

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)
Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su

Утверждаю
И. о. директора ИЯФ СО РАН,
академик РАН
д.ф.-м.н.



Отзыв ведущей организации
на диссертационную работу
ТЕЛЬНОВОЙ Анны Юрьевны

«Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке
Глобус-М»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. – Физика плазмы в диссертационный совет ФТИ 34.01.03.25 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Актуальность исследования

Диссертационная работа А. Ю. Тельновой посвящена развитию физики удержания высокотемпературной плазмы в токамаках с малым аспектным отношением, традиционно именуемых сферическими токамаками. Исследование особенностей физики таких систем является важным для создания полноценной базы знаний физических процессов, протекающих в подобных установках, что, в свою очередь, позволяет повысить научную обоснованность и снизить научные риски для разрабатываемых в настоящее время проектов источников термоядерных нейтронов и энергетических реакторов на основе схем с тороидальной топологией магнитного поля.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, список цитированной литературы включает 116 названий.

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, оценена степень разработанности темы исследования, определена цель и сформулированы задачи, отмечена научная новизна темы исследования, показана научная и практическая значимость диссертационной работы, представлены научные положения, выносимые на защиту, а также сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов, включая апробацию и основные научные публикации по теме исследования.

В первой главе автор производит анализ основных результатов предшествующих исследований удержания энергии и процессов переноса в плазме сферических токамаков. Глава включает в себя обзоры результатов по удержанию энергии, отличию скейлинга энергетического времени жизни в классических токамаках IPB98(y,2) от скейлингов, полученных в сферических токамаках MAST и NSTX. Рассматриваются процессы аномального переноса тепла и частиц, а также АТ-режим и предел по β_N . Важной частью введения является рассмотрение существующих транспортных моделей. Далее рассматриваются процессы переноса энергии по ионному каналу и конфигурации с обращенным профилем запаса устойчивости в сферических токамаках.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки (компактного сферического токамака Глобус-М/-М2) и применяемых методов моделирования физических процессов. Описывается токамак Глобус-М и его диагностический комплекс. Далее - комплекс нейтральной инжекции и работа по его модернизации, которая проведена диссертантом. Автором были выявлены физические причины проблем с обеспечением требуемых параметров нейтральной инжекции в существовавшей конструкции. Затем была проведена работа по улучшению системы подачи газа и модернизации ионно-оптической системы источника ИПМ-2. В результате диссертанту удалось увеличить длительность генерации нейтрального пучка до 50 мс, что соответствовало требованиям к пучку со стороны эксперимента. Далее в главе 2 рассматриваются применяемые в дальнейшем методы исследования процессов переноса в плазме токамаков, включая

использование различных существующих верифицированных численных кодов. Приводится описание транспортных моделей переноса в омических разрядах и в разрядах с нейтральной инжекцией.

В третьей главе приводятся основные результаты по процессам переноса, полученные автором в экспериментах на токамаке Глобус-М. Подразделы этой главы относятся к разным условиям и сценариям эксперимента. Рассматривается влияние тороидального магнитного поля и плотности на интегральные параметры плазмы. Далее исследуется перенос тепла и частиц на стадии роста тока плазмы как в омическом режиме, так и при нейтральной инжекции. Затем рассматриваются процессы нагрева ионов, в том числе влияние тока плазмы и удельной частоты столкновений. Приводится оценка столкновительности в сферическом токамаке Глобус-М2.

В заключении приведены основные результаты проведенного исследования. Их анализ позволяет сделать вывод о том, что поставленные цели исследования достигнуты. Обсуждается применимость результатов проведенного исследования для модификации Глобус-М2 с более сильным магнитным полем и для проектируемого сферического токамака следующего поколения Глобус-3.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, изложенных в диссертации

В ходе выполнения диссертационной работы автором получено несколько новых научных результатов, относящихся к физике удержания высокотемпературной плазмы в сферическом токамаке Глобус-М/-М2 и развитию возможностей данной установки по работе в новых сценариях эксперимента с нейтральной инжекцией.

В частности, были выявлены физические причины, предотвращавшие работу нейтрального инжектора с требуемой длительностью, проанализированы и применены меры по улучшению ситуации. В результате длительность инжекции возросла практически в 1,7 раза до 50 мс, что позволило реализовать на токамаке Глобус-М несколько новых сценариев эксперимента.

Впервые для компактных сферических токамаков продемонстрировано получение внутренних транспортных барьеров при специальном сценарии эксперимента с включением нейтральной инжекции на стадии подъема тока плазмы.

При этом получен режим с длительной фазой без пилообразных колебаний при тороидальном магнитном поле 0,5 Тл, получена плазма с пикированным профилем плотности электронов.

Впервые проведено исследование процессов переноса по ионному каналу при уменьшении столкновительности ν_i^* с 0,12 до 0,03 в режимах с нейтральной инжекцией, где был показан неоклассический характер потерь и, тем самым, исключено влияние турбулентности на ионный теплоперенос.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются как методологией научной работы автора, в частности, сравнением результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными диагностическим комплексом Глобус-М, так и принятыми в научном сообществе процедурами апробации и рецензирования результатов. Основные материалы диссертации представлялись диссертантом в докладах на четырех научных конференциях и опубликованы в шести статьях в реферируемых журналах, в которых А. Ю. Тельнова является первым автором.

Теоретическая и практическая значимость

По совокупности технических параметров сферический токамак Глобус-М/М2 отличается от других установок данного класса (START, MAST, NSTX) относительно большой величиной магнитной индукции на оси, близким расположением стенок вакуумной камеры относительно плазмы и большой величиной удельной мощности нейтральной инжекции. Это позволяет проводить исследования в режимах и в диапазонах параметров, недоступных для других установок. Часть из таких возможностей была исследована в диссертационной работе и эти результаты безусловно займут достойное место в мировой базе знаний по физике сферических токамаков.

С практической точки зрения двумя наиболее важными результатами являются демонстрация возможности создания внутренних транспортных барьеров в эксперименте с ранним началом нейтральной инжекции и демонстрация неоклассического характера потерь по ионному каналу. Оба эти результата могут быть напрямую применены при планировании экспериментов на следующей модификации установки Глобус-М2 и в перспективном проекте Глобус-3 (ФТИ им. Иоффе). Результаты работы и применявшиеся автором методики анализа

экспериментальных данных могут быть также использованы в других организациях, занимающихся исследованиями физики удержания плазмы в токамаках, в частности, в НИЦ «Курчатовский институт», ТРИНИТИ, МИФИ.

Замечания к тексту диссертационной работы

1. В работе неоднократно подчеркивается специфика физики сферических токамаков. В частности, обсуждаются скейлинги энергетического времени жизни плазмы в токамаках MAST и NSTX, существенно отличающиеся от IPB98(y,2). В то же время в работе интенсивно используется моделирование и анализ данных при помощи численных кодов, исходно разработывавшихся для классических токамаков. В тексте не хватает анализа того, насколько заложенные в эти коды предположения и упрощения адекватны задачам моделирования в сферических токамаках с $A < 2$. Аналогичный вопрос относится к скейлингу IPB98(y,2): если обсуждаемые результаты Глобус-М ему соответствуют ($H_{98y2} = 1$ в найденных автором оптимальных режимах), то требуется обсуждение того, как этот результат соотносится со скейлингами сферических токамаков.

2. Фраза «Впервые на токамаке START было обнаружено, что перенос ионами близок к уровню, предсказанному неоклассической теорией» (стр. 34) в этой формулировке некорректна, она относится только к сферическим токамакам, а в классических это было показано ещё группой Л. А. Арцимовича (Государственная премия СССР 1971 г.).

3. Стр. 49 и далее, п. 2.3.1. Отсутствует схема газовой системы. По тексту, клапан MaxTek MV112 одновременно выполняет две функции: подает рабочее тело в ГРК и производит формирование газовой мишени в нейтрализаторе. Более простая оптимизация режима работы инжектора могла быть реализована при отдельной подаче газа в генератор плазмы и в камеру нейтрализации. Причина выбора применявшегося решения не поясняется.

4. На стр. 58 говорится об улучшении качества нейтрального пучка и стабильности работы инжектора после проведенной оптимизации, но никаких доказательств путем сравнения с предыдущим состоянием инжектора не приводится. Улучшение качества юстировки сеточной системы (рис. 2.10) является несомненным технологическим достижением, но само по себе оно доказательством не является.

5. Фраза на стр. 69 «Величина коэффициента электронной температуропроводности предполагалась постоянной по радиусу» представляется прямо противоречащей экспериментальным данным, представленным на части d рис. 3.6 (разряд #29819, также проведенный в омическом режиме).

6. Фраза на стр. 70 «Экспериментально ионная температура определялась с помощью анализа потока атомов перезарядки NPA» непонятна, поскольку эта диагностика не имеет пространственного разрешения по радиусу, судя по схеме расположения. Тогда какие предположения делались при моделировании?

7. В главе 2 заявленная мощность нейтрального инжектора равна $P = 0,4$ МВт, а в главе 3 на стр. 79 без пояснений говорится о $P = 0,7$ МВт.

8. Стр. 85 и далее по тексту. На многих рисунках приводятся профили различных параметров, полученные в результате сложных процедур численного моделирования. При этом не обсуждается точность полученных таким образом результатов, хотя бы их воспроизводимость в серии экспериментов при одинаковых условиях. В ряде случаев возникает вопрос, а не являются ли обнаруженные различия флуктуацией каких-либо неконтролируемых условий эксперимента?

Помимо замечаний по содержанию диссертации, имеется ряд технических замечаний к ее тексту.

1. Более корректная ссылка на скейлинг для L-моды (стр. 18) – работа P. N. Yushmanov, et al. Scalings for tokamak energy confinement // Nuclear Fusion. – 1990. – V. 30. – № 10. – P. 1999–2006.

2. Выражение для доли бутстрэп-тока (стр. 24) в [48] отсутствует, в той работе вообще нет ни одной формулы. Нужна правильная ссылка.

3. На стр. 32 были бы полезны ссылки на первоисточник формул для коэффициентов диффузии.

4. Используется два разных термина для одной сущности: H-мода (стр. 32, первый абзац) и H-режим (стр. 34, первый абзац).

5. На стр. 59 в тексте ссылка на рис. 1 вместо рис. 2.9.

6. На стр. 79 и далее по тексту некорректно обозначаются интервалы значений, например, вместо «от 1.5 до $5 \cdot 10^{19}$ » должно быть $(1.5-5) \times 10^{19}$.

7. Технический сбой в нумерации рисунков, после 3.2 следует сразу 3.5.

8. Стр. 109, рис. 3.22 – техническая ошибка со штриховкой P_{RAD} .

9. Стр. 110 – техническая ошибка «Рисунок 3.23. Запас энергии в плазме для разрядов (номера)».

Отмеченные недостатки текста диссертации не снижают, однако, научной значимости и практической ценности работы.

Заключение

Диссертация А. Ю. Тельновой представляет собой законченное полноценное научное исследование, направленное на развитие физики удержания высокотемпературной плазмы в сферических токамаках. Полученные научные результаты являются достоверными, актуальными, новыми и важными для данного направления исследований.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.9. – Физика плазмы.

Основные результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором либо при ее определяющем участии. В тексте корректно цитируются результаты работ других исследователей при их использовании.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации.

Основные публикации по теме диссертации корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Считаем, что диссертационная работа «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 "Физика плазмы" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Тельнова Анна Юрьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник лаб. 10 ИЯФ СО РАН
Кандидат физико-математических наук,
Специальность 01.04.08 – физика плазмы
Тел: +7 (383) 329 42 74
e-mail: V.V.Postupaev@inp.nsk.su



Поступаев Владимир Валерьевич

Материал диссертации Тельновой Анны Юрьевны «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» рассмотрен на открытом заседании семинара плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН 23 апреля 2026 года. На заседании присутствовал 31 человек, из них 5 докторов физ.-мат. наук и 13 кандидатов физ.-мат. наук.

Председатель семинара

Советник директора ИЯФ СО РАН
Доктор физико-математических наук
Специальность 01.04.08 – физика плазмы
Тел: +7 (383) 329 46 02
e-mail: A.V.Burdakov@inp.nsk.su

Бурдаков Александр Владимирович

Отзыв на диссертацию Тельновой Анны Юрьевны «Исследование процессов переноса в компактном сферическом токамаке Глобус-М» обсужден и одобрен на заседании Секции Ученого совета ИЯФ СО РАН по физике плазмы (заседание 23 апреля 2026 года).

Заместитель директора по научной работе ИЯФ СО РАН
Доктор физико-математических наук
Специальность 01.04.08 – физика плазмы
Тел: +7 (383) 329 42 24
e-mail: P.A.Bagryansky@inp.nsk.su

Багрянский Петр Андреевич

30 апреля 2026 г.

Подписи Поступаева В. В., Бурдакова А. В. и Багрянского П. А. заверяю:

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН
Кандидат физико-математических наук



/ Резниченко А. В. /