

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 1 декабря 2022 г. № _4_

О присуждении Ильясовой Маргарите Вадимовне,
гражданке Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Применение методов нейтронной и гамма спектрометрии для изучения поведения быстрых ионов в плазме токамака» по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы» принята к защите 15 сентября 2022 года (протокол № 2) 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 Ильясова Маргарита Вадимовна, 26 мая 1995 года рождения, в 2018 году окончила с отличием магистратуру Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого по направлению подготовки 03.04.02 Физика. В 2022 году окончила аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе по направлению 1.3.9 – «Физика плазмы». В настоящее время работает на должности и.о. младшего научного сотрудника в циклотронной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

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

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Шевелев Александр Евгеньевич, и.о. старшего научного сотрудника циклотронной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Чернышев Федор Всеволодович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории процессов атомных столкновений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук дал положительный отзыв на диссертацию.

2. Кашук Юрий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела нейтронной и спектроскопической диагностики Частного учреждения Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" "Проектный центр ИТЭР" дал положительный отзыв на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником ИЯФ СО РАН, Полосаткиным С.В., доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ИЯФ СО РАН Бурдаковым А.А., указала, что диссертация Ильясовой М.В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель Ильясова Маргарита Вадимовна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что Чернышев Ф.В. и Кашук Ю.А. имеют ученые степени доктора и кандидата наук,

соответственно, имеют большой опыт работы 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 Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук является одной из организаций в России, проводящей исследования в области физики высокотемпературной плазмы, и ведет активные работы в области, соответствующей диссертационному исследованию Ильясовой М.В.

Основное содержание диссертации представлено в 13 статьях в научных изданиях, 11 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science (в скобках указан личный вклад соискателя); наиболее важные работы:

1. Piasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Minaev V.B., Gin D.B., Doinikov D.N., Polunovsky I.A., Naidenov V.O., Kozlovskiy M.A., Kudoyarov M.F., Calibration of neutron spectrometers based on a BC-501A liquid scintillator using the neutron-gamma coincidence method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. – Vol. 983. 164590 (Описание процедуры калибровки нейтронных спектрометров BC-501A, получение функций отклика детекторов на моноэнергетическое нейтронное излучение и эффективность регистрации нейтронов)
2. Ильясова М.В., Шевелев А.Е., Хилькевич Е.М., Чугунов И.Н., Дойников Д.Н., Кудояров М.Ф., Найденов В.О., Полуновский И.А., Измерения спектров гамма- и нейтронного излучения в ядерных реакциях с ионами ^3He и ^9Be // Письма в Журнал Технической Физики. 2021. – Том 47. №3. Стр. 3-6 (Обработка и анализ измерений спектров гамма- и нейтронного

излучения, получение угловых распределений вылета продуктов ядерных реакций между ионами ^3He и ^9Be)

Иласова М.В., Шеверев А.Е., Хилкевич Е.М., Чугунов И.Н., Дойников Д.Н., Кудояров М.Ф., Наиденов В.О., Полуновский И.А., Measurements of gamma- and neutron-radiation spectra in nuclear reactions with He-3 and Be-9 ions // Technical Physics Letters. 2021. – Vol. 47. No. 2. pp. 103-106

3. Иласова М., Шеверев А., Хилкевич Е., Лебедев С., Аскинази Л., Корнев В., Минаев В., Тукачинский А., Дойников Д., Полуновский И., Наиденов В., Гин Д., Measurements of neutron fluxes from tokamak plasmas using a compact neutron spectrometer // Review of Scientific Instruments. 2021. – Vol. 92. No. 4. 043560 (Разработка системы нейтронной диагностики, обработка и анализ данных, полученных в нейтронных измерениях на токамаке ТУМАН-3М)
4. Иласова М.В., Шеверев А.Е., Хилкевич Е.М., Бакhareв Н.Н., Скрекел О.М., Минаев В.В., Дойников Д.Н., Гин Д.Б., Гусев В.К., Корнев В.А., Наиденов В.О., Новокхатский А.Н., Петров Ю.В., Полуновский И.А., Сахаров Н.В., ШчегOLEV П.В., Телнова А.Ю., Варфоломеев В.И., Neutron diagnostic system at the Globus-M2 tokamak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. – Vol. 1029. 166425 (Разработка системы нейтронной диагностики, обработка и анализ данных, полученных в нейтронных измерениях на токамаке Глобус-М2)
5. Иласова М., Шеверев А., Хилкевич Е., Казаков Ye., Киптиль В., Nocente M., Giacomelli L., Craciunescu T., Stancar Z., Dal Molin A., Rigamonti D., Tardocchi M., Дойников Д., Горини Г., Наиденов В., Полуновский И., Гин Д., JET Contributors, Gamma-ray measurements in D3He fusion plasma experiments on JET // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. – Vol. 1031. 166586 (обработка и анализ спектров гамма-излучения, измеренных на токамаке JET)

На автореферат поступило 3 отзыва.

Отзыв кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией ионно-циклотронного нагрева отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) Мещерякова Алексея Ивановича положительный и содержит 2 замечания:

- на странице 15 написано *«Из разложения гамма-спектра на две линии оценен коэффициент ветвления переходов в основное (I_0) и первое возбужденное состояние (I_1) в ${}^5\text{Li}$ как $I_0/I_1=1,12\pm 0,18$. Оно согласуется со значением $I_0/I_1=1,0\pm 0,2$, полученным в работе [18] при $E_D = 480$ кэВ»*. Параметр E_D нигде больше не встречается. Читателю невозможно понять, что это за параметр, и какую роль он играет при измерении коэффициента ветвления переходов.
- здесь же, следующий абзац: *«Используя среднее значение коэффициента ветвления $\langle V \rangle = 4,69 \times 10^{-5}$, была получена оценка скорости протекания $D({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ реакции в видимом объеме плазмы, усредненная по трем разрядам #94698, 94700, 94701, равная $\sim 5,79 \times 10^{13} \text{ c}^{-1}$ »*. Здесь следует уточнить как в данном случае определяется коэффициент ветвления. Иначе возникает вопрос о корректности сравнения средней скорости генерации α -частиц и интенсивности $D-{}^3\text{He}$ реакции, которое следует ниже в тексте данной работы.

Отзыв кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории Физики высокотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук Корнева Владимира Александровича положительный и содержит 4 замечания:

1. На стр. 10, Рис.1 не указан источник нейтронов и гамма квантов, для которого был построен данный график.

2. На стр. 13 символ τ_s используется для обозначения времени торможения быстрого иона до энергии E_n , хотя этот символ принято использовать для обозначения времени термализации быстрого иона до тепловых энергий.
3. На стр. 13 в строчке №9 обозначение E_c следует заменить на E_n .
4. В пункте 2 основных положения работы заявлена разработка нейтронных спектроскопических систем, позволяющих проводить измерения нейтронных спектров при скорости счета до 10^6 с⁻¹. В условиях максимальной скорости счета могут происходить наложение сигналов. Обработка подобных сигналов с помощью формулы (1) невозможна. В работе не приведена методика обработки подобных случаев. Было бы полезно указать долю таких случаев к общему количеству зарегистрированных импульсов за разряд.

Отзыв кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) Василькова Дмитрия Григорьевича положительный и содержит 2 замечания:

1. Поскольку особенный интерес как физическое явление представляют гамма-переходы в ядерных реакциях с участием легких изотопов, следовало бы более подробно описать это явление с физической точки зрения. Из работы следует, что данное явление имеет принципиальное значение для термоядерного реактора, хотя является малоизученным.
2. В печатной версии автореферата черно-белые иллюстрации, однако в подписях упомянуты цветные графики (как в электронной версии), что снижает восприятие иллюстраций.

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

1. Разработана и применена на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе методика калибровки и обработки сигналов детекторов нейтронного

излучения на основе органических сцинтилляторов. Методика калибровки основана на методе нейтрон-гамма совпадений в комбинации с времяпролетной методикой. Была проведена экспериментальная кампания по калибровке двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора ВС-501А. Метод нейтрон-гамма совпадений позволил выделить нейтроны группы n_1 из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ в широком диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. В результате применения этого метода была получена энергетическая зависимость функций отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора ВС-501А на моноэнергетическое нейтронное излучение в указанном энергетическом диапазоне. Была определена зависимость эффективности детекторов от энергии регистрируемых нейтронов.

2. На токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 были разработаны спектрометрические системы нейтронной диагностики. Системы позволяют проводить спектрометрические измерения нейтронных потоков из плазмы токамака со скоростью счета до 10^6 c^{-1} . В экспериментах с инжекцией пучка дейтерия в дейтериевую плазму, с помощью спектрометров ВС-501А были измерены экспериментальные спектры нейтронного излучения. С помощью кода DeGaSum было восстановлено энергетическое распределение нейтронов, рожденных в DD-реакции в разрядах плазмы токамаков Глобус-М2 и ТУМАН-3М. На основе нейтронных измерений была получена временная эволюция нейтронного выхода в течение разряда плазмы. Из полученных данных была оценена интенсивность DD реакции, которая достигала порядка 10^{10} - 10^{11} c^{-1} на токамаке ТУМАН-3М и порядка 10^{11} c^{-1} на токамаке Глобус-М2. В нейтронных измерениях на Глобус-М2 наблюдалось влияние пилообразных осцилляций на выход нейтронов и удержание быстрых ионов в плазме.

3. Развита методика анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения быстрых ионов, включая удерживаемые α -частицы, рожденные в процессе реакций синтеза. Из

анализа интенсивности гамма-излучения получены оценки скорости реакции синтеза в разрядах с инъекцией дейтериевых пучков и ИЦР-нагревом. Интенсивность генерации α -частиц была оценена в видимом для детектора объеме плазмы из измерений гамма-излучения реакции ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}$ с энергией 16,7 МэВ. С учетом области локализации источника α -частиц была оценена общая скорость протекания ${}^3\text{He}$ -D реакции синтеза $\langle R_\alpha \rangle \approx (1,45 \pm 0,4) \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$. Анализ уширенной за счет эффекта Доплера формы линии 4,44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha,n\gamma){}^{12}\text{C}$ позволил восстановить энергетическое и угловое распределение удерживаемых α -частиц, рожденных в реакции D- ${}^3\text{He}$ синтеза. Было обнаружено, что в видимом для детектора объеме плазмы удерживаемые α -частицы обладают сильной угловой анизотропией и содержат большую долю высокоэнергетических частиц.

4. На циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработана экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C. Подготовлен эксперимент по измерению функций возбуждения гамма-переходов ядер ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{11}\text{C}$, являющихся продуктами ядерных реакций между легкими ядрами плазменного топлива и ядрами примесей в плазме токамака. Проведены предварительные измерения спектров гамма и нейтронного излучения при облучении бериллиевой мишени пучком ${}^3\text{He}$. Восстановлено угловое распределение вылета протонов относительно направления движения ядра ${}^3\text{He}$.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что созданные спектрометры нейтронного излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2, а разработанная методика измерения функций отклика спектрометров на моноэнергетические нейтроны может быть использована для калибровки сцинтилляционных спектрометров и для восстановления распределений нейтронного излучения по экспериментально измеренным спектрам. Разработанные методики цифровой обработки и

амплитудного анализа сигналов сцинтилляционных детекторов нейтронного излучения применяются в экспериментах с высокотемпературной плазмой на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2. Разработанные методики изучения распределений быстрых ионов нашли применение в экспериментальных исследованиях плазмы на токамаке JET и будут применены в диагностике плазмы термоядерного реактора ИТЭР. Развитая методика оценки скорости реакции синтеза в D-³He плазме по измеренному гамма-излучению 16,7 МэВ позволяет оценить скорость рождения α -частиц в D-³He реакции синтеза. Разработанная экспериментальная установка для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C была применена для подготовки эксперимента по измерению функций возбуждения гамма-переходов ядер ¹¹B и ¹¹C, являющихся продуктами ядерных реакций между легкими ядрами ³He плазменного топлива и ядрами примесей ⁹Be.

Результаты, представленные в диссертации, являются экспериментально обоснованными. Экспериментальные данные, приведенные в работе, прошли проверку численным моделированием и расчетами, а также сравнением с данными, полученными с помощью других диагностик плазмы.

Все представленные в диссертации результаты были получены автором или же при его непосредственном участии. При непосредственном участии автора проведена обработка данных, полученных при проведении калибровки нейтронных спектрометров ВС-501А, получены функции отклика спектрометров на моноэнергетическое нейтронное излучение и получена оценка эффективности регистрации нейтронов спектрометрами в зависимости от энергии; проведена обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2; проведена обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаке JET с применением метода анализа спектров гамма-излучения по интенсивностям

гамма-линий; получена экспериментальная оценка интенсивности реакции синтеза в $D-^3\text{He}$ плазме токамака JET из интенсивности гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ; получены угловые распределения вылета продуктов ядерных реакций между ионами ^3He и ^9Be для возбужденных состояний ядер ^{11}B и ^{11}C .

При проведении закрытого 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, воздержавшихся – 0.

На заседании 1 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Ильясовой М.В. 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