

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03,
созданного 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 13 октября 2022 г. № __

О присуждении Белокурову Александру Александровичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние геодезической акустической моды и инъекции макрочастицы на динамику L-N перехода в токамаке» по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы» принята к защите 16 июня 2022 года (протокол № 1) диссертационным советом ФТИ 34.01.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенного по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75 от 12 июля 2019 года.

Соискатель Белокуров Александр Александрович, «04» апреля 1990 года рождения, в 2012 году окончил с отличием магистратуру Федерального государственного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по направлению подготовки «Техническая физика». В 2016 году окончил аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе по направлению 01.04.08 – «Физика плазмы». В настоящее время работает младшим научным сотрудником в лаборатории Физики высокотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории Физики высокотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Леонид Георгиевич Аскинази, старший научный сотрудник лаборатории Физики высокотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Кавеева Елизавета Геннадьевна, профессор, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научной лаборатории перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» дала положительный отзыв на диссертацию.
2. Хабанов Филипп Олегович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт» дал положительный отзыв на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук, заведующим лабораторией ионно-циклотронного нагрева отдела физики плазмы ИОФ РАН Мещеряковым Алексеем Ивановичем, утвержденном чл.-корр. РАН, доктором физико-математических наук, директором ИОФ РАН Гарновым Сергеем Владимировичем, указала, что диссертация Белокурова А.А. представляет собой завершённую научно-

квалификационную работу и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель Белокуров Александр Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученые степени доктора и кандидата наук, в течение длительного времени работают в области физики плазмы и не имеют 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 обусловлен тем, что Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» является одной из организаций России, проводящей исследования в области физики высокотемпературной плазмы, и ведет активные работы в области, соответствующей диссертационному исследованию Белокурова А.А.

Основное содержание диссертации представлено в 11 статьях в научных изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science (в скобках указан личный вклад соискателя); наиболее важные работы:

1. D.V. Kouprienko, A.D. Gurchenko <https://orcid.org/0000-0002-2540-2511>, E.Z. Gusakov, A.B. Altukhov <https://orcid.org/0000-0002-5913-6004>, L.G. Askinazi <https://orcid.org/0000-0003-4906-3099>, **A.A. Belokurov** <https://orcid.org/0000-0001-8942-6734>, et al. Isotope effect in turbulent transport in high density FT-2 tokamak discharges // Nucl. Fusion 2022 62

- 066045 (Моделирование и анализ сценариев с высокой концентрацией плазмы в токамаке ФТ-2).
2. **Alexander Belokurov**<https://orcid.org/0000-0001-8942-6734>, Gulnara Abdullina, Leonid G Askinazi, et al. Particle source and radial electric field shear as the factors affecting the L-H transition possibility and dynamics in a tokamak // Phys. Scr. 2020 95 115604 (Описание в рамках единой модели L-H перехода сценариев с ГАМ на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, сценариев с пеллет-инжекцией на токамаке ТУМАН-3М и сценариев с высокой концентрацией плазмы на токамаке ФТ-2).
 3. **Белокуров А.А.**, Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., и др. Влияние временных характеристик колебаний геодезической акустической моды на возможность инициирования L-H перехода в токамаке ТУМАН-3М. // Письма ЖТФ 2019 т.45 15 43 (Моделирование и анализ сценариев с колебаниями ГАМ переменной частоты и сериями вспышек ГАМ)
 4. **A.A. Belokurov**, L.G. Askinazi, et al. Dynamics of the L-H transition in TUMAN-3M tokamak in the scenarios with cryogenic pellet injection // Nucl. Fusion 2018 58 112007 (Проведение экспериментов по инжекции криогенной пеллеты в токамаке ТУМАН-3М, моделирование и анализ сценариев с L-H переходом при инжекции пеллеты)
 5. L G Askinazi, **A A Belokurov**, V V Bulanin, et al. Physics of GAM-initiated L-H transition in a tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion 2017 v.59 1 014037 (Моделирование и анализ сценариев с ГАМ и L-H переходом в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2)

На автореферат поступило 3 отзыва.

Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, заведующего Научной лабораторией «Теория и моделирование плазмы токамаков» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого» Рожанского Владимира Александровича положительный и содержит 2 замечания:

- В работе предполагается, что коэффициенты переноса зависят от градиента концентрации. Это упрощенное предположение. В действительности, коэффициенты переноса зависят от шира вращения, т.е. от производной электрического поля, которая содержит и первую и вторую производные от концентрации и саму концентрацию.
- Переменное электрическое поле ГАМ может не так эффективно подавлять турбулентность, как постоянное поле – соответствующий дрейф может не успевать «разорвать» турбулентность. Тут нужны были бы соответствующие оценки.

Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Отдела физики плазмы Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» Василькова Дмитрия Григорьевича положительный и содержит 2 замечания:

- Хотя практически все стадии эксперимента сопровождаются результатами моделирования, самому моделированию в автореферате посвящено мало информации. Кроме основных теоретических предпосылок и влияния тех или иных факторов, было бы интересно понимать более подробно, как именно проводится расчет распределения параметров. Кроме того, графического сравнения эксперимента с теорией в автореферате не представлено.
- В автореферате говорится о пороговой мощности нагрева и концентрации плазмы как о важных факторах, определяющих возможность L-N переходов. Стоило бы более подробно обосновать их важность и привести в тексте автореферата конкретные численные значения.

Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им.

А.Ф. Иоффе Лашкула Сергея Ивановича положительный и содержит 2 замечания:

- Следует отметить желательность более подробного описания физических процессов, приводящих к появлению зональных потоков и раскачке геодезической акустической моды.
- Следовало бы привести основные параметры подробно рассматриваемых токамаков ТУМАН-3М и ФТ-2. Это необходимо для более полного представления круга задач, которые необходимо будет решать с помощью используемого в работе подхода.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем исследований получен ряд важных результатов, а именно:

1. Проведены эксперименты по инициированию L-N перехода инжектируемой замороженной водородной или дейтериевой пеллетой. Определены предпочтительные условия инжекции для инициирования L-N перехода (периферийное испарение, совместный влёт в плазму твёрдого осколка пеллеты и облака газа от разрушенной части пеллеты). Обнаружены различные сценарии улучшения удержания – классический L-N переход и временное улучшение удержания с обратным HL-переходом.
2. Разработана численная модель, позволяющая самосогласованно рассчитать эволюцию профилей концентрации и ионной температуры с учётом коэффициента диффузии, зависящего от шира радиального электрического поля. Для рассмотренных сценариев на основании данных, полученных из модели и эксперимента, построены нелинейные зависимости потока частиц от градиента концентрации, на основании вида которых можно определить возможность существования различных режимов удержания.
3. Для основных экспериментальных сценариев с улучшением удержания при пеллет-инжекции построена модель эволюции профилей концентрации и ионной температуры. С помощью моделирования показано, что инициирование L-N перехода возможно в случае периферийного испарения

пеллеты, создающего сильный шир E_r в области формирования транспортного барьера Н-моды. Также показано, что величина источника определяет возможность инициирования L-N перехода – в стандартных режимах с пеллет-инжекцией требовался дополнительный источник частиц, создаваемый облаком газа от испарившейся в пеллетопроводе части пеллеты.

4. Модель применена к сценариям с колебаниями геодезической акустической моды в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2. Для токамака ТУМАН-3М определены пороговые значения параметров ГАМ, необходимые для инициирования перехода в режим улучшенного удержания. Значения амплитуды ГАМ, необходимые для инициирования перехода в Н-моду, оказываются близки к экспериментальным величинам. Показана возможность инициирования перехода в режим улучшенного удержания серией всплеск ГАМ за счёт накопления шира среднего E_r . Для токамака ФТ-2 в режимах с низкой концентрацией плазмы с помощью модели показана невозможность инициирования L-N перехода всплеском ГАМ, что подтверждается экспериментом. С помощью моделирования показано, что величина источника частиц является фактором, определяющим наличие и отсутствие перехода в режим улучшенного удержания в режимах с низкой концентрацией в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 соответственно.

5. Модель применена к сценариям с высокой концентрацией в ФТ-2, допускающим существование режима улучшенного удержания. С помощью моделирования показано, что в данных сценариях величина источника оказывается достаточной для существования режима улучшенного удержания. Модификация профиля с образованием транспортного барьера возможна только в случае, если шир среднего E_r существенно превосходит уровень инкремента нарастания турбулентности; в противном случае профиль в режиме улучшенного удержания мало отличается от профиля в режиме обычного омического удержания.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что отработанная методика экспериментов по тангенциальной инжекции

замороженной пеллеты в токамак ТУМАН-3М может быть использована в различных сценариях, направленных на инициирование перехода в режим улучшенного удержания. Также разработанная транспортная модель эволюции профилей концентрации и ионной температуры может быть применена к другим сценариям, например сценариям с нейтральным нагревом, и к другим токамакам. Общность результатов, полученная в результате работы, подтверждает универсальность модели. Анализ разнообразных сценариев при помощи разработанной модели позволяет предсказать сочетание параметров плазмы, необходимое в том или ином сценарии для достижения режима улучшенного удержания.

Полученные в результате работы результаты являются экспериментально обоснованными; моделируемые сценарии используют преимущественно экспериментальные данные. Достоверность модели подтверждается успешным применением ее для описания различных режимов на двух токамаках – ТУМАН-3М и ФТ-2. Достоверность результатов обеспечивается многократно повторёнными измерениями и сравнением результатов различных диагностик.

Все представленные в диссертации результаты были получены автором или же при его непосредственном участии. При непосредственном участии автора проведены эксперименты по инжекции криогенной пеллеты в токамак ТУМАН-3М. Для исследования возможности инициирования L-N перехода автором лично была разработана численная модель, рассчитывающая эволюцию профилей концентрации и ионной температуры плазмы при различных возмущениях. Автором был проведён анализ возможности существования различных режимов удержания, применённый в сценариях с ГАМ на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, сценариях с инжекцией пеллеты на токамаке ТУМАН-3М, и сценариях с высокой концентрацией плазмы в токамаке ФТ-2.

При проведении закрытого голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 8 докторов по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – 0, воздержавшихся – 0.

На заседании 13 октября 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Белокурову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 «Физика плазмы».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Васютинский Олег Святославович

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

Белашов Андрей Владимирович