

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

На правах рукописи

Тельнова Анна Юрьевна

Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М

1.3.9. – Физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: **Минаев Владимир Борисович**
к.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории физики
высокотемпературной плазмы
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Кутеев Борис Васильевич**
д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Национальный
исследовательский Центр «Курчатовский институт»
(НИЦ КИ). Курчатовский Комплекс Термоядерной
Энергетики и Плазменных Технологий (ККТЭиПТ).

Крат Степан Андреевич
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Лаборатория
"физико-химические процессы в стенках термоядерных
установок" института лазерных и плазменных
технологий (Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»)

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Институт ядерной
физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук» (ИЯФ СО РАН)

Защита состоится 28 мая 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03.25 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, <https://www.ioffe.ru/ru/podgotovka-kadrov/zashity-dissertacij/future/>.

Автореферат разослан _____

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ФТИ 34.01.03.25, к.ф.-м.н.

Курские Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Строительство международного экспериментального термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [1], и последующее создание демонстрационной электростанции DEMO [2] рассматривается как магистральный путь развития термоядерной энергетики, практическое использование которой можно ожидать не ранее конца текущего столетия. Альтернативным путем внедрения технологии термоядерного синтеза в энергетике является создание гибридного реактора на базе термоядерного источника нейтронов (ТИН) [3]. Кроме этого рассматриваются другие области применения ТИН: наработка топлива для ядерных реакторов (из U^{238} или Th^{232}) [4], испытания материалов для будущих термоядерных реакторов [5], воспроизводство трития, дожигание отработанного ядерного топлива. Одним из кандидатов на роль ТИН является токамак. Для получения нейтронов в токамаке используется реакция синтеза между ионами плазмы-мишени и ионами высокой энергии, образующимися при инжекции в плазму пучка атомов (пучок+плазма) [6]. Перспективным вариантом реализации этой идеи является использование для создания плазмы-мишени сферического токамака. Сферические токамаки [7] – тороидальные магнитные ловушки с низким аспектным отношением $A \leq 2$ ($A = R/a$, где R – большой радиус, a – малый радиус). В силу своих небольших размеров, сферический токамак получается экономически более выгодным, по сравнению с классическим токамаком ($A > 3$). Кроме того, на сферическом токамаке в реакции синтеза по схеме пучок+плазма удастся получить более высокую плотность потока нейтронов в сравнении с классическими токамаками [8].

На пути к коммерческому использованию как гибридного, так и термоядерного реактора необходимо решить множество физических и инженерных задач. Одной из важнейших является обеспечение

максимального отношения мощности, выделяемой в процессе ядерного синтеза, к суммарной мощности, затрачиваемой на создание, удержание и нагрев плазмы. Если для классического реактора нужно, чтобы это отношение значительно превышало единицу, то для гибридного реактора на основе ТИН данное требование является необязательным, т.е. допускается снижение коэффициента усиления мощности, поскольку мощность потока нейтронов, испускаемого плазмой, в гибридном реакторе будет приумножена в ядерном blankets.

Важной характеристикой установки, определяющей необходимую величину подводимой мощности, является время удержания запасенной в плазме энергии. Чем оно больше, тем медленнее остывает плазма и тем меньше нужно мощности для ее нагрева. На основе обобщения экспериментальных данных с различных токамаков, в основном «классических», были построены законы подобия (скейлинги), описывающие время удержания энергии в зависимости от инженерных или физических параметров установки. Инженерные скейлинги – это эмпирические зависимости времени удержания энергии от измеряемых параметров плазменного разряда, полученные из статистического анализа данных с существующих установок. Физические скейлинги для времени удержания энергии, напротив, представляют собой произведение обобщенных безразмерных параметров плазмы. Общеупотребимыми в настоящее время являются скейлинги, используемые для проекта ITER, последняя редакция которых представлена в 2025 [9]. В тоже время, исследования на сферических токамаках MAST [10] и NSTX [11] показали существенное отличие зависимости времени удержания энергии в этих установках, в сравнении с классическими токамаками. Самым значительным отличием является гораздо более сильная зависимость времени удержания энергии от тороидального магнитного поля в инженерных скейлингах [12], [13], и более сильная зависимость от столкновительности в физических скейлингах [14],

[15]. Данные особенности могут быть обусловлены различиями в процессах переноса энергии и частиц в сферических и классических токамаках. Для более глубокого понимания этих различий необходимо дальнейшее исследование процессов переноса в плазме сферического токамака в зависимости от режимов его работы.

Плазменный шнур, помещенный в магнитное поле, подвержен развитию различных неустойчивостей, которых, вследствие большого числа коллективных степеней свободы, у плазмы очень много. Неустойчивости могут приводить как к потере, запасенной в плазме энергии, так и к полному разрушению шнура. Одними из самых опасных из них являются винтовые и баллонные неустойчивости, развивающиеся при превышении критического значения тока и/или давления плазмы. Немаловажным отличием сферических токамаков является более высокий порог развития баллонной и винтовой неустойчивостей и большее критическое значение давления плазмы. Развитие данных неустойчивостей обуславливается достижением предела Тройона (или предела по параметру β_N , являющемуся нормализованным давлением плазмы), который на сферических токамаках до трех раз выше [16], [17], чем на классических [18], что позволяет работать в режиме с большим током плазмы, максимальным значением β_N , максимальной долей бутстреп-тока, именно этот режим предлагается в качестве основного сценария работы источника нейтронов ДЕМО-ТИН [19].

Перечисленные особенности являются весомыми аргументами в пользу сферических токамаков при создании термоядерного реактора или источника нейтронов и обуславливают необходимость более глубокого и детального исследования процессов переноса тепла и частиц в плазме.

Цель работы

Основной целью данной работы было исследование процессов переноса тепла и частиц в компактном сферическом токамаке Глобус-М в

различных разрядах плазмы, в том числе с увеличенным до 0.5 Тл тороидальным магнитным полем.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Модернизация комплекса нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М с целью увеличения длительности импульса пучка атомов и стабилизации его параметров в плазменных экспериментах.
2. Исследование переноса тепла и частиц в омических разрядах до начала развития пилообразных колебаний.
3. Исследование переноса тепла и частиц в сферическом токамаке Глобус-М в режиме с включением нейтральной инжекции на фазе роста тока плазмы.
4. Исследование процессов переноса тепла ионами в сферическом токамаке Глобус-М в разрядах с нейтральной инжекцией.

Научная новизна работы

Впервые на компактном сферическом токамаке в омическом режиме нагрева плазмы обнаружено формирование внутреннего транспортно-барьера (ВТБ) – зоны со сниженным переносом тепла и частиц.

Впервые на компактном сферическом токамаке с рекордной удельной мощностью нагрева и высокой плотностью плазмы проведено исследование удержания тепла и частиц в режимах с тороидальным магнитным полем до 0.5 Тл и током плазмы до 250 кА.

Впервые на компактном сферическом токамаке при тороидальном магнитном поле 0.5 Тл в разрядах с нейтральной инжекцией на стадии роста тока обнаружено формирование в центре плазменного шнура области с коэффициентом диффузии частиц, близким к неоклассическому.

Впервые на компактном сферическом токамаке в разрядах с нейтральной инжекцией проведено исследование ионного теплопереноса на основании экспериментально измеренного профиля ионной температуры.

Было подтверждено, что в широком диапазоне параметров ионный теплоперенос близок к неоклассическому в области градиента температуры и аномальных потерь по ионному каналу не происходит даже в режиме с низкой нормализованной частотой столкновений (до значений 0.03).

Практическая значимость результатов работы:

Практическая значимость заключается в модернизации комплекса нейтральной инжекции, позволившей увеличить время импульса с 30 до 50 мс и проводить эксперименты в квазистационарном режиме. С использованием измеренных в эксперименте профилей температуры и плотности электронов было проведено моделирование, которое подтвердило снижение переноса частиц в центральной области плазмы до неоклассических значений в режиме без пилообразных колебаний. Исследования, проведенные на токамаке Глобус-М, подтверждают неоклассический характер переноса энергии ионами, что является аргументом в пользу использования сферических токамаков как в качестве источника нейтронов, так и самостоятельного термоядерного реактора. Полученный омический режим со сниженным переносом тепла электронами перспективен для создания плазмы-мишени в источнике нейтронов.

Также была создана расчетная модель плазмы сферического токамака Глобус-М, позволяющая априорно оценивать ожидаемые физические параметры плазмы по инженерным характеристикам разряда. Модель может быть применима к расчетам для токамака Глобус-М2, и адаптирована к проектируемому сферическому токамаку Глобус-3.

Личное участие автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии.

Лично автором была разработана, реализована и внедрена новая система напуска рабочего газа в газоразрядную камеру инжектора, обеспечившая стабильность параметров генерируемого атомарного пучка в увеличенном по

длительности до 50 мс импульсе инжекции. Также лично автором и при его непосредственном участии была проведена реновация ионно-оптической системы источника ионов ИПМ-2 и его вывод на рабочие параметры для осуществления инжекции на сферическом токамаке Глобус-М2. Лично автором была создана расчетная модель плазмы сферического токамака Глобус-М на основе кода ASTRA и блока NBI, в связке с кодом NUBEAM, позволившая получить основные результаты данной работы и априорно оценивать ожидаемые физические параметры плазмы по инженерным характеристикам разряда. Все эксперименты, описанные в работе, проводились при личном участии автора. Лично автором было проведено моделирование, показавшее, что в компактном сферическом токамаке при тороидальном магнитном поле 0.5 Тл в разрядах с инжекцией на стадии роста тока в центре плазменного шнура формируется область с коэффициентом диффузии частиц, близким к неоклассическому. Также лично автором на основе проведенного моделирования было показано, что в исследуемых режимах ионный теплоперенос близок к неоклассическому и аномальных потерь по ионному каналу не происходит даже в режиме с низкой нормализованной частотой столкновений (до 0.03).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение программируемой регулировки подачи рабочего газа в ионный источник инжектора атомов обеспечивает оптимизацию фокусировки атомного пучка и позволяет реализовать на токамаке Глобус-М стабильную работу инжектора в течение увеличенного в ~ 1.7 раза (50 мс) импульса инжекции, что значительно превышает ожидаемое время удержания энергии (до 7 мс).
2. Применение метода раннего включения нейтральной инжекции на токамаке Глобус-М (на стадии подъема тока плазмы) позволяет получить режим с длительной фазой без пилообразных колебаний при тороидальном магнитном поле 0.5 Тл и сформировать в плазме пикированный профиль

концентрации электронов. Моделирование режима демонстрирует существование профиля запаса устойчивости со значением $q > 1$ по всему сечению плазменного шнура, что позволяет сформировать область с пониженным переносом частиц в зоне $r/a < 0.6$ при значении времени удержания энергии, соответствующему скейлингу IPB98(y,2).

3. Снижение ионной столкновительности с 0.12 до 0.03 в сферическом токамаке Глобус-М в режимах с нейтральной инжекцией высокоэнергичного пучка атомов позволяет уменьшить величину ионной температуропроводности плазмы в области середины малого радиуса с $4 \text{ м}^2/\text{с}$ до $1.2 \text{ м}^2/\text{с}$, что соответствует неоклассической теории и позволяет исключить влияние турбулентного механизма на ионный теплоперенос.

Апробация работы

Достоверность результатов обеспечена хорошим соответствием экспериментальных данных, полученных при многократном повторении измерений, результатам моделирования, выполненного с помощью нескольких компьютерных кодов. Полученные данные находятся в согласии с результатами экспериментов на других сферических токамаках. Описываемые в работе результаты были доложены на четырех конференциях, опубликованы в реферируемых журналах, а также обсуждались на российских и международных конференциях, на семинарах и совещаниях лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Результаты работы представлялись в четырех докладах на конференциях:

1. А.Ю. Тельнова и др., Влияние увеличения тороидального магнитного поля на нагрев и удержание плазмы в разрядах токамака Глобус-М с нейтральной инжекцией // 44я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 13 - 17 февраля 2017 года.

2. А.Ю. Тельнова и др., Влияние величины магнитного поля на удержание энергии и частиц в сферическом токамаке Глобус-М // Международная молодежная конференция ФизикаА, СПб, 24-27 октября, 2017 г.
3. A.Yu. Telnova et al, Influence of the reversed safety factor profile on the transport in the Globus-M spherical // 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2-6 July 2018, Prague, Czech.
4. А.Ю. Тельнова и др., Особенности теплопереноса в ионном канале на сферическом токамаке // 45я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 2 - 6 апреля 2018 года.

и в шести статьях в реферируемых журналах:

1. **А.Ю. Тельнова** и др. Разработка системы напуска газа в ионный источник инжектора атомов токамака Глобус-М и оптимизация с ее помощью параметров атомного пучка // 2017, ЖТФ, 2017, том 87, вып. 7
2. **А.Ю. Тельнова** и др. Исследование влияния тока плазмы на ионный теплоперенос в сферическом токамаке Глобус-М // ПЖТФ, 2018, Т. 44, В. 15. Р 100
3. **A. Yu. Telnova** et al. Influence of the safety factor profile on the particle and heat transport in the Globus-M spherical tokamak // 2019, Plasma Sci. Technol., V. 21 P. 115101.
4. **А.Ю. Тельнова** и др. Перенос тепла и частиц в начальной фазе омических разрядов сферического токамака Глобус-М // 2019, ПЖТФ. Т. 45. В. 13. С. 17.
5. **A. Yu. Telnova** et al. Ion heat transport study in the Globus-M spherical tokamak // 2020, Plasma Phys. Control. Fusion V. 62 P. 045011.
6. **А.Ю. Тельнова** и др. Реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2 инжектора атомов сферического токамака Глобус-М2 // 2022, Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 4, С 540.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, 3 глав и Заключения, содержит 138 страниц, 11 таблиц и 45 рисунков. Список литературы включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность исследования.

В **первой главе** представлен обзор результатов исследований переноса тепла и частиц в высокотемпературной плазме сферических токамаков. В **параграфе 1.1** приведено уравнение баланса мощности в токамаке-реакторе, рассмотрены различные режимы работы токамаков: омический и с нейтральной инжекцией. Представлены скейлинги времени удержания энергии для L- и H- моды, полученные на основании обработки большого объема экспериментальных данных, позволившие приступить к созданию ITER. Подчеркивается отличия зависимости времени удержания энергии от тороидального магнитного поля на крупных сферических токамаках MAST [10] и NSTX [11] в инженерных скейлингах [12], [13] и более сильную зависимость от столкновительности в физических скейлингах [14], [15] по сравнению с классическими токамаками. В **параграфе 1.2** приведены основы неоклассической теории и описаны различные режимы неоклассического переноса в зависимости от столкновительности. Показано, что неоклассическая теория способна описывать перенос только ионного компонента плазмы в ограниченном диапазоне параметров. Отмечается, что в настоящее время для описания процессов переноса тепла и частиц в плазме токамака обычно используется одномерная модель, включающая систему дифференциальных уравнений баланса тепла и частиц в зависимости от эффективного радиуса магнитной поверхности.

Параграф 1.3 описывает результаты исследования ионного теплопереноса на сферических токамаках START [21], MAST [22], и NSTX [23], которые продемонстрировали низкий уровень переноса тепла ионами. Снижение коэффициентов переноса до уровня неоклассических значений объясняется подавлением турбулентностей в результате радиальной неоднородности скорости вращения в скрещенных радиальном электрическом E_r и тороидальном магнитном B_T полях. На токамаке Глобус-

М было проведено моделирование ионного теплопереноса [24]. Оценки показали, что коэффициенты ионной температуропроводности близки к неоклассическим.

Параграф 1.4 посвящен описанию режимов с обращенным профилем запаса устойчивости. На токамаках NSTX и MAST в экспериментах с обращенным профилем запаса устойчивости было продемонстрировано значительное улучшение удержания частиц по сравнению с аналогичными разрядами с монотонным или только слабо обращенным профилем запаса устойчивости [22], [23]. Исследования ВТБ с использованием диагностики MSE [25] и giroкинетического моделирования [26] показали, что все электростатические микронеустойчивости стабильны в области ВТБ (т.е. в области отрицательного магнитного шира).

В параграфе 2.1 содержится описание экспериментальной установки токамак Глобус-М [20] и её диагностического комплекса [27] (рисунок 1). Глобус-М – компактный сферический токамак, большой радиус которого составляет 0.36 м, малый – 0.24 м, соответственно, аспектное отношение – 1.5.

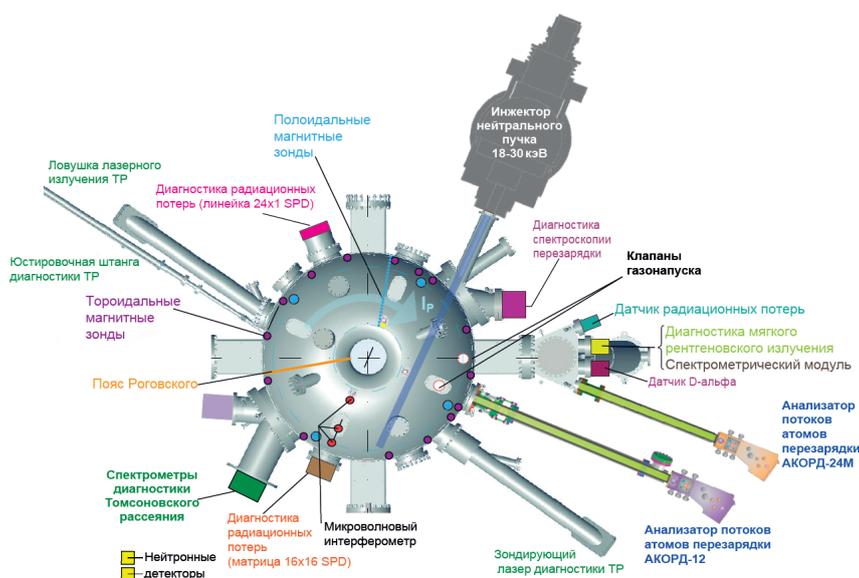


Рисунок 1. Схема эксперимента, токамак Глобус-М

В параграфе 2.2 приводится описание инжектора атомов [28], применяющегося для дополнительного нагрева плазмы. Инжектор атомов оснащен сменными ионными источниками ИПМ-1 и ИПМ-2, которые позволяют инжектировать в плазму пучок изотопов водорода энергией до 30 кэВ и мощностью до 1 МВт и 0.5 МВт соответственно.

Параграф 2.3 посвящен работе по модернизации нейтрального инжектора токамака Глобус-М. В подпараграфе 2.3.1 описываются разработка и внедрение новой системы напуска газа в ионный источник на основе пьезоэлектрического клапана [29], которая позволила поддерживать постоянным ток эмиссионного электрода, и, как следствие, постоянный профиль мощности пучка в течение всего увеличенного по длительности импульса инжекции. Это благоприятно сказалось на стабильности параметров пучка в течение всего увеличенного до 50 мс импульса инжекции и упростило последующую работу по интерпретации результатов экспериментов. Осциллограммы напряжения разряда, тока разряда, тока отрицательного электрода и тока эмиссионного электрода, а также выбранная форма управляющего сигнала приведены на рис. 2.

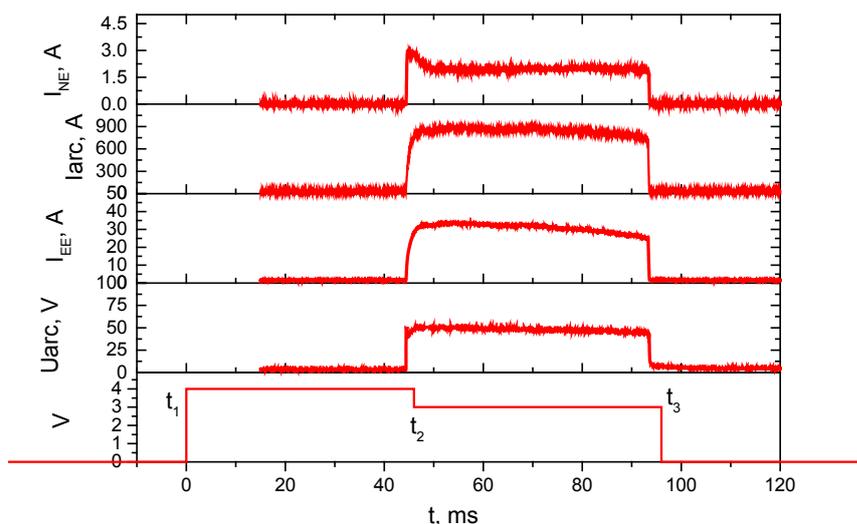


Рисунок 2. Осциллограммы тока отрицательного электрода, тока разряда, тока эмиссионного электрода, напряжения разряда, а также выбранная форма управляющего сигнала.

Из рисунка видно, что основные параметры пучка остаются стабильными во времени для всего 50-ти миллисекундного импульса инжекции.

Подпараграф 2.3.2 содержит описание проведенной реновации ионного источника ИПМ-2 [30]. Оценка фокусировки ионно-оптической системы (ИОС) первоначально показала, что фокусное расстояние не соответствует заявленному, вследствие чего была собрана и настроена новая ИОС. После установки ИПМ-2 на инжектор для выбранного значения напряжения эмиссионного электрода (ЭЭ) было подобрано оптимальное значение тока ЭЭ, при котором пучок имеет наилучшую фокусировку поперек щелей ИОС. Новые размеры пучка составили $5 \times 13 \text{ см}^2$ на уровне плотности мощности $1/e$, источник был выведен на свои максимальные параметры: мощность инжекции составила 500 кВт при энергии частиц 30 кэВ. В заключение отмечается, что проведенная реновация и высоковольтная подготовка ИПМ-2 обеспечили параметры пучка, необходимые для проведения экспериментов по нейтральной инжекции при максимальных проектных значениях энергии и мощности.

В **параграфе 2.4** приводятся методы исследования процессов переноса в плазме, применяемые в работе. В **подпараграфе 2.4.1** дано описание кода ASTRA 6 [31], который являлся одним из основных инструментов для обработки экспериментальных данных. В данном коде реализовано решение системы дифференциальных уравнений (1) баланса электронов, энергии электронов, энергии ионов и уравнения для полоидального магнитного потока в совокупности с решением уравнения Грэда-Шафранова (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{V'} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{B}_0}{2B_0} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) (V' n_e) + \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \rho} \Gamma_e = S_e, \\ \frac{3}{2} (V')^{-5/3} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{B}_0}{2B_0} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) [(V')^{5/3} n_e T_e] + \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(q_e + \frac{5}{2} T_e \Gamma_e \right) = P_e, \\ \frac{3}{2} (V')^{-5/3} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \frac{\dot{B}_0}{2B_0} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) [(V')^{5/3} n_i T_i] + \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(q_i + \frac{5}{2} T_i \Gamma_i \right) = P_i, \\ \sigma_{\parallel} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{\rho \dot{B}_0}{2B_0} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right) = \frac{J^2 R_0}{\mu_0 \rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{G_2}{J} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right) - \frac{V'}{2\pi \rho} (j_{BS} + j_{CD}). \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\Delta^* \psi = -4\pi^2 \left(\mu_0 r^2 \frac{\partial p}{\partial \psi} + I \frac{\partial I}{\partial \psi} \right), \quad (2)$$

Подпараграф 2.4.2 содержит описание разработанной транспортной модели на базе кода ASTRA, предназначенной для расчетов процессов переноса тепла и частиц в разрядах плазмы сферического токамака Глобус-М. Проводимость плазмы считалась неоклассической и рассчитывалась с помощью кода NCLASS [32]. Пакет NCLASS представляет собой код, который рассчитывает локальные транспортные характеристики плазмы на основе неоклассической модели в формализме Хиршмана и Сигмара. Для уравнения баланса энергии и частиц электронного компонента плазмы решалась прямая транспортная задача. Профили распределения нейтральных частиц $n_0(\rho)$ (источник атомов в уравнении непрерывности) рассчитывались с помощью кода DOUBLE [33] на основании измерений NPA. Коэффициенты диффузии D и температуропроводности χ_e подбирались таким образом, чтобы рассчитанные профили $T_e(\rho)$, $n_e(\rho)$ наилучшим образом совпадали с экспериментальными данными. Экспериментальные профили электронной температуры и плотности были получены с помощью диагностики томсоновского рассеяния. Для уравнения баланса энергии ионного компонента плазмы также решалась прямая транспортная задача. Коэффициент ионной температуропроводности χ_i выбирался неоклассическим χ_{ineo} и рассчитывался с помощью кода NCLASS. Рассчитанный на основании χ_{ineo} профиль температуры сравнивался с

экспериментальным. При расхождении рассчитанного профиля с экспериментальными измерениями к коэффициенту неоклассической температуропроводности прибавлялась аномальная поправка $\chi_i = \chi_{ineo} + \chi_{ia}$. Экспериментально ионная температура определялась с помощью анализатора потоков атомов перезарядки НРА.

Подпараграф 2.4.3 посвящен используемым методам моделирования поглощения нейтрального пучка плазмой. Доступными способами расчета поглощенной мощности пучка являются модуль NBI, интегрированный в код ASTRA, а также код NUBEAM. Оба эти метода широко применяются для моделирования на существующих токамаках. Оба эти кода используют дрейфовое приближение, которое плохо применимо к сферическим токамакам. В связи с этим для полного моделирования траекторий ионов пучка от точки ионизации до тепловых энергий или выхода на стенку использовался трехмерный код, описанный в [34]. В нем расчет функции распределения быстрых ионов включает несколько шагов. В первую очередь вычисляется профиль ионизации инжектируемых атомов для определения функции источника, которая в дальнейшем используется при решении уравнения Больцмана. Определяется доля быстрых частиц, потерявшихся «на пролет». Основной вклад в ионизацию атомов на токамаке Глобус-М вносят три процесса: перезарядка на ионах основной плазмы, ионизация из-за столкновения с ионами и электронами. Вычисление орбит проводится путем решения уравнения движения:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = q(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}), \quad (2.3)$$

Далее, замедление частиц рассчитывается с помощью кинетического уравнения Больцмана со столкновительным членом Ландау с учетом диффузии по скоростям и потерь на перезарядку (эффективный заряд плазмы предполагался постоянным по радиусу).

Глава 3 содержит результаты исследований процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М.

Параграф 3.1 посвящен оценке влияния тороидального магнитного поля и плотности плазмы на ее интегральные параметры. В заключительной экспериментальной кампании на Глобус-М [35] тороидальное магнитное поле было увеличено на 25% до 0.5 Тл, что расширило диапазон экспериментальных параметров. Оценки времени удержания энергии для 0.4 и 0.5 Тл приведены на рисунке 3.

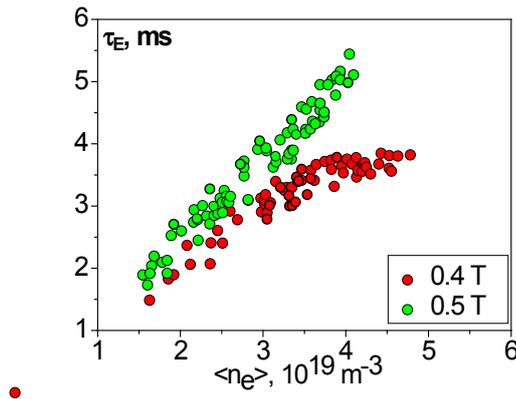


Рисунок 3. Зависимость времени удержания энергии при инъекции пучка атомов для различных экспериментальных условий: ток плазмы 200 кА и тороидальные магнитные поля (0.4 Тл и 0.5 Тл).

Для понимания процессов переноса при различных тороидальных магнитных полях был проведен детальный транспортный анализ для различных режимов и при различных условиях проведения эксперимента.

В **параграфе 3.2** приводятся результаты применения описанной в параграфе 2.4 модели для анализа процессов переноса тепла и частиц в сферическом токамаке Глобус-М в разрядах на стадии роста тока плазмы, в которых наблюдалось формирование внутренних транспортных барьеров (ВТБ).

В **подпараграфе 3.2.1** анализируются результаты применения транспортной модели для омических разрядов [36]. Было показано, что в зависимости от условий проведения эксперимента (изотопного состава плазмы) внутренний транспортный барьер образуется либо на плотности, либо на температуре. Так как в источнике нейтронов, работающем по

принципу пучок+плазма, нейтронный выход зависит от температуры электронов, то более перспективным будет сценарий с пикированной температурой плазмы-мишени.

В подпараграфе 3.2.2 приводятся результаты экспериментов и моделирования разряда с нейтральной инжекцией, включаемой на стадии роста тока [37]. Моделирование показало, что создание профиля запаса устойчивости, превышающего единицу по всему сечению шнура, позволяет сформировать область с пониженным переносом частиц в центральной области плазмы $r/a < 0.6$ (см. рисунок 5), что приводит к пикированию профиля концентрации электронов. Столь значительное снижение переноса в центральной области плазмы приводит к накоплению примесей, что видно по росту радиационных потерь на датчике SPD. Тем не менее, время удержания энергии в разряде соответствует времени удержания энергии, рассчитанному по скейлингу IPB98(y,2) (см. рисунок 4), в отличие от разрядов с инжекцией на квазистационарной стадии, где H-фактор не достигал единицы [38].

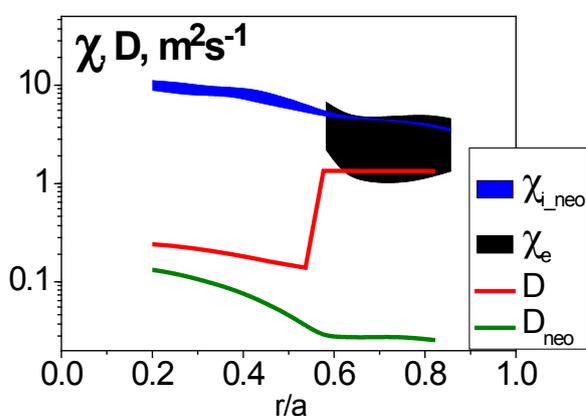


Рисунок 4. Коэффициенты ионной и электронной температуропроводности и диффузии

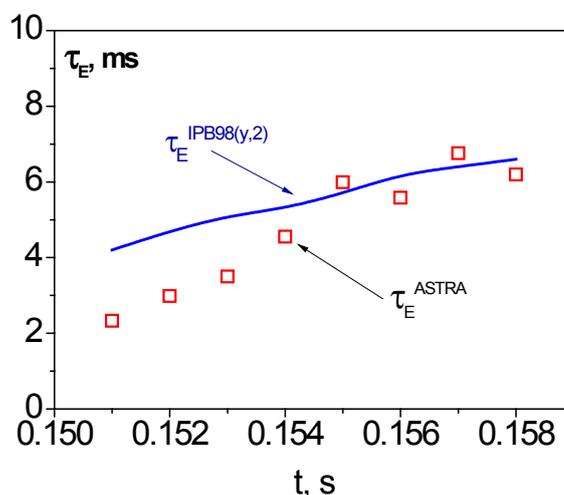


Рисунок 5. Время удержания энергии, рассчитанное с помощью кода ASTRA и по скейлингу IPB98(y,2)

В параграфе 3.3 приведены результаты исследования нагрева ионов в плазме сферического токамака Глобус-М. Подпараграф 3.3.1 посвящен

влиянию тока плазмы на ионный теплоперенос [39]. Моделирование с помощью кода ASTRA показало, что рассчитанные профили ионной температуры (сплошные линии рис. 6), хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными с помощью диагностик NPA и CXRS, что говорит о том, что перенос тепла в ионном канале можно описывать с помощью неоклассической теории. Соответствующие им коэффициенты температуропроводности представлены на рисунке 7.

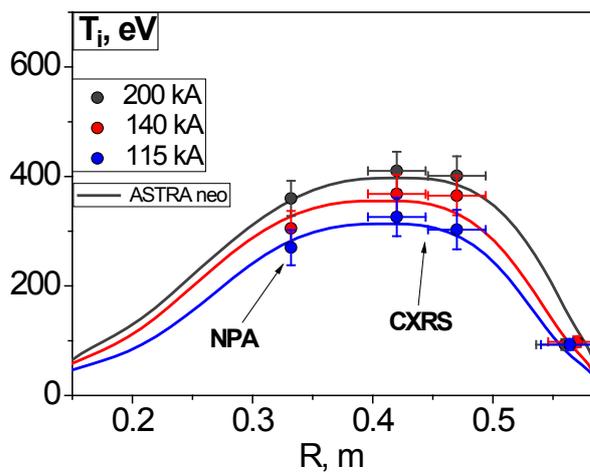


Рисунок 6. Пространственные распределения ионной температуры (точки соответствуют экспериментальным значениям, кривые получены методом численного моделирования) для режимов с током плазмы 115 кА, 140 кА и 200 кА.

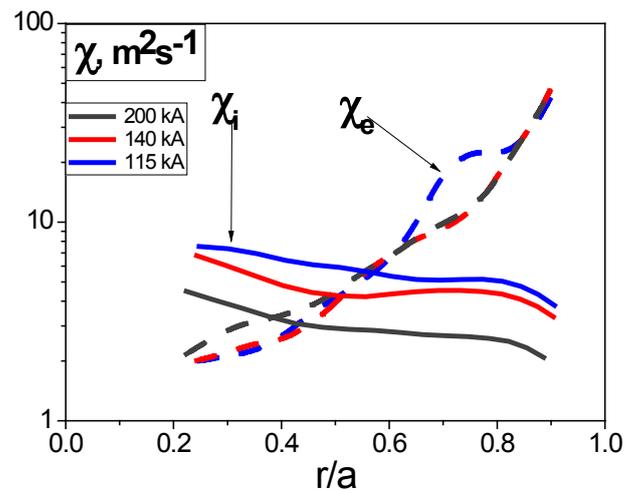


Рисунок 7. Коэффициенты температуропроводности для ионов, рассчитанные кодом NCLASS (сплошные линии); эффективные коэффициенты температуропроводности для электронов, полученные при решении обратной задачи (пунктирные линии)

Видно, что при повышении тока плазмы температуропроводность ионов снижается, а температуропроводность электронов (см. рисунок 7) существенно не меняется, но превышает ионную в области градиента ($0.6 < r/a < 0.9$). Эти результаты согласуются с результатами исследований, проведенных на токамаке NSTX [15]. Полученные в ходе моделирования данные об энергии, запасенной в электронном и ионном компонентах

плазмы, мощности омического нагрева и мощности поступающей от нейтрального пучка и поглощенной электронами и ионами плазмы, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры плазмы, полученные при моделировании разрядов токамака Глобус-М с различными значениями тока плазмы при плотности плазмы $\langle n_e \rangle_1 = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

I_p , кА	W_{th} , кДж		P_{OH} , МВт	P_{NBI} , МВт		τ_E , мс	τ_{E_IPB9} , мс
	W_e	W_i		P_{NBLe}	P_{NBli}		
115	0.581	0.345	0.24	0.022	0.023	2.7	3.8
140	0.726	0.365	0.30	0.034	0.038	2.9	4.2
200	1.07	0.622	0.42	0.068	0.060	3.1	4.5

Моделирование показало, что с ростом тока плазмы возрастает запасенная в ней энергия, причем на электронный компонент W_e приходится около 2/3 от тепловой энергии W_{th} . Это связано с тем, что возрастает суммарная мощность нагрева (см. табл. 1), которая поступает в электроны. Поглощаемая плазмой мощность нейтрального пучка заметно возрастает в связи со снижением потерь быстрых частиц при повышении тока плазмы.

В подпараграфе 3.3.2 приводятся результаты исследования влияния нормированной частоты столкновений на теплоперенос ионов [40]. Моделирование проводилось с помощью транспортной модели, описанной в предыдущей главе, в основе которой лежит код ASTRA. Решалась прямая задача. Коэффициенты температуропроводности выбирались из предположения о неоклассическом поведении ионов в плазме и рассчитывались с помощью блока NCLASS. На основании полученных коэффициентов температуропроводности рассчитывались профили ионной температуры. Полученные профили приведены на рисунке 8. Видно, что имеется удовлетворительное согласие между экспериментом и моделированием, что подтверждает вывод о неоклассическом поведении ионов на сферическом токамаке Глобус-М.

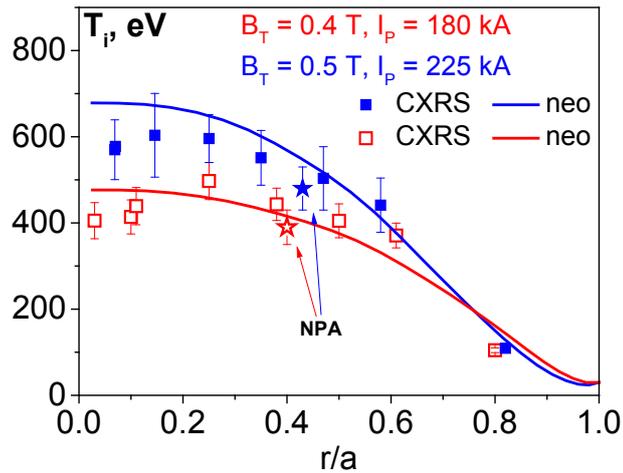


Рисунок 8. Профили ионной температуры: экспериментальные (квадраты и звездочки) и расчетные неоклассические (линии)

В процессе расчетов была определена зависимость ионной температуры от нормализованной электронной столкновительности ν_e^* . На рис. 9 представлена зависимость отношения $T_{i0}^{CXRS}/T_{i0}^{neo}$ от ν_e^* , где T_{i0}^{CXRS} – экспериментально измеренная ионная температура в центре плазмы, а T_{i0}^{neo} – центральная ионная температура, рассчитанная на основании неоклассических коэффициентов температуропроводности.

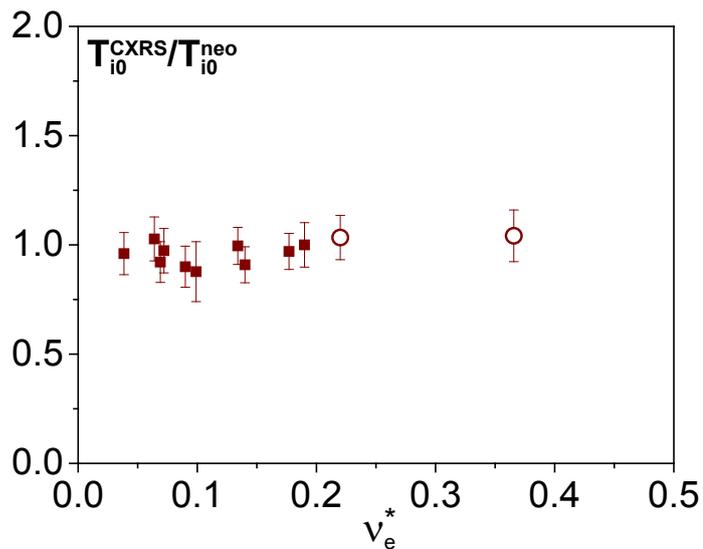


Рисунок 9. Зависимость отношения $T_{i0}^{CXRS}/T_{i0}^{neo}$ от столкновительности ν_e^* в области градиента температуры ($r/a = 0.5$). Открытые точки относятся к разрядам из предыдущего раздела.

Таким образом, измерения профиля температуры ионов с помощью диагностики CXRS показали увеличение нагрева ионов с ростом тороидального магнитного поля и тока плазмы. Этот результат также согласуется с данными NPA. Анализ баланса мощности проводился с использованием ASTRA, NUBEAM и алгоритма трехмерного отслеживания орбит быстрых ионов. Показано, что ионный теплоперенос адекватно описывается неоклассической теорией. Результаты Глобус-М согласуются с результатами экспериментальных исследований на MAST [12] и NSTX [13] в H-режиме, где ионный теплообмен является неоклассическим из-за подавления ионной турбулентности за счет радиального шира вращения, возникающего при нагреве плазмы пучком.

Подпараграф 3.3.3 посвящен исследованию зависимости ионной температуропроводности от приведенной частоты столкновений ионов ν_i^* (см. рисунок 10).

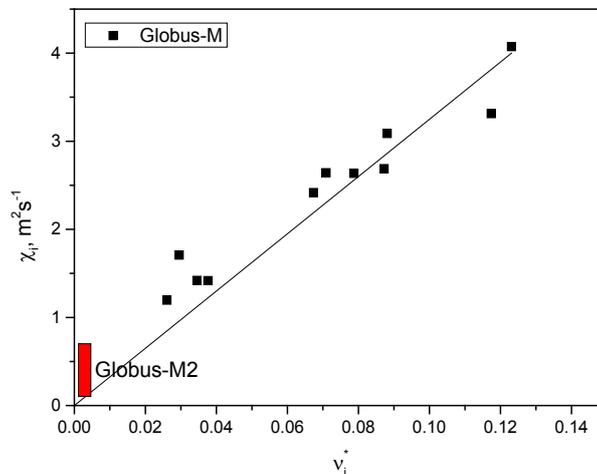


Рисунок 10. Зависимость ионной температуропроводности от приведенной частоты ионных столкновений. Линией обозначено теоретическое значение неоклассической температуропроводности.

Показано, что токамак Глобус-М работал в бесстолкновительном режиме, а двукратное увеличение магнитного поля и тока плазмы в сферическом токамаке Глобус-М2 позволит получить еще меньшие частоты

столкновений. При сохранении характера этой зависимости в токамаке Глобус-М2 возможно достичь предсказанное значение ионной температуры (до 5 кэВ) [41].

В **Заключении** приведены результаты и выводы, полученные в ходе работы:

1) Благодаря модернизации комплекса нейтральной инжекции стало возможно поддерживать постоянные параметры нейтрального пучка в течение всего удлиненного импульса инжекции, что обеспечило квазистационарные условия проведения эксперимента и облегчило интерпретацию его результатов.

2) Разработана транспортная модель на базе кода ASTRA для моделирования процессов переноса тепла и частиц в плазме сферического токамака Глобус-М. Для расчета поглощенной мощности пучка применялись два компьютерных кода: блок NBI, код NUBEAM. Для уточнения результатов расчетов поглощенной мощности проводились также оценки поглощенной мощности с помощью трехмерного кода, учитывающего ларморовские орбиты при моделировании траекторий движения быстрых частиц.

3) С помощью разработанной модели были исследованы разряды с омическим нагревом плазмы. Моделирование показало, что в данных экспериментах реализуются два различных сценария омического нагрева: с формированием ВТБ на профиле электронной температуры либо с формированием ВТБ на профиле электронной концентрации. Также, было обнаружено, что эффект пикирования плотности не зависит от средней концентрации плазмы. В разрядах с нейтральной инжекцией при отсутствии пилообразных колебаний экспериментально показана возможность реализации разрядов с ВТБ на профиле электронной температуры или концентрации. Проведенный транспортный анализ показал значительное снижение переноса тепла или частиц в центральной области плазмы,

проявляющееся в виде увеличения градиента на профиле электронной температуры или концентрации.

4) Исследования ВТБ в разрядах с нейтральной инжекцией на стадии роста тока показали, что создание немонотонного профиля q позволяет сформировать область с пониженным переносом частиц, что приводит к пикированию концентрации плазмы. Значительное снижение переноса в центральной области плазмы приводит к накоплению примесей. Тем не менее, время удержания энергии в разряде равно времени удержания энергии, рассчитанному по скейлингу IPB98(y,2).

5) Проведено экспериментальное исследование влияния тока плазмы и столкновительности на ионный теплоперенос. На основании полученных экспериментальных профилей было выполнено моделирование, которое показало, что поведение ионов в сферическом токамаке Глобус-М описывается неоклассической теорией в исследованных экспериментальных условиях.

Список литературы:

1. 2021 Annual report/ITER Organization. St. Paul-lez-Durance. 2022.
2. Asakura N. et al. Recent progress of plasma exhaust concepts and divertor designs for tokamak DEMO reactors //Nuclear Materials and Energy. – 2023. – Т. 35. – С. 101446.
3. Кутеев Б.В. Мощные нейтронные источники на основе реакций ядерного синтеза / Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. // Физика плазмы – 2010. – Т. 36 – № 4 – С.307–346.
4. Велихов Е.П. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза — стратегический ориентир развития отрасли / Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Игнатьев В.В., Цибульский В.Ф., Андрианова Е.А., Бландинский В.Ю. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез – 2017. – Т. 40 – № 4 – С.5–13.
5. Stork D. Introduction to the special issue on the technical status of materials for a fusion reactor / Stork D., Zinkle S.J. // Nuclear Fusion – 2017. – Т. 57 – № 9.
6. Jassby D.L. Optimization of fusion power density in the two-energy-component tokamak reactor / Jassby D.L. // Nuclear Fusion – 1975. – V. 15 – № 3 – P.453–464.
7. Peng Y.-K.M. Features of spherical torus plasmas / Peng Y.-K.M., Strickler D.J. // Nuclear Fusion – 1986. – V. 26 – № 6 – P.769–777.
8. Гончаров П.Р. Сопоставление нейтронного выхода классических и сферических токамаков / Гончаров П.Р., Кутеев Б.В., Голиков А.А., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р., Шпанский Ю.С., Курчатовский Н.И.Ц., Сергеев В.Ю., Быков А.С., Грязневич М.П. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез – 2011. – V. 2 – P.36–42.
9. Yoshida M. et al. Transport and confinement physics Chapter 2 of the special issue: on the path to tokamak burning plasma operation / M. Yoshida (Chair Transport and Confinement), R.M. McDermott (co-Chair Transport and Confinement), C. Angioni, Y. Camenen, J. Citrin, M. Jakubowski, J.W. Hughes,

Y. Idomura, P. Mantica, A. Mariani, S. Mordijck, E.J. Paul, T. Tala, G. Verdoolaege, A. Zocco, F.J. Casson, G. Dif-Pradalier, B. Duval, B.A. Grierson, S.M. Kaye, P. Manas, M. Maslov, T. Odstrcil, J.E. Rice, L. Schmitz, F. Sciortino, E.R. Solano, G. Staebler, M. Valovic, E. Wolfrum, J.A. Snipes (co-Chair Transport and Confinement) and the Transport and Confinement Group // Nuclear Fusion. – 2025. – T. 65. – №. 3. – C. 033001.

10. Sykes A. First results from MAST / A. Sykes, R.J. Akers, L.C. Appel, E.R. Arends, P.G. Carolan, N.J. Conway, G.F. Counsell, G. Cunningham, A. Dnestrovskij, Yu.N. Dnestrovskij, A.R. Field, S.J. Fielding, M.P. Gryaznevich, S. Korsholm, E. Laird, R. Martin, M.P.S. Nightingale, C.M. Roach, M.R. Tournianski, M.J. Walsh, C.D. Warrick, H.R. Wilson, S. You, MAST Team and NBI Team // Nuclear Fusion – 2001. – V. 41 – № 10 – P.1423–1433.

11. Ono M. Next-step spherical torus experiment and spherical torus strategy in the course of development of fusion energy / Ono M., Peng M., Kessel C., Neumeyer C., Schmidt J., Chrzanowski J., Darrow D., Grisham L., Heitzenroeder P., Jarboe T., Jim C., Kaye S., Menard J., Raman R., Stevenson T., Viola M., Wilson J., Woolley R., Zatz I. // Nuclear Fusion – 2004. – V. 44 – № 3 – P.452–463.

12. Valovič M. Scaling of H-mode energy confinement with I_p and BT in the MAST spherical tokamak / Valovič M., Akers R., Cunningham G., Garzotti L., Lloyd B., Muir D., Patel A., Taylor D., Turnyanskiy M., Walsh M. // Nuclear Fusion – 2009. – V. 49 – № 7. P 075016

13. Kaye S.M. Energy confinement scaling in the low aspect ratio National Spherical Torus Experiment (NSTX) / Kaye S.M., Bell M.G., Bell R.E., Fredrickson E.D., Leblanc B.P., Lee K.C., Lynch S., Sabbagh S.A. // Nuclear Fusion – 2006. – V. 46 – № 10 – P.848–857.

14. Valovič M. Collisionality and safety factor scalings of H-mode energy transport in the MAST spherical tokamak / Valovič M., Akers R., Bock M. De, McCone J., Garzotti L., Michael C., Naylor G., Patel A., Roach C.M., Scannell R., Turnyanskiy M., Wisse M., Guttenfelder W., Candy J. // Nuclear Fusion – 2011. –

15. Kaye S.M. The dependence of H-mode energy confinement and transport on collisionality in NSTX / Kaye S.M., Gerhardt S., Guttenfelder W., Maingi R., Bell R.E., Diallo A., Leblanc B.P., Podesta M. // *Nuclear Fusion* – 2013. – V. 53 – № 6 – P.063005.

16. Sykes A. Spherical tokamak programme at Culham / Sykes A. // *Nuclear Fusion* – 1999. – V. 39 – № 9 – P.1271–1281.

17. Sabbagh S.A. Overview of physics results from the conclusive operation of the National Spherical Torus Experiment / S.A. Sabbagh, J.-W. Ahn, J. Allain, R. Andre, A. Balbaky, R. Bastasz, D. Battaglia, M. Bell, R. Bell, P. Beiersdorfer, E. Belova, J. Berkery, R. Betti, J. Bialek, T. Bigelow, M. Bitter, J. Boedo, P. Bonoli, A. Boozer, A. Bortolon⁰, D. Boyle, D. Brennan, J. Breslau, R. Buttery, J. Canik, G. Caravelli, C. Chang, N. Crocker, D. Darrow, B. Davis, L. Delgado-Aparicio, A. Diallo, S. Ding, D. D'Ippolito, C. Domier, W. Dorland, S. Ethier, T. Evans, J. Ferron, M. Finkenthal, J. Foley, R. Fonck⁰, R. Frazin, E. Fredrickson, G. Fu, D. Gates, S. Gerhardt, A. Glasser, N. Gorelenkov, T. Gray, Y. Guo, W. Guttenfelder, T. Hahm, R. Harvey, A. Hassanein, W. Heidbrink⁰, K. Hill, Y. Hirooka, E.B. Hooper, J. Hosea, D. Humphreys, K. Indireskumar, F. Jaeger, T. Jarboe, S. Jardin, M. Jaworski, R. Kaita, J. Kallman, O. Katsuro-Hopkins, S. Kaye, C. Kessel, J. Kim, E. Kolemen, G. Kramer, S. Krashennnikov, S. Kubota, H. Kugel, R.J. La Haye, L. Lao, B. LeBlanc, W. Lee, K. Lee, J. Leuer, F. Levinton, Y. Liang, D. Liu⁰, J. Lore, N. Luhmann Jr, R. Maingi, R. Majeski, J. Manickam, D. Mansfield, R. Maqueda, E. Mazzucato, A. McLean, D. McCune, B. McGeehan, G. McKee⁰, S. Medley, E. Meier, J. Menard, M. Menon, H. Meyer, D. Mikkelsen, G. Miloshevsky, D. Mueller, T. Munsat, J. Myra, B. Nelson, N. Nishino⁰, R. Nygren, M. Ono, T. Osborne, H. Park, J. Park, Y.S. Park, S. Paul, W. Peebles, B. Penaflor, R.J. Perkins, C. Phillips, A. Pigarov, M. Podesta, J. Preinhaelter, R. Raman, Y. Ren, G. Rewoldt, T. Rognlien, P. Ross, C. Rowley, E. Ruskov⁰, D. Russell, D. Ruzic, P. Ryan, M. Schaffer, E. Schuster, F. Scotti, K. Shaing⁰, V. Shevchenko, K.

- Shinohara, V. Sizyuk, C.H. Skinner, A. Smirnov, D. Smith⁰, P. Snyder, W. Solomon, A. Sontag, V. Soukhanovskii, T. Stoltzfus-Dueck, D. Stotler, B. Stratton, D. Stutman, H. Takahashi, Y. Takase, N. Tamura, X. Tang, G. Taylor, C. Taylor, K. Tritz, D. Tsarouhas, M. Umansky, J. Urban, E. Untergberg, M. Walker, W. Wampler, W. Wang, J. Whaley, R. White, J. Wilgen, R. Wilson, K.L. Wong, J. Wright, Z. Xia, D. Youchison, G. Yu, H. Yuh, L. Zakharov, D. Zemlyanov, G. Zimmer and S.J. Zweben // *Nuclear Fusion* – 2013. – V. 53 – № 10 – P.104007.
18. Turco F. The high- β_N hybrid scenario for ITER and FNSF steady-state missions / Turco F., Petty C.C., Luce T.C., Carlstrom T.N., Zeeland M.A. Van, Heidbrink W., Carpanese F., Solomon W., Holcomb C.T., Ferron J.R. // *Physics of Plasmas* – 2015. – V. 22 – № 5 – P.056113.
19. Dnestrovskij A.Y. Integrated modelling of DEMO-FNS current ramp-up scenario and steady-state regime / Dnestrovskij A.Y., Kuteev B. V., Bykov A.S., Ivanov A.A., Lukash V.E., Medvedev S.Y., Sergeev V.Y., Sychugov D.Y., Khayrutdinov R.R. // *Nuclear Fusion* – 2015. – V. 55 – № 6 – P.63007.
20. Гусев В.К. Сферический токамак Глобус-М / Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Подушникова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трегубова Е.Н., Узлов В.С., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Сойкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А. // *ЖТФ* – 1999. – Т. 69 – № 9 – С.58–62.
21. Roach C.M. Confinement in START beam heated discharges / Roach C.M., Akers R.J., Conway N.J., Dodge T.M., Gryaznevich M.P., Helander P., Sykes A., Walsh M.J. // *Nuclear Fusion* – 2001. – V. 41 – № 1 – P.11–30.
22. Meyer H. Formation of transport barriers in the MAST spherical tokamak / Meyer H., Field A.R., Akers R.J., Brickley C., Conway N.J., Patel A., Carolan P.G., Challis C., Counsell G.F., Cunningham G., Helander P., Kirk A., Lloyd B., Maingi R., Tournianski M.R., Walsh M.J. // *Plasma Physics and Controlled Fusion* – 2004. – V. 46 – № 5 P. A291.

23. Kaye S.M. Confinement and local transport in the National Spherical Torus Experiment (NSTX) / Kaye S.M., Levinton F.M., Stutman D., Tritz K., Yuh H., Bell M.G., Bell R.E., Domier C.W., Gates D., Horton W., Kim J., LeBlanc B.P., Luhmann N.C., Maingi R., Mazzucato E., Menard J.E., Mikkelsen D., Mueller D., Park H., Rewoldt G., Sabbagh S.A., Smith D.R., Wang W. // Nuclear Fusion – 2007. – V. 47 – № 7 – P.499–509.

24. I.Yu. Senichenkov. Integrated modelling of the Globus-M tokamak plasma and a comparison with SOL width scaling / I.Yu. Senichenkov, E.G. Kaveeva, A.V. Gogoleva, E.O. Vekshina, G.V. Zadvitskiy, P.A. Molchanov, V.A. Rozhansky, S.P. Voskoboynikov, N.A. Khromov, S.A. Lepikhov, V.K. Gusev and The Globus-M Team // Nucl. Fusion 55 (2015) 053012 (7pp).

25. Levinton F.M. Magnetic field pitch-angle measurements in the PBX-M tokamak using the motional Stark effect / Levinton F.M., Fonck R.J., Gammel G.M., Kaita R., Kugel H.W., Powell E.T., Roberts D.W. // Physical Review Letters – 1989. – V. 63 – № 19 – P.2060–2063.

26. Field A.R. Plasma rotation and transport in MAST spherical tokamak / Field A.R., Michael C., Akers R.J., Candy J., Colyer G., Guttenfelder W., Ghim Y. -c., Roach C.M., Saarelma S. // Nuclear Fusion – 2011. – V. 51 – № 6 – P.63006.

27. Gusev V.K. Overview of results obtained at the Globus-M spherical tokamak / V.K. Gusev, S.E. Aleksandrov, V. Kh Alimov, I.I. Arkhipov, B.B. Ayushin, A.G. Barsukov, B. Ya Ber, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, A.V. Dech, V.E. Golant, A.E. Gorodetsky, V.V. Dyachenko, M.M. Kochergin, G.S. Kurskiev, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, V.M. Lebedev, V.M. Leonov, N.V. Litunovsky, I.V. Mazul, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, Yu A. Nikolaev, A.N. Novokhatsky, A.A. Panasenkov, M.I. Patrov, M.P. Petrov, Yu V. Petrov, K.A. Podushnikova, V.A. Rozhansky, V.V. Rozhdestvensky, N.V. Sakharov, O.N. Shcherbinin, I. Yu Senichenkov, A.E. Shevelev, E.V. Suhov, I.N. Trapesnikova, E.I. Terukov, G.N. Tilinin, S. Yu Tolstyakov, V.I. Varfolomeev,

A.V. Voronin, A.P. Zakharov, R. Kh Zalavutdinov, V.A. Yagnov, E.A. Kuznetsov and E.G. Zhilin // Nuclear Fusion – 2009. – V. 49 – № 10 – P.104021.

28. Гусев В.К. Комплекс нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М / Гусев В.К., Деч А.В., Есипов Л.А., Минаев В.Б., Барсуков А.Г., Игонькина Г.Б., Кузнецов В.В., Панасенков А.А., Соколов М.М., Тилинин Г.Н., Лупин А.В., Марков В.К. // ЖТФ – 2007. – Т. 77 – № 9 – С.28–43.

29. А.Ю. Тельнова. Разработка системы напуска газа в ионный источник инжектора атомов токамака Глобус-М и оптимизация с ее помощью параметров атомного пучка / Тельнова А.Ю., Минаев В.Б., Щеголев П.Б., Разуменко Д.В., Курские Г.С., Лупин А.В. // ЖТФ – 2017. - том 87 - вып. 7 – С.1097.

30. А.Ю. Тельнова и др., Реновация ионно-оптической системы источника ИПМ-2 инжектора атомов сферического токамака Глобус-М2 / Тельнова А.Ю., Минаев В.Б., Панасенков А.А., Щёголев П.Б. // 2022, Журнал технической физики – 2022 - Т 92 - №4 - С 540.

31 Pereverzev G. V. ASTRA–Automated System for Transport Analysis in a Tokamak / G. V Pereverzev, P. N. Yushmanov – San Diego, 2002.– 147 P.

32. Pankin A. The tokamak Monte Carlo fast ion module NUBEAM in the national transport code collaboration library / Pankin A., McCune D., Andre R., Bateman G., Kritz A. // Computer Physics Communications – 2004. – V. 159 – № 3 – P.157–184.

33. М. И. Миронов. Плазмофизический код DOUBLE-МС: моделирование потоков атомов, выходящих из плазмы / М. И. Миронов, Ф. В. Чернышев, В. И. Афанасьев, А. Д. Мельник, А. С. Наволоцкий, В. Г. Несеневич, М. П. Петров, С. Я. Петров // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ – 2021. – Т. 47 – № 1 – С. 29.

34. Bakharev N.N. Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak / Bakharev N.N., Chernyshev F. V, Goncharov P.R., Gusev V.K., Ibyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Y. V, Sakharov N. V, Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Y.,

Zadvitskiy G. V // Nuclear Fusion – 2015. – V. 55 – № 4 – P.43023.

35. Bakharev N.N. Toroidal magnetic field increase in the Globus-M spherical tokamak / Bakharev N.N., Chernyshev F. V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Miroshnikov I. V., Patrov M.I., Petrov Y. V., Sakharov N. V., Shchegolev P.B., Sladkomedova A.D., Solokha V. V., Telnova A.Y., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y. // Nucl. Fusion – 2018. – V. 58 – P.126029.

36. Тельнова А.Ю. Перенос Тепла И Частиц В Начальной Фазе Омических Разрядов Сферического Токамака Глобус-М / Тельнова А.Ю., Курскиев Г.С., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Киселев Е.О., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Токарев В.А., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хромов Н.А., Щёголев П.Б. // Письма В Журнал Технической Физики – 2019. – Т. 45 – № 13 – С.17.

37. Telnova A.Y. Influence of the safety factor profile on the particle and heat transport in the Globus-M spherical tokamak / Telnova A.Y., Kurskiev G.S., Kiselev E.O., Bakharev N.N., Gusev V.K., Khromov N.A., Medvedev S.Y., Minaev V.B., Miroshnikov I. V, Patrov M.I., Petrov Y. V, Sakharov N. V, Sladkomedova A.D., Shchegolev P.B., Solokha V. V, Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Tuxhmeneva E.A. // Plasma Sci. Technol. – 2019. – V. 21 – P.115101.

38. A. Yu. Telnova. Effect of the toroidal magnetic field the on energy and fast particle confinement in the Globus-M spherical tokamak / A Yu Telnova, V K Gusev, N N Bakharev, G S Kurskiev, M I Patrov, Yu V Petrov, E O Kiselev, V B Minaev, N V Sakharov and P B Shchegolev // J. Phys.: Conf. Ser. V 1038 P 012125.

39. А.Ю. Тельнова. Исследование влияния тока плазмы на ионный теплоперенос в сферическом токамаке Глобус-М / Тельнова А.Ю., Курскиев Г.С., Мирошников И.В., Авдеева Г.Ф., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Минаев В.Б., Мельник А.Д., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б. // ПЖТФ, 2018, Т. 44, В. 15. С 100

40. Telnova A.Y. Ion heat transport study in the Globus-M spherical tokamak / Telnova A.Y., Kurskiev G.S., Miroshnikov I. V., Sakharov N. V., Kiselev E.O., Larionova M.M., Bakharev N.N., Larionova D.M., Gusev V.K., Khromov N.A., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Y. V., Sladkomedova A.D., Shchegolev P.B., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Tukhmeneva E.A. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2020. – V. 62 – № 4. P. 045011
41. V.K. Gusev. Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2 // Nucl. Fusion – 2013. – V. 53. – P. 093013