка тлеющим разрядом в гелии и боронизация) и улучшение точности управления положением плазменного шнура в условиях тесно вписанной в камеру плазмы (зазор между плазмой и стенкой не превышает 4 см), что позволило сократить поступление примесей в разряд. Точность поддержания равновесия по большому радиусу была не хуже ± 0.5 см. Применение специального сценария, чередующего разряды с низкой и высокой плотностью, существенно снизило рециклинг и уменьшило неконтролируемое поступление рабочего газа в плазменный шнур. В результате уже в омических разрядах была достигнута объёмно усреднённая плотность $0.9 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Применение дейтериевого пучка с энергией 29 кэВ и мощностью около 0.6 МВт было направлено на получение режима с еще более высокой плотностью. Инжекция начиналась на стадии формирования профиля тока (так называемая "ранняя инжекция") и сопровождалась непрерывным напуском рабочего газа. В условиях интенсивного газонапуска приток дополнительной мощности от пучка к электронам не приводил к росту их температуры, а шел на "переваривание" разрядом (ионизация и нагрев) дополнительного количества частиц и отодвигал границу возникновения радиационного коллапса. В результате на установке Глобус-М была достигнута предельно высокая для сферических токамаков средняя плотность плазмы $\sim 1.2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при величине магнитного поля всего 0.4 Тл и низком значении запаса устойчивости на границе ($q_{95} \sim 3.5$). При этом, по данным диагностики томсоновского рассеяния, локальные значения плотности в центральной области шнура превысили

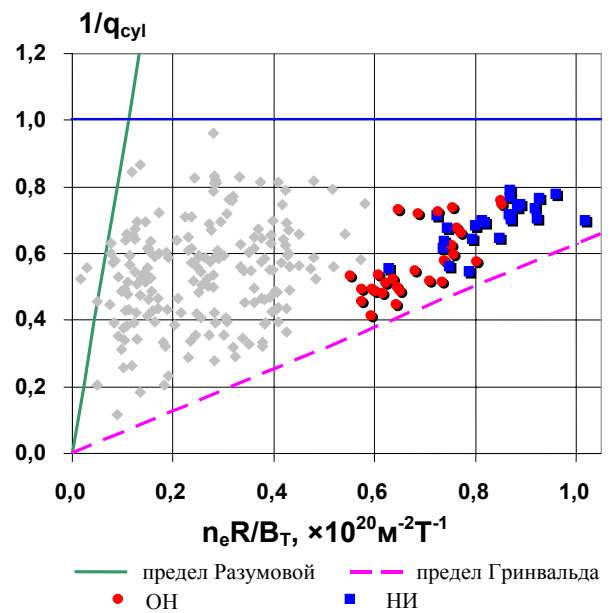


Рисунок 2. Диаграмма Хьюгилла для разрядов с предельной плотностью на токамаке Глобус-М.

$1.6 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Следует заметить, что полученные значения плотности вплотную приблизились к пределу Гринвальда, а параметр Мураками превысил 1. Результаты описанных экспериментов отмечены на диаграмме Хьюгилла, представленной на рис. 2.

Другим важным результатом применения пучка атомов высокой энергии стало достижение высоких значений бета и запасенной в плазменном шнуре энергии (параграф 4.3). Улучшению параметров плазмы в токамаке также способствовало увеличение площади защитного графитового покрытия разрядной камеры. Другим важным фактором явилось увеличение длительности импульса инжекции пучка до 40 мс. В разряде со стабилизацией тока по плазме на уровне 0.2 МА ($q_{95} \approx 4.5$) производился непрерывный напуск рабочего газа, который обеспечивал рост средней плотности до уровня $1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Инжекция дейтериевого пучка с энергией частиц 28 кэВ и мощностью около 0.6 МВт включалась на конечной стадии подъема тока плазмы и продолжалась почти до конца разряда. Как видно из рисунка 3, к концу импульса значение β_T достигает 13%, а β_N превышает 5.8. Запасенная плазмой энергия в конце разряда составляет 3.6 кДж или около 8 кДж/м³. Следует отметить, что все параметры получены в одном разряде одновременно и при достаточно большой для сферических токамаков величине тороидального поля около 0.4 Тл. Также существенно, что экспериментально достигнутые величины превышают значения, предсказанные в результате априорного численного моделирования по коду АСТРА, за счет тщательной оптимизации условий инжекции в токамаке Глобус-М.

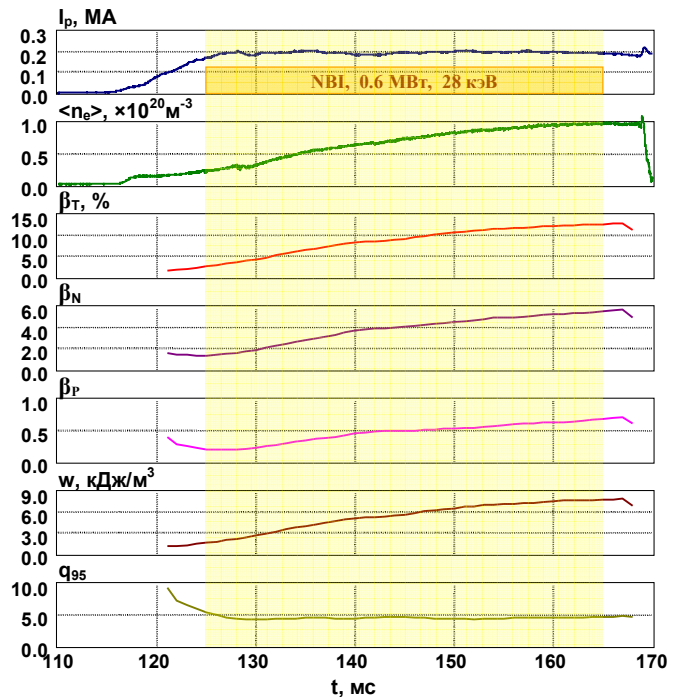


Рисунок 3. Временная эволюция параметров плазмы в режиме с рекордными значениями запасенной энергии и β_T, β_N в разряде #18674 с инжекцией дейтериевого пучка.

В заключении изложены **основные выводы и результаты работы**:

1. В ходе подготовки к экспериментам инжектор выведен на режим генерации пучков атомов водорода или дейтерия с энергией частиц до 30 кэВ и максимальной мощностью до 1 МВт. Достигнутая мощность инжекции в 1.5-2.5 раза превышает мощность омического нагрева в токамаке Глобус-М. Длительность импульса инжекции увеличена до 40 мс.

2. Анализ результатов расчетов траекторий быстрых ионов, образующихся в плазме при инжекции атомного пучка, и априорных транспортных расчетов с помощью кода АСТРА позволил выбрать начальный диапазон параметров плазмы-мишени и определить режимы работы инжектора, которые были в дальнейшем оптимизированы в эксперименте.
3. Экспериментальное исследование торможения частиц пучка в плазме подтвердило, что в диапазоне энергий ниже критической энергии E_c механизм замедления удовлетворительно описывается классической теорией кулоновского рассеяния, а потери быстрых ионов незначительны. Для изучения диапазона более высоких энергий необходимо исследовать потоки атомов перезарядки, покидающих плазму в направлении вдоль тороидального поля, что в рамках данной работы не проводилось.
4. Проведена экспериментальная оптимизация условий нагрева ионов на сферическом токамаке Глобус-М ($R=0.36$ м, $a=0.24$ м) пучком атомов высокой энергии. Определены плотность плазмы-мишени ($2-3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и энергия частиц пучка (25 кэВ). В результате, впервые на сферическом токамаке небольшого размера, в разряде с нейтральной инжекцией был получен режим с "перегретыми" ионами, в котором температура ионов превысила температуру электронов и достигла величины 750 эВ.
5. Разработан сценарий увеличения плотности плазмы в сферическом токамаке с применением мощного пучка атомов в качестве источника дополнительного нагрева, что позволило увеличить максимальные значения средней плотности плазмы на 20% по сравнению с омическим разрядом. В целом, плазма во время нейтральной инжекции проявляла низкую МГД активность, а наличие пучка приводило к увеличению длительности разряда по сравнению с аналогичным омическим. Полученное на токамаке в конфигурации с малым аспектным отношением значение средней плотности $1.2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ является рекордным. Достигнутые значения вплотную приближаются к пределу Гринвальда.
6. Впервые в России на установке Глобус-М достигнуты максимальные значения тороидального бета 13% и нормализованного бета 5.8. Следует отметить, что все перечисленные значения были получены одновременно в одном разряде. При этом величина нормализованного бета близка к рекордному значению, полученному на существенно большей по размеру установке NSTX со значительно большей (до 6 МВт) мощностью дополнительного нагрева.

Литература:

- [1] *Mukhovatov V.S.*, Beam-heating research at the I.V.Kurchatov Institute // Heating in toroidal plasmas / Proc. of 2nd Joint Grenoble-Varenna international symposium, 1980, 761-774.
- [2] *Tilinin G.N., Barsukov A.G., Vodo A.N., et al.*, Neutral beam heating system (NBHS). // Plasma Devices and Operations, 1992, vol. 1, No. 3-4, 277-288.

- [3] *Gryaznevich M., Akers R., Carolan P.G. et al.*, Achievement of record β in the START spherical tokamak // *Phys. Rev. Lett.*, 1998, Vol. 80, No. 18, 3972-3975.
- [4] *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др.*, Сферический токамак Глобус-М. // *ЖТФ*, 1999, т. 69, № 9, 58-62.
- [5] *Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.*, ASTRA Automated System for TRansport Analysis. / Preprint IPP 5/98, Garching: IPP, 2002.
- [6] *Lao L.L., John H.St., Stambaugh R.D., Pfeiffer W.*, Separation of β_p and I_i in tokamaks of non-circular cross-section. // *Nucl. Fusion*, 1985, Vol. 25, No. 10, 1421-1435.
- [7] *Панасенков А.А., Равичев С.А., Рогов А.В.*, Источник ионов водорода с периферийным магнитным полем. // *Вопросы атомной науки и техники, серия "Термоядерный синтез"*, 1984, т. 15, № 2, 56-63.
- [8] *Afanasyev V.I., Gondhalekar A., Kislyakov A.I.*, On the Possibility of Determining the Radial Profile of Hydrogen Isotope Composition of JET Plasmas, and of Deducing Radial Transport of the Isotope Ion // *JET-R-(00)04*, 2000.

Результаты диссертации представлены в следующих публикациях:

1. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., ..., Минаев В.Б. и др., Сферический токамак Глобус-М. // ЖТФ, 1999, т. 69, № 9, 58-62.
2. Dvorkin N.Ya., Kuzmin E.G., Leikin I.N., ..., Minaev V.B., et al., Fabrication and assembly of vacuum vessel of spherical tokamak Globus-M. // Plasma Devices and Operations, 2001, vol. 9, No. 1-2, 83-94.
3. Bulanin V.V., Chugunov I.N., Vildzunas M.I., ..., Minaev V.B., et al., The Globus-M diagnostics design. // Ibid., 129-142.
4. Gusev V.K., Burtseva T.A., Dech A.V., ..., Minaev V.B., et al., Plasma formation and first OH experiments in the Globus-M tokamak. // Nucl. Fusion, 2001, vol. 41, No. 7, 919-925.
5. Askinazi L.G., Barsukov A.G., Golant V.E., ..., Minaev V.B., et al., Preparation of neutral beam injection experiments on Globus-M and TUMAN-3M tokamaks. // Plasma Devices and Operations, 2003, Vol. 11, No. 3, 211–218.
6. Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Голант В.Е., ..., Минаев В.Б. и др., Подготовка эксперимента по нагреву плазмы в токамаке Туман-3 путем инъекции пучка нейтральных атомов // С.Петербург: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Препринт ФТИ-1763, 2003.
7. Kapralov V.G., Smirnov A.S., Kuteev B.V., ..., Minaev V.B., et al., Radiation losses studies with pyroelectric bolometer. // Fusion Science and Technology, 2005, vol. 47, No. 1, 218-220.
8. Барсуков А.Г., Гусев В.К., Есипов Л.А., ..., Минаев В.Б. и др., Система инъекционного нагрева плазмы сферического токамака Глобус-М. / М.: ИАЭ, 2005, Препринт ИАЭ - 6353/7.
9. Гусев В.К., Дьяченко В.В., Жилин Е.Г., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет о НИР по государственному контракту № 6.05.19.19.05.999 от 25.03.2005 г. с Росатомом (итоговый) "Получение и изучение режимов с предельными давлениями плазмы в токамаке Глобус-М при комбинированном дополнительном нагреве" / ВНИИЦ Рег. № 01200510453 Инв. № 0220.0 600939, 21 с.
10. Гусев В.К., Сахаров Н.В., Петров Ю.В., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет по НИР по гос. контракту с Федеральным агентством по науке и инновациям «Генерация плазмы в сферическом токамаке и развитие методов дополнительного нагрева в геометрии малого аспектного отношения на установке «Сферический токамак Глобус-М (ГЛОБУС-М)» / ВНИИЦ рег. № 01200508560, инв. № 0220.0 601060, (2005) 71 с.
11. Gusev V.K., Chernyshev F.V., Golant V.E., ..., Minaev V.B., et al., Density limits and control in the Globus-M spherical tokamak. // Nucl. Fusion, 2006, Vol. 46, No. 8, S584-S591.
12. Гусев В.К., Сахаров Н.В., Петров Ю.В., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет по НИР по гос. контракту с Федеральным агентством по науке и инновациям №02.452.11.7082 от 12.04.2006 г. «Научно-методическое и материально-

техническое обеспечение функционирования уникальных стендов и установок «Сферический токамак Глобус-М (ГЛОБУС-М) (регистрационный номер 01-99)» для проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ по приоритетным направлениям Программы (заключительный)» / ВНТИЦ рег. № 01200606990, инв. № 0220.0 801822, (2006) 70 с.

13. Гусев В.К., Аюшин Б.Б., Дьяченко В.В., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет о НИР по гос. контракту № 6.05.19.19.06.999 от 21.02.2006 г. с Росатомом (итоговый) «Получение и изучение режимов с предельными давлениями плазмы в токамаке Глобус-М при комбинированном дополнительном нагреве» / ВНТИЦ рег. № 01200605100, инв. № 02.2.007 00800, (2006) 28 с.
14. Ананьев А.С., Варфоломеев В.И., Деч А.В., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет о НИР по гос. контракту № 6.05.19.19.06.843 от 21.02.2006 г. с Росатомом (итоговый) «Разработка сценариев диверторной конфигурации плазмы в сферическом токамаке Глобус-М для получения режимов с увеличенным энергосодержанием» / ВНТИЦ рег. № 01200605448, инв. № 02.2.007 00686, (2006) 36 с.
15. Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В. и др., Отчет о НИР по гос. контракту № 1.05.19.19.06.531 от 21.02.2006 г. с Росатомом (итоговый) «Разработка способов защиты первой стенки в сферическом токамаке Глобус-М при мощном дополнительном нагреве» / ВНТИЦ рег. № 01200605449, инв. № 02.2.007 00687, (2006) 16 с.
16. Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Деч А.В., ..., Минаев В.Б. и др., Отчет о НИР по гос. контракту № 6.05.19.19.06.844 от 21.02.2006 г. с Росатомом (итоговый) «Исследование процессов трансформации энергии электромагнитных волн и пучков нейтральных атомов в сферическом токамаке Глобус-М» / ВНТИЦ рег. № 01200605450, инв. № 02.2.007 00688, (2006) 39 с.
17. Гусев В.К., Деч А.В., Есипов Л.А., ..., Минаев В.Б. и др., Комплекс нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М. // ЖТФ, 2007. т. 77, № 9, 28-43
18. Гусев В.К., Толстяков С.Ю., Варфоломеев В.И., ..., Минаев В.Б. и др., Исследование электронного компонента плазмы на сферическом токамаке Глобус-М в условиях предельных плотностей с помощью диагностики томсоновского рассеяния. // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2007, № 1, 39-56.
19. Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Гусев В.К., ..., Минаев В.Б. и др., Исследование нагрева плазмы в разрядах с нейтральной инжекцией на сферическом токамаке Глобус-М // Физика плазмы, 2008, т. 34, № 2, 99-113.