

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 5 июня 2025 г. № 5

О присуждении Солохе Владимиру Владимировичу,
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2» по специальности 1.3.9 – «физика плазмы» принята к защите 3 апреля 2025 г., протокол № 2, 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 № 02.01-02-054 от 20.03.2025, № 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 Солоха Владимир Владимирович, 3 апреля 1994 года рождения, в 2017 году с отличием 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 физики 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 – Курские Глеб Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный консультант – Яшин Александр Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Официальные оппоненты:

1. Кавеева Елизавета Геннадьевна, доктор физико-математических наук, ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, ведущий научный сотрудник, дала положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

2. Степаненко Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», старший научный сотрудник, 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 подготовили Шошин Андрей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИЯФ СО РАН и Багрянский Петр Андреевич, заместитель директора по научной работе ИЯФ СО РАН, доктор физико-математических наук. Отзыв утвердил директор ИЯФ СО РАН, академик РАН, доктор физико-математических наук Павел Владимирович Логачев.

В отзыве ведущей организации указано, что автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание. Результаты исследований могут быть использованы в научной работе профильных учреждений, таких как: НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ» и в других институтах и учреждениях, где проводятся работы по управляемому термоядерному синтезу и разработке термоядерного источника нейтронов. Диссертационная работа Солохи В.В. «Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2» 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 Солоха

Владимир Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а второй – кандидата 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 ИЯФ СО РАН является одним из ведущих научных центров в России, занимающихся исследованиями в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Кроме того, в ИЯФ СО РАН действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 6 публикациях, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus:

- V.V. Solokha (концептуализация, обработка данных, анализ, моделирование, написание работы), G.S. Kurskiev, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, S.Yu. Tolstyakov, E.E. Mukhin, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.A. Tokarev, N.A. Khromov, M.I. Patrov, N.N. Bakharev, A.D. Sladkomedova, A.Yu. Telnova, P.B. Shchegolev, E.O. Kiselev and A.Yu. Yashin «Simulations of peeling-ballooning modes in the Globus-M tokamak» J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012002 (2018) [doi:10.1088/1742-6596/1094/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012002)

- В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Д.В. Присяжнюк, Н.В. Сахаров, В.В. Солоха (анализ, моделирование, написание фрагмента работы), С.Ю. Толстяков, Н.А. Хромов, А.Ю. Яшин «Влияние низкочастотных магнитогидродинамических мод на развитие филаментов в токамаке Глобус-М» Письма в журнал технической физики 19, стр. 21 (2019) [doi:10.21883/PJTF.2019.19.48312.17933](https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.19.48312.17933)

- V.V. Solokha (концептуализация, обработка данных, анализ, моделирование, написание работы), V.V. Bulanin, G.S. Kurskiev, A.Yu. Yashin and N.S. Zhiltsov «The model of synchronization between internal reconnections and edge-localized modes» Plasma Phys. Control. Fusion 63 122001 (2021) [doi:10.1088/1361-6587/ac36a4](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac36a4)

- В.В. Солоха (концептуализация, обработка данных, анализ, моделирование, написание работы), Г.С. Курскиев, А.Ю. Яшин, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.Ю. Горяинов, В.В. Дьяченко, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, В.Б. Минаев, А.Н. Новохацкий, Ю.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, Е.Е. Ткаченко, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева,

Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев. «Классификация краевых неустойчивостей на токамаке Глобус-М2» Физика Плазмы, 2023, том 49, № 4, с. 322–331 [doi:10.1134/S1063780X23600184](https://doi.org/10.1134/S1063780X23600184)

• А. Ponomarenko, V. Gusev, E. Kiselev, G. Kurskiev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, V. Solokha (анализ, моделирование, написание фрагмента работы), N. Teplova, P. Shchegolev, A. Yashin and N. Zhiltsov «The investigation of edge-localized modes on the Globus-M2 tokamak using Doppler backscattering» Nucl. Fusion 64 022001 (2024) [doi:10.1088/1741-4326/ad0ead](https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad0ead)

• G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, N.V. Sakharov, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, I.V. Miroshnikov, N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, F.V. Chernyshev, V.V. Dyachenko, V.Yu. Goryainov, M.V. Iiasova, E.M. Khilkevich, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, A.N. Novokhatskii, M.I. Patrov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, K.D. Shulyatiev, O. M. Skrekel, V.V. Solokha (анализ, моделирование, написание фрагмента работы), A.Yu. Telnova, N.V. Teplova, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, G.A. Troshin, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, N.S. Zhiltsov, P.A. Bagryansky, S. V. Ivanenko, I.V. Shikhovtsev, A.L. Solomakhin, E.N. Bondarchuk, A.A. Kavin, A.B. Mineev, V.N. Tanchuk, A.A. Voronova, K.V. Dolgova, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, V.A. Rozhansky, V.M. Timokhin, A.Yu. Yashin, A.E. Konkov, P.S. Korenev, Yu.V. Mitrishkin, E.G. Zhilin, V.A. Solovey «Confinement, heating, and current drive study in Globus-M2 toward a future step of spherical tokamak program in Ioffe Institute» Phys. Plasmas 31, 062511 (2024) [doi:10.1063/5.0211866](https://doi.org/10.1063/5.0211866)

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Физико-механического института ФГАОУ ВО «СПбПУ» Тимохина Владимира Михайловича положительный, содержит 3 замечания:

• Значительный объем работы посвящён детальному анализу устойчивости пилинг-баллонной моды для различных магнитных конфигураций плазменного шнура с помощью вычисления инкремента для различных значений высот и ширин пьедестала. Однако в положения, выносимые на защиту, результаты этого анализа, являющиеся, на мой взгляд, хорошим инструментом интерпретации экспериментальных данных и обладающие предсказательными возможностями, включены не были.

• При расчете диаграмм устойчивости, автор приводит тороидальные модовые числа наиболее неустойчивой моды, для широкого диапазона параметров пьедестала и различных режимов токамака Глобус-

M2. Однако, как используются эти числа для анализа результатов моделирования из содержания автореферата непонятно. По моему мнению, работу соискателя существенно украсило бы сопоставление модовых чисел, экспериментально наблюдаемых филаментарных структур, например, с помощью высокоскоростной съемки, с результатами моделирования при помощи кода VOUT++.

- В качестве одной из основных диагностик для определения наличия краевых неустойчивостей автор использовал классическую спектрометрическую диагностику излучения $H\alpha/D\alpha$ на основе оптических фильтров и полупроводниковых диодов. На мой взгляд, автору следовало уделить внимание более детальному описанию физических механизмов, приводящих к наблюдению всплесков на сигнале данной диагностики при развитии краевых неустойчивостей.

2. Отзыв кандидата физико-математических наук, доцента Физико-механического института СПбПУ Сениченкова Ильи Юрьевича положительный, содержит 2 замечания:

При описании численного моделирования синхронизованных неустойчивостей не очень ясно, являются ли дополнительный ток и электрическое поле на краю плазменного шнура внешними параметрами модели, или они возникают в моделировании самосогласованно. На стр. 14 написано, что «Для объяснения феномена синхронизации ... необходимо введение в модель дополнительного воздействия», а далее на стр. 16 утверждается, что «МГД моделирование показывает, что при внутреннем перезамыкании ... возможно возникновение дополнительной плотности тока». Нет ли здесь противоречия?

- Автореферат страдает от «трудностей перевода», когда общепринятые англоязычные термины заменяются русскоязычными, которые в реальном общении российских специалистов по физике плазмы и УТС практически не используются. В то же время иногда оставлены англоязычные термины («пилинг мода», «валидация», «фреймворк» и другие) и англоязычные обозначения (f_{ELM}), которые общеприняты и легко понятны. Не следует ли при первом появлении такого «переводного» термина в тексте приводить его оригинальный англоязычный аналог?

3. Отзыв кандидата физико-математических наук, руководителя отделения экспериментальной физики токамаков Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Натальи Александровны Кирневой положительный содержит 5 замечаний:

- Автор утверждает, что условия дестабилизации пилинг-баллонной моды зависят от формы плазмы. Однако, в работе не указано, сохранялось ли граничное значение фактора запаса устойчивости плазмы (q_{95}) при изменении формы шнура. Изменение q_{95} может приводить к

изменению градиента тока вблизи границы плазмы, а, следовательно, и влиять на устойчивость пилинг-баллонной моды.

- При обсуждении краевых неустойчивостей, синхронизованных с внутренним срывом, кажется важным показать изменение профилей плотности и температуры плазмы в области пьедестала, возникающих вследствие внутреннего срыва. Кажется целесообразным указать положение поверхности переворота фазы пилообразных колебаний в режимах с синхронизованными, частично синхронизованными и независимыми краевыми неустойчивостями. Можно ли связать развитие краевой неустойчивости в режимах с синхронизованными неустойчивостями с изменением давления вблизи сепаратрисы, вызванного внутренним перезамыканием?

- При уточнении классификации десинхронизованных неустойчивостей автор ссылается на эксперименты с варьируемой мощностью нагрева плазмы. При этом в качестве характеристики изменения мощности используется количество источников нагрева. Целесообразно было бы привести значения мощностей. Так же важно отметить, была ли мощность омического нагрева пренебрежимо малой.

- В ряде случаев автор приводит абсолютные значения параметров. Например, - температура ионов 4 кэВ; - время задержки между внутренним перезамыканием и развитием краевой неустойчивости 156 ± 72 мкс; - плотность тока, необходимая для развития неустойчивости 80 кА/м^2 . Однако, понятно, что абсолютные значения присущи только данной установке и не несут в себе отражения физического механизма. Целесообразно было бы связать их с характерными значениями. Например, кажется целесообразным приводить время задержки в сравнении с диффузионным и/или локальным скиновым временем.

- При оформлении автореферата соискатель допустил ряд опечаток, например,

- стр. 3, 1 абзац, строки 8-9 и 13 сверху;
- стр. стр. 13, строка 11 сверху;
- стр. 20, строка 11 снизу.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2» были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что большинство наблюдавшихся на Глобус-М краевых неустойчивостей синхронизировано с перезамыканиями магнитных поверхностей в центральной области плазмы, возникающими при пилообразных колебаниях.

2. Предложена гипотеза для объяснения связи краевых неустойчивостей и пилообразных колебаний. Внутреннее перезамыкание приводит к дополнительному индуцированию тока на краю плазмы достаточного для дестабилизации пилинг-баллонной моды, что подтверждается количественными оценками.

3. В плазменных разрядах токамака Глобус-М2 при токе плазмы 0.3 МА и выше обнаружены краевые неустойчивости развивающиеся независимо от внутренних перезамыканий в условиях близких к границе устойчивости для пилинг-баллонной моды

4. Изучено влияние магнитной конфигурации плазменного разряда на магнитогидродинамическую устойчивость краевой плазмы сферического токамака при тороидальном магнитном поле более 0.6 Тл. Проведённые эксперименты и численные расчеты показали, что пороговая величина давления краевой плазмы, необходимая для развития независимых краевых неустойчивостей снижается с 4.0 кПа до 1.3 кПа при снижении треугольности с 0.36 до 0.20.

5. Анализ устойчивости краевой плазмы для проекта сферического токамака Глобус-3 с тороидальным магнитным полем 1,8 Тл показал, что ток плазмы сильно влияет на её устойчивость. При токе по плазме 0.8 МА пилинг-баллонная мода неустойчива при давлении краевой плазмы 5-6 кПа. Увеличение тока плазмы до 2.0 МА приводит к увеличению пороговой величины давления краевой плазме до 15-17 кПа.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы для предсказания устойчивости краевой плазмы проектируемых сферических токамаков с большим значением тороидального магнитного поля. Сделанные выводы важны для построения моделей управления устойчивостью краевой плазмы для токамака – реактора и токамака – источника нейтронов.

Достоверность результатов обеспечена многократной воспроизводимостью результатов измерений, отсутствием противоречий в данных, полученных различными диагностическими средствами и согласием с результатами численного моделирования. Отсутствуют противоречия между результатами, полученными в диссертации и результатами теоретических и экспериментальных исследований на других токамаках. Достоверность результатов моделирования обуславливается использованием общепризнанных магнитогидродинамических моделей.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что краевые неустойчивости плазмы в токамаках вызывают значительные потери частиц и энергии плазмы, что приводит к увеличению тепловых нагрузок на материал облицовки вакуумной камеры и может привести к существенному уменьшению эффективности работы термоядерного

реактора. Условия развития магнитогидродинамических неустойчивостей в краевой плазме сферических и классических токамаках значительно отличаются. На момент написания диссертации сферические токамаки с высоким значением тороидального магнитного поля являются основой прототипов термоядерных реакторов (проекты STEP и EHL-3). Краевые неустойчивости в сферических токамаках с тороидальным магнитным полем более 0.6 Тл ранее не исследовались.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

- В сферическом токамаке Глобус-М2 дестабилизация пилинг-баллонной моды и развитие спонтанных краевых неустойчивостей (типа ELM), не вызванных пилообразными колебаниями, происходит в разрядах со средней концентрацией электронов более $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, мощностью дополнительного нагрева плазмы инжектором нейтральных частиц более 0.6 МВт, магнитным полем на оси вакуумной камеры $B_T = 0.8 \text{ Тл}$, током плазмы $I_p = 0.4 \text{ МА}$, треугольностью $\delta \approx 0.35$ и вытянутостью $k \approx 1.7$ при достижении порогового значения давления плазмы (4 кПа) в области потоковых координат $\psi_n = 0.8-0.9$.

- Пороговое значение давления плазмы необходимое для дестабилизации пилинг-баллонной моды зависит от формы плазменного шнура на сферическом токамаке Глобус-М2. При низких значениях треугольности ($\delta \approx 0.2$) и большой вытянутости ($k \approx 1.9$) плазменного шнура пороговое значение давления в 3 раза меньше, чем в режиме с треугольностью $\delta \approx 0.35$ и вытянутостью $k \approx 1.7$.

- Дестабилизация пилинг-баллонной моды в сферических токамаках Глобус-М/М2 возможна при значениях давления плазмы вблизи сепаратрисы в четыре раза ниже порогового при треугольности 0.35. Для развития неустойчивости при этом достаточно роста плотности тока в области потоковых координат $\psi_n = 0.70 - 0.95$ до величины 80 кА/м^2 .

Все представленные в диссертации результаты, получены непосредственно автором или при его активном участии. Автор принимал прямое участие в эксперименте, обслуживал экспериментальную установку, производил анализ экспериментальных данных, выполнял теоретические и численные исследования, интерпретацию результатов экспериментов и расчётов самостоятельно. Автором предложен эксперимент по нейтральной инжекции в условиях низкой треугольности плазменного шнура. Совместно с научным руководителем Г.С. Курскиевым сформулированы тема, цели и задачи научного исследования, выработаны положения, выносимые на защиту, а также были обработаны данные диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М/М2. Совместно с научным консультантом А. Ю. Яшиным обработаны данные

диагностики доплеровского обратного рассеяния на токамаке Глобус-М/М2 и проведена валидация результатов моделирования кодом VOUP++.

Основные результаты были представлены в докладах на российских и международных конференциях - Международная молодежная конференция Физика, СПб., 24-27 октября, 2017 года, 45-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 2 - 6 апреля 2018 года, Nature Conference Advances and Applications in Plasma Physics, St. Petersburg, Russia, 18 - 20 сентября 2019 года, 48-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 15 - 19 марта 2021 года, 49-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 14 - 18 марта 2022 года, 50-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 19 - 23 марта 2023 года, 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023), г. Лондон, Великобритания, 16 – 21 октября 2023 года

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 11 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 5 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Солохе В.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

О.С. Васютинский

И.о. ученого секретаря диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

А.Ю. Попов

5 июня 2025 г.