

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.03.2018г. № 33

О присуждении Кормилицыну Тимофею Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Развитие методов нейтронной диагностики термоядерной плазмы токамака в условиях интенсивного дополнительного нагрева» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 17.10.2022г., (протокол заседания № 25) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495)485-8345, jiht.ru), утвержден приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 86/нк от 26 января 2022г.

Соискатель Кормилицын Тимофей Михайлович 1995 года рождения, в 2018 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности начальника сектора ДМНП Отдела Нейтронной и Спектроскопической Диагностики Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР".

В 2022 году окончил очную аспирантуру Федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена в Отделе Нейтронной и Спектроскопической Диагностики Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР".

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, начальник Отдела Нейтронной и Спектроскопической Диагностики Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР", Кащук Юрий Анатольевич.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской Академии Наук» Бурдаков Александр Владимирович;

- доктор физико-математических наук, научный руководитель по управляемому термоядерному синтезу и плазменным технологиям Акционерного Общества «ГНЦ РФ «Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований» Романников Александр Николаевич

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» в своем положительном заключении, составленном и.о. заведующего кафедрой физики плазмы Института лазерных и плазменных технологий, к.ф.-м.н. Гаспаряном Ю.М. (утвержденном 30.11.2022г. и.о. ректора, д.ф.-м.н., профессором Нагорновым О.В.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь востребованностью полученных результатов: они уже применяются при разработке нейтронных диагностик для токамака-реактора ИТЭР, а также будут использованы на действующих установках УТС как в России

(Глобус-М2 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, TRT в АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»), так и за рубежом (EAST в Институте Физики Плазмы АН КНР, KSTAR в Корейском Институте Термоядерной Энергии). Впервые предложен метод нейтронной диагностики высокотемпературной дейтериевой плазмы, основанный на применении сцинтиллятора хлорида лантана. Рассмотренные с помощью моделирования особенности отклика детекторов нейтронной диагностики позволяют интерпретировать результаты измерений для более точного восстановления параметров плазмы. Важным результатом является анализ ограничений, накладываемых на существующие методы нейтронной диагностики плазмы интенсивным дополнительным нагревом, а также альтернативные способы измерения ключевых параметров плазмы – ионной температуры и топливного отношения.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах и институтах, проводящих исследования в области физики высокотемпературной плазмы, а также работающих с источниками быстрых нейтронов, в частности, в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, в НИЦ «Курчатовский Институт», в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, МФТИ (НИУ), НИЯУ МИФИ и НИУ «МЭИ», ОИВТ РАН.

Соискатель является главным автором 5 работ, всего по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ, 8 тезисов в сборниках трудов конференций:

1. *Kormilitsyn T., Polevoi A., Bertalot L., Mironov M., Krasilnikov V., Serikov A., Barnsley R., Kashchuk Yu., Loarte A., Pinches S., Assessment of the Fast Particle Spectra for Tangential Spectrometer for H/He and DT ITER Operation” // Proc. of the 45th EPS Conference on Plasma Physics, 2018, P2.1005, 601-604.*
2. *Кормилицын Т.М., Портнов Д.В., Кацук Ю.А. Моделирование спектров быстрых частиц для Тангенциального Спектрометра ИТЭР // Вопросы Атомной Науки и Техники: Серия Термоядерный Синтез, 2018, 41(4)*

3. *Kormilitsyn, T., Nemtsev, G., Rodionov, R., Kashchuk, Y., Portnov, D.* Modelling of the NBI contribution to the neutron energy spectra for the ITER Vertical Neutron Camera // Journal of Instrumentation, 2019, 14(10), C10019
4. *Kormilitsyn, T., Obudovsky, S., Kashchuk, Y., Rodionov R., Pankratenko, A., Dzhurik, A.* Application of the LaCl<sub>3</sub>(Ce) Scintillator to Fast Neutron Measurements // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, 18(1), p. 75–81
5. *Kormilitsyn T.M., Obudovsky S.Yu., Rodionov R.N., Pankratenko A.V., Dzhurik A.S., Kashchuk Yu.A. and Krasilnikov A. V.* Novel LaCl<sub>3</sub>(Ce)-based spectrometer for deuterium plasma neutron diagnostics // Review of Scientific Instruments 92, 043528 (2021)
6. *Pankratenko A.V., Kormilitsyn T.M., Obudovsky S.Yu., Dzhurik A.S., Kashchuk Yu.A.* Digital Pulse Shape Discrimination Method for D–D Neutron Spectrometry Using the LaCl<sub>3</sub>(Ce) Scintillator // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, 19, p. 66-76
7. *Afanasyev V.I., ..., Kormilitsyn T.M., et al.* Development of the NPA based diagnostic complex in ITER // Journal of Instrumentation, 2022, vol. 17, no. 07, p. C07001

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»** (и.о. старшего научного сотрудника, к.ф.-м.н. Шевелев А.Е.) – отзыв положительный, с двумя уточняющими вопросами:

- Интенсивность сцинтилляции, вызванной торможением продуктов (n,p) реакции в хлорсодержащем детекторе, зависит от массы частицы. Насколько, в таком случае, справедливо предположение о пропорциональности энергии регистрируемого нейтрона энергии регистрируемых осколков реакции?
- На рис.5 стр.14 видно расхождение результатов эксперимента и модели, что может быть объяснено отсутствием в модели детально проработанной

конструкции нейтронного генератора. В связи с этим вопрос – какие еще приближения были использованы в рамках решения данной задачи, в частности, учтены ли при моделировании источника НГ анизотропия нейтронного излучения по направлению и энергии?

**2. Автономная некоммерческая организация «Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты»** (Начальник отдела Диагностики СВЛ, к.ф.-м.н. Алексеев А. Г.) – отзыв положительный, без замечаний.

**3. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»** (заместитель начальника отдела ИТЭР Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий, д.ф.-м.н., Вуколов К.Ю.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Стилистику изложения материала и использование узкопрофессиональных терминов,
- Краткое и в некоторых случаях недостаточно подробное объяснение результатов и выводов,
- Отдельно следует отметить отсутствие в исследовании решения задачи восстановления локального нейтронного спектра по откликам детекторов, для детекторов с классической (Гаусс подобной) функцией отклика данная задача решается достаточно тривиально.

**4. Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»** (директор отделения магнитных и оптических исследований, к.ф.-м.н. Житлухин А.М.) - отзыв положительный, с рекомендациями:

- При приведении полученных в токамаках рекордных данных (стр. 3) хотелось бы рекомендовать более четко разделять времена энергетического удержания плазмы и времена поддержания тока, а то

может сложиться впечатление, что на токамаке EAST получено время удержания плазмы в сотни и тысячу секунд.

- Было бы желательно наличие хотя бы кратких пояснений по расхождению модельного отклика хлорсодержащего сцинтиллятора и результатов эксперимента, приведенных на рисунке 5 (стр 14).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., с.н.с. Бурдаков Александр Владимирович является ведущим ученым в области физики высокотемпературной плазмы с интенсивным дополнительным нагревом, а также крупным специалистом по применению инъекции пучков нейтралов в экспериментах по удержанию плазмы в магнитных ловушках.

1. *Postupaev V.V., Batkin V.I., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N.* Results of the First Plasma Campaign in a Start Configuration of GOL-NB Multiple-mirror Trap // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, volume 62, n. 2, p. 025008, 2020;

2. *Popov S.S., Atlukhanov M.G., Burdakov A.V., Ivanov A.A., Kasatov A.A., Kolmogorov A.V., Vakhrushev R.V., Ushkova M.Yu., Smirnov A., Dunaevsky A.* Neutralization of negative hydrogen and deuterium ion beams using non-resonance adiabatic photon trap // *Nuclear Fusion*, Volume 58, n. 9, p. 096016, 2018;

3. *Никишкин А.В., Иванов И.А., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Куклин К.Н., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф.* Многохордовая пучковая диагностика плазмы на установке ГОЛ-NB // *Физика плазмы*, т. 48, н. 3, стр. 212-221, 2022.

- д.ф.-м.н., Романников Александр Николаевич является признанным специалистом в области физики высокотемпературной плазмы, в частности в вопросах физики токамаков, современных методов нагрева и корпускулярной диагностики плазмы.

1. *Romannikov A.N. and Fusion Research Centre Team* Medium size tokamak T-15MD as a base for experimental fusion research in Russian Federation // EPJ Web of Conferences, vol. 149, p. 01007, 2017;
2. *Ongena J., Messiaen A.M., Melnikov A.V., Ragona R., Kazakov Ye.O., Van Eester D., Dnestrovskii Yu.N., Romannikov A.N., Khvostenko P.P., Roy I.N.* Conceptual study of an ICRH system for T-15MD using traveling wave antenna (TWA) sections // Fusion Engineering and Design, vol. 146, p. 787-791, 2019;
3. *Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N., Romannikov A.N., Chudnovsky A.N., Kavin A.A., Khvostenko A.P., Kirneva N.A., Kuzmin E.G., Levin I.V., Leonov V.M., Lutchenko A.V., Modyaev A.L., Notkin G.E., Roy I.N., Sokolov M.M. Sushkov A.V.* Current status of tokamak T-15MD // Fusion Engineering and Design, vol. 164, p. 112211, 2021.

- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» является широкопрофильной организацией, специализирующейся на подготовке кадров для проведения исследований в области физики плазмы, включая физику высокотемпературной плазмы и разработку диагностических систем для действующих и проектируемых установок УТС в Российской Федерации и за рубежом.

1. *Dnestrovskiy Yu.N., Danilov A.V., Dnestrovskiy A.Yu., Klyuchnikov L.A., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Subbotin G.F., Soloviev N.A., Sushkov A.V., Sychugov D.Yu., Cherkasov S.V.* Comparison of Plasma Heating at First and Second Electron Cyclotron Harmonics in the T-10 Tokamak // Plasma Physics Reports, vol. 42, p. 477-489, 2020;
2. *Gasparyan Y., Bulgadaryan D., Efimov N., Efimov V., Krat S., Popova M., Sinelnikov D., Vovchenko E., Dmitriev A., Elets D., Mukhin E., Razdobarin A., Minaev V., Novokhatsky A., Sakharov N., Varfolomeev V.* Laser-aided diagnostic of hydrogen isotope retention on the walls of Globus-M2 tokamak // Fusion Engineering and Design, vol. 172, p. 112882, 2021;

3. *Dnestrovskiy A.Y., Kukushkin A.S., Kuteev B.V., Sergeev V.Y.* Integrated modelling of core and divertor plasmas for the DEMO Fusion Neutron Source hybrid facility // *Nuclear Fusion*, vol. 59, no. 9, p. 096053, 2019.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– С использованием двухкомпонентной модели спектра термоядерных нейтронов предложен метод анализа экспериментальных данных с целью определения характеристик разряда при высокой мощности (десятках МВт) дополнительного нагрева методами инъекции быстрых нейтралов и ионно-циклотронного резонанса. Предложен метод определения граничной энергии быстрых ионов с помощью прямого численного моделирования, выше которой использование нейтронной диагностики может обеспечить анализ характеристик их функции распределения. Показаны существенные ограничения современных методов нейтронной диагностики плазмы, используемых для определения ионной температуры плазмы;

– Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден новый метод диагностики высокотемпературной дейтериевой плазмы, основанный на регистрации быстрых нейтронов в результате реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$  в хлорсодержащих сцинтилляционных детекторах. Показано, что нейтронный спектрометр на основе такого кристалла обладает классической функцией отклика, что значительно упрощает процедуру восстановления исходного распределения быстрых нейтронов по энергии;

– При помощи Монте-Карло методов моделирования транспорта нейтронного излучения через вещество рассчитаны функции отклика нейтронных спектрометров (органического сцинтиллятора, хлорсодержащего сцинтиллятора и алмазного полупроводникового), используемых в настоящее время для диагностики высокотемпературной плазмы. Проведено сравнение результатов расчёта с данными эксперимента. Отклики детекторов нормированы на энергию образовавшихся частиц в объеме детектора, что

согласуется с результатами эксперимента. На основании построенных моделей исследованы диапазоны ионной температуры и топливного отношения плазмы, определяемых с помощью разрабатываемой для токамака ИТЭР диагностики при различных значениях временного разрешения с обеспечением требуемой статистической погрешности.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– проведен анализ влияния интенсивного нагрева плазмы на наблюдаемый спектр быстрых нейтронов, что позволило выявить ограничения существующих методов нейтронной диагностики плазмы;

– показан потенциал использования нейтронной диагностики для исследования характеристик функции распределения быстрых ионов плазмы в условиях высокой мощности нагрева;

– показано влияние распределения по энергии продуктов (n,p)-реакции на хлоре-35 при регистрации термоядерных нейтронов на амплитудное распределение оставленной в кристалле энергии и, как следствие, на отклик нейтронных спектрометров, используемых для диагностики плазмы.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что предложен и обоснован новый метод нейтронной диагностики высокотемпературной плазмы на основе спектрометрии ДД нейтронов с помощью сцинтилляционного детектора  $\text{LaCl}_3$ . Метод обоснован моделированием функций отклика этого и других нейтронных спектрометров разного типа, что позволяет использовать их для анализа широкого ряда характеристик высокотемпературной плазмы (ионной температуры, топливного отношения, времени замедления быстрых ионов на электронах) и, в частности, функции распределения быстрых ионов. Подходы, использованные при моделировании, широко применяются при разработке нейтронных диагностик токамака-реактора ИТЭР, а также имеют большой потенциал применимости для ряда других российских и зарубежных токамаков.

Результаты диссертационного исследования могут быть

рекомендованы для использования в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, НИЦ «Курчатовский Институт», ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, АО «ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», ФГУП ВНИИА имени Н. Л. Духова, МФТИ(НИУ), НИЯУ МИФИ и НИУ МЭИ, ОИВТ РАН.

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила, что она подтверждается согласованным сравнением результатов моделирования и экспериментальных данных, проведением измерений на современном оборудовании при использовании проверенных ранее методик. Проведенное моделирование основывается на широко апробированных расчётных кодах транспорта ионизирующего излучения MCNP, GEANT, а также кода ASTRA, моделирующего процессы в плазме токамака. Предложенный метод нейтронной диагностики верифицирован на экспериментальном стенде с детально характеризованным источником – генератором быстрых нейтронов – выход которого, а также распределение нейтронов по энергии и направлению контролировались штатными средствами диагностики, включая образцы-свидетели.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке модели, описывающей в двухкомпонентном приближении спектр термоядерных нейтронов высокотемпературной плазмы, развитии существующих методик восстановления параметров плазмы с помощью нейтронной диагностики, а также в самостоятельном обосновании (в том числе с помощью моделирования) новейшего метода нейтронной диагностики дейтериевой плазмы. Автор принимал активное участие в проведении экспериментальных исследований, а также играл ключевую роль при анализе и интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 11 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии соискателя.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не

было.

Соискатель Кормилицын Тимофей Михайлович ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 21.12.2022г. диссертационный совет принял решение за решение научной задачи, имеющей значение для развития физики плазмы, присудить Кормилицыну Тимофею Михайловичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 24 человек, из них очно: 5 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 5 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 24, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

21.12.2022г.

