

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19 декабря 2024 г. № 8

О присуждении Балаченкову Ивану Михайловичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Исследование альфвеновских волн в плазме сферического токамака ГЛОБУС-М/М2» по специальности 1.3.9 – «физика плазмы» принята к защите 10 октября 2024 г., протокол № 6, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 223 от 18.12.2023, № 177 от 11.10.2023, № 28 от 16.02.2023, № 41 от 25.02.2022, № 13 от 09.02.2021 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Балаченков Иван Михайлович, 8 июля 1994 года рождения, в 2018 году окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 03.04.02 «физика». В 2022 году окончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по направлению 03.06.01 - «Физика и астрономия». Кандидатские экзамены, в том числе по специальности 1.3.9 «физика плазмы», успешно сданы соискателем в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2021 году. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Петров Юрий Викторович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории методов нагрева и генерации тока плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. Мельников Александр Владимирович д.ф.-м.н., заместитель руководителя отделения токамаков по экспериментальной физике НИЦ «Курчатовский институт», дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

2. Афанасьев Валерий Иванович д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, зав. лабораторией атомных столкновений ФТИ им. А.Ф. Иоффе, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания. Отзыв составили Приходько Вадим Вадимович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории 9-1 ИЯФ СО РАН и Черноштанов Иван Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории 9-0 ИЯФ СО РАН. Отзыв утвердил академик РАН, доктор физико-математических наук, директор ИЯФ СО РАН Логачев Павел Владимирович. В отзыве сказано, что диссертация Балаченкова И.М. является законченным научным исследованием. Она описывает уникальные эксперименты по изучению плазмы и анализ данных, выполненные с участием автора. В диссертации ясно описаны как теория вопроса, так и важные технические особенности проведённых экспериментов, содержание диссертации соответствует заявленной теме. Диссертация Балаченкова И.М. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук соответствует Положению о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 «физика плазмы».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные

оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук является одним из ведущих научных центров в России, занимающихся исследованиями физики плазмы и управляемым термоядерным синтезом. На базе ИЯФ СО РАН действует несколько плазменных установок, работающих по принципу линейных ловушек – установок с магнитным удержанием, физические процессы в которых во многом подобны процессам, протекающим в токамаках.

Кроме того, в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 10 публикациях, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. Overview of GLOBUS-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current / Yu. V. Petrov, V. K. Gusev, N. V. Sakharov, V. B. Minaev, V. I. Varfolomeev, V. V. Dyachenko, I. M. Balachenkov, et al. – DOI 10.1088/1741-4326/ac27c7 // Nuclear Fusion. – 2022. – Т. 62 – № 4. – С. 042009

2. Measurement of the fast ion distribution using active NPA diagnostics at the Globus-M2 spherical tokamak / N. N. Bakharev, I. M. Balachenkov, et al. – DOI 10.1088/1361-6587/ac3497 // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2021. – Т. 63 – № 12. – С. 125036.

3. Анализ потерь быстрых ионов, вызванных распространением тороидальных альфвеновских мод в плазме сферического токамака Глобус-М2. И.М. Балаченков, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В. К. Гусев, М. В. Ильясова, Г.С. Курскиев, В. Б. Минаев, М. И. Патров, Ю. В. Петров, Н. В. Сахаров, О. М.Скрекель, А. Ю. Тельнова, Е. М. Хилькевич, А. Е. Шевелев, П. Б. Щеголев. – DOI 10.21883/JTF.2022.01.51850.227-21 // Журнал Технической Физики. – 2022. – Т. 92 – № 1. – С. 45 – 51.

4. Обнаружение высокочастотных альфвеновских колебаний в омических разрядах сферического токамака Глобус-М2. / И.М. Балаченков, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.В. Дьяченко, А.Н. Коновалов, П.А. Корепанов, С.В. Крикунов, В.Б. Минаев, М.И. Патров, Н.В. Сахаров. – DOI 10.21883/PJTF.2021.12.51061.18730 // Письма в Журнал Технической Физики. – 2021. – Т. 47, вып. 12. – С. 17.

5. Investigations of Alfvén Modes at the Globus-M2 Tokamak Using a VBand Multifrequency Doppler Reflectometer. / V. V. Bulanin, I. M. Balachenkov, V. I. Varfolomeev, V. K. Gusev, G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, M. I. Patrov, A. V. Petrov, Yu. V. Petrov, A. M. Ponomarenko, A. Yu. Telnova, P. B. Shchegolev, A. Yu. Yashin. – DOI 10.1134/S1063785021020206 // Technical Physics Letters. – 2021. – T. 47 – C. 197–200.

6. First Observations of Alfvén Cascades on the Globus-M2 Tokamak and Their Application for Minimal Safety Factor Value Analysis. / I. M. Balachenkov, Yu. V. Petrov, V. K. Gusev, N. N. Bakharev, V. V. Bulanin, V. I. Varfolomeev, N. S. Zhiltsov, E. O. Kiselev, G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, M. I. Patrov, A. V. Petrov, A. M. Ponomarenko, N. V. Sakharov, A. Yu. Tel'nova, V. A. Tokarev, N. A. Khromov, P. B. Shchegolev, A. Yu. Yashin. – DOI 10.1134/S1063785020120032 // Technical Physics Letters. – 2020. – T. 46 – C. 1157–1161.

7. Influence of increased magnetic field on Alfvén eigenmodes on upgraded spherical tokamak Globus-M2. / I. M. Balachenkov, Yu. V. Petrov, V. K. Gusev, N. N. Bakharev, V. V. Bulanin, V. I. Varfolomeev, V. V. Dyachenko, N. S., Zhiltsov, E. O. Kiselev, A. N. Konovalov, S. V. Krikunov, G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, M. I. Patrov, A. V. Petrov, A. M. Ponomarenko, N. V. Sakharov, A. Yu. Telnova, P. B., Shchegolev and A. Yu. Yashin. – DOI 10.1088/1742-6596/1697/1/012212 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – T. 1697 – C. 012212.

8. Implementation of cross-phase analysis for study of MHD instabilities arising on TUMAN-3M and Globus-M tokamaks / I. M. Balachenkov, M. I. Patrov, Yu. V. Petrov and A. S. Tukachinsky. – DOI 10.1088/1742-6596/1400/7/077016 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – T. 1400 – № 7. – C. 077016.

9. TAE-induced fast ion losses and transport at the Globus-M/M2 spherical tokamaks featured. / N. N. Bakharev, I. M. Balachenkov, F. V. Chernyshev, V. K. Gusev, M. V. Iliasova, E. M. Khilkevitch, N. A. Khromov, E. O. Kiselev, V. A. Kornev, G. S. Kurskiev, A. D. Melnik, V. B. Minaev, M. I. Mironov, I. V. Miroshnikov, Yu. V. Petrov, N. V. Sakharov, P. B. Shchegolev, A. E. Shevelev, O. M. Skrekel, A. Yu. Telnova, V. A. Tokarev, E. A. Tukhmeneva, V. I. Varfolomeev, A. Yu. Yashin, V. V. Zabrodsky. – DOI 10.1063/5.0156337 // Physics of Plasmas. – 2023. – T. 30 – C. 072507.

10. Chirping instabilities produced by a runaway electron beam at a spherical tokamak. / I. M. Balachenkov, N. N. Bakharev, V. K. Gusev, M. V. Iliasova, E. M. Khilkevich, P. S. Korenev, A. E. Konkov, V. B. Minaev, Yu. V. Mitrizhkin, M. I. Patrov, Yu. V. Petrov, N. V. Sakharov, A. E. Shevelev and O. M. Skrekel. – DOI 10.1088/2058-6272/acb875 // Plasma Science and Technology. – 2023. – T. 25 – C. 075102.

На автореферат поступило 2 отзыва.

1. Отзыв PhD, заведующего научной лабораторией перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков СПбПУ Петра Великого Гончарова Павла Романовича, положительный, замечаний не содержит.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника АО «НИИЭФА» Кавина Андрея Александровича, положительный, содержит 2 замечания:

- Избыточное число цитирований для автореферата (40 ссылок).
- Отсутствие иллюстрации наблюдаемого явления для режимов с продолжительными ТАЕ (стр. 17-18). Без рисунка на мой взгляд не совсем понятно, о чем идет речь.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Исследование альфвеновских волн в плазме сферического токамака ГЛОБУС-М/М2» были получены следующие основные результаты:

1. Определены основные свойства и пространственно-временная структура тороидальных альфвеновских мод, зарегистрированных на токамаке Глобус-М и –М2.

2. Получена линейная зависимость потерь быстрых частиц от амплитуды ТАЕ по данным широкополосного SPD фотодетектора и матрицы радиационных потерь. Полученные данные позволили получить скейлинг времени удержания быстрых ионов от амплитуды ТАЕ, магнитного поля и тока плазмы.

3. Продемонстрирована возможность определения скорости тороидального вращения в режимах, при которых наблюдаются продолжительные ТАЕ с расщеплением тороидальных гармоник.

4. Определены основные свойства и пространственно-временная структура мод при обращенном шире магнитного поля, зарегистрированных на токамаке Глобус-М и –М2.

5. Продемонстрирована возможность определения минимума запаса устойчивости в режимах, при которых наблюдаются моды на обращенном шире магнитного поля.

Практическая значимость работы заключается в том, что в рамках данной работы на токамаке Глобус-М2 был модернизирован комплекс диагностики магнитных зондовых измерений, увеличено число магнитных зондов и частотный диапазон измерений. Были разработаны программные средства для определения пространственной структуры и направления распространения волн в плазме, которые успешно применяются не только для исследования альфвеновских волн, но и для изучения других процессов, связанных с возмущением магнитного поля токамака. В контексте разработки будущего токамака Глобус-3 и на

основе установки – компактного термоядерного источника нейтронов на основе токамака, полученные в части изучения потерь быстрых частиц результаты, могут быть полезны для предсказания уровня потерь, связанных с альфвеновскими модами в проектируемых токамаках. Результаты измерения скорости тороидального вращения плазмы в разрядах с продолжительными ТАС могут быть использованы для калибровки диагностики активной спектроскопии перезарядки, а результаты измерения минимума запаса устойчивости могут позволить повысить достоверность восстановления магнитного равновесия, так как иными диагностиками величина минимума запаса устойчивости на токамаке Глобус-М-2 не измеряется.

Достоверность результатов обеспечена проведением большого количества экспериментов в широком диапазоне параметров плазмы, сопоставлением с результатами численного моделирования, а также сопоставлением данных, полученных различными методами. Полученные результаты также не противоречат результатам, полученным на других токамаках.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что альфвеновские волны в токамаках могут приводить к существенным потерям быстрых частиц. Быстрые частицы генерируются системами дополнительного нагрева для увеличения температуры плазмы, поэтому их потери снижают эффективность дополнительного нагрева. В токамаке-реакторе альфвеновские моды могут взаимодействовать с альфа-частицами, потери которых будут приводить к уменьшению нейтронного выхода. В связи с этим важной является задача определения уровня потерь быстрых частиц, связанных с альфвеновскими модами, и предсказание этих потерь в более крупных установках. Кроме того, поскольку различные параметры плазмы могут оказывать влияние на динамику альфвеновских мод, возможно применение связанных с ними сигналов для диагностики параметров плазмы, непосредственное измерение которых затруднено.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Результат модернизации зондовой диагностики для измерения возмущений магнитного поля в высокочастотном диапазоне (до 125 МГц) для определения их структуры и поляризации.

2. Результаты идентификации и определения пространственно-временной структуры трех типов альфвеновских мод, возникающих на токамаке Глобус-М2: тороидальных мод (ТАЕ), мод на обращенном шире магнитного поля (RSAE) и компрессионных альфвеновских мод (CAE).

3. Линейная зависимость уровня потерь быстрых ионов от амплитуды ТАС по данным диагностики НРА и твердотельных детекторов (SPD). Экспериментально установленное снижение уровня потерь быстрых частиц с увеличением тороидального магнитного поля и тока по плазме в токамаке Глобус-М2.

4. Результаты измерения скорости тороидального вращения плазмы по данным магнитной зондовой диагностики в режимах с продолжительными ТАС на токамаке Глобус-М2.

5. Демонстрация применимости метода измерения минимума запаса устойчивости по данным магнитных измерений в режимах с модами на обращенном шире магнитного поля (RSAE) на токамаке Глобус-М2.

6. Обнаружение впервые на сферическом токамаке альфвеновских «чирпинг»-мод, возбуждаемых быстрыми электронами в диапазоне частот порядка 1 МГц.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что указано в автореферате.

Автором лично разработаны и внедрены новые диагностические средства и методика анализа возмущений магнитного поля магнитными зондами, позволившие получить данные о пространственно-временной структуре и поляризации всех типов альфвеновских мод, затронутых в диссертационном исследовании. Проведен анализ влияния тороидального вращения на спектр тороидальных альфвеновских мод. Получены данные о минимальном запасе устойчивости в разрядах с альфвеновскими каскадами. Получена регрессионная зависимость величины потерь быстрых ионов от комбинированных параметров.

Совместно с Бахаревым Н. Н. и Скрекель О. М. получена регрессионная зависимость величины потерь быстрых ионов от магнитного поля и тока плазмы. Получена зависимость величины просадок в сигналах полупроводниковых детекторов от амплитуды ТАС, использованная для построения регрессионной зависимости величины потерь быстрых ионов от параметров плазмы.

Основные результаты, были представлены в виде восьми докладов на всероссийских и международных конференциях - Физика СПб 2019, Санкт-Петербург, Международная (Звенигородская) XLVII конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, Конференция PhysicA.SPb/2020, International Polytech-SOKENDAI Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, XLVIII Звенигородская (международная) конференция по физике плазмы и УТС, XIX Всероссийская конференция «Диагностика Высокотемпературной плазмы», XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС., L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 19, против – 0, воздержался – 0.

На заседании 19 декабря 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Балаченкову И.М. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

И.А. Горбунова

19 декабря 2024 г.