

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.07+539.1.074.5

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА МЯГКОЙ КОМПОНЕНТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0

© 2023 г. Н. Е. Ефимов^а, И. Г. Григорьева^а, А. А. Макаров^а, С. А. Крат^а,
А. С. Пришвицын^а, А. И. Алиева^а, А. С. Савёлов^а, Д. Л. Кирко^а, Г. Х. Салахутдинов^{а,*}

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 03.09.2022 г.

Принята к публикации 08.11.2022 г.

Представлена методика и результаты измерения спектров мягкого рентгеновского излучения плазмы на малом сферическом токамаке МИФИСТ-0. Измерения проводились методом “серых” фильтров с использованием многоканального спектрометра на основе термолуминесцентных детекторов фторида лития LiF (Mg, Ti). Данная методика позволила провести исследования рентгеновского излучения в энергетическом диапазоне квантов 0.2–15 кэВ. Получен спектр мягкой компоненты рентгеновского излучения.

DOI: 10.31857/S0032816223020155, EDN: GSSMBW

ВВЕДЕНИЕ

В рамках программы по освоению управляемого термоядерного синтеза широкое развитие получили тороидальные установки с магнитным удержанием плазмы — токамаки. Физическая картина явлений в высокотемпературной плазме этих установок еще далека от полного понимания и является предметом интенсивных исследований, которые невозможно проводить без создания диагностической аппаратуры, позволяющей получать надежную информацию о процессах в плазме. Поскольку основной задачей будущих токамаков-реакторов является нагрев плазмы до выхода на режим зажигания термоядерной реакции с последующим горением [1, 2], одним из важнейших параметров, характеризующих эффективность работы установки, является температура компонентов плазмы.

В настоящее время разработано и применяется множество различных методов определения электронной температуры плазмы. Так, одна из ранних диагностик основана на оценке температуры электронной компоненты плазмы по формуле Спитцера на основе измеренной электропроводности плазмы [3]. Данный способ привлекателен простотой технической реализации, однако интерпретация данных может быть осложнена при наличии примесей в плазме или пучков ускоренных электронов [4].

Другое бесконтактное средство диагностики температуры электронов в токамаках основано на изме-

рении мощности излучения в области электронно-циклотронной частоты, что позволяет определить температуру электронов для конкретного излучающего слоя плазмы в соответствии с формулой Рэля—Джинса. Недостатком методики является необходимость калибровки детекторов для абсолютных измерений, поэтому наибольшее применение она получила при измерениях относительных быстрых изменений профиля температуры [5].

Одним из технически наиболее сложных, но и наиболее интересных решений для определения температуры электронов можно назвать диагностику томсоновского рассеяния. В процессе рассеяния излучения диагностического лазера на электронах плазмы имеет место снижение интенсивности пучка лазера, определяемое величиной локальной электронной плотности, а также уширение спектра, обусловленное эффектом Доплера и связанное, таким образом, с температурой электронов [6, 7]. Данная диагностика хорошо зарекомендовала себя на многих крупных токамаках (ASDEX-U, EAST, JET) благодаря возможности измерений с относительно высоким пространственно-временным разрешением. Основными ее недостатками являются необходимость использования нескольких диагностических патрубков, а также крайне высокая стоимость оборудования (порядка десятков миллионов рублей), что ограничивает ее применение на бюджетных установках.

Еще один метод измерений основан на регистрации интенсивности рентгеновского излуче-

ния в непрерывном (в тормозном и рекомбинационном излучении) спектре, который зависит от распределения электронов плазмы по скоростям. Спектральная интенсивность тормозного и рекомбинационного излучения определяется экспоненциальным членом $\exp(-E/(kT_e))$, где E — энергия квантов излучения, k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов. Исходя из предположения, что распределение электронов в плазме является максвелловским с температурой T_e , по наклону прямой, аппроксимирующей измеренный спектр рентгеновского излучения, построенный в полулогарифмических координатах, можно определить электронную температуру плазмы. График представляет экспоненциальную зависимость $J(E) = \exp(E/(kT_e))$, определяющую максвелловское распределение измеренного спектра рентгеновского излучения плазмы с электронной температурой T_e . Таким образом, рентгеновское излучение плазмы является одним из основных источников получения информации о таких параметрах излучающей плазмы, как электронная температура и плотность плазмы [8, 9].

Измерение рентгеновских спектров импульсной плазмы токамаков имеет ряд сложностей, связанных с малой длительностью излучения, в течение которой возникает большое число квантов рентгеновского излучения. Излучение сопровождается сильной электромагнитной наводкой. Поскольку классическая спектрометрия, использующая режим счета отдельных квантов рентгеновского излучения, осложнена, то для получения информации о спектре излучения целесообразно применять различные ядерно-физические методы [10].

Одним из таких методов является метод фильтров поглощения [10, 11]. Он основан на спектральной селекции первичного непрерывного рентгеновского излучения. В данном методе измеряется кривая зависимости поглощенной энергии рентгеновского излучения в детекторах за фильтрами различной толщины от толщины фильтров. Затем по результатам измеренной в эксперименте кривой ослабления проводят восстановление спектров рентгеновского излучения различными математическими методами [10, 11].

В работе представлены результаты разработки спектрометра и его применения для измерения интегрального по времени энергетического распределения мягкой компоненты рентгеновского излучения из плазмы на сферическом токамаке МИФИСТ-0 посредством метода “серых” фильтров [10, 11]. Измерение сигнала осуществлялось с помощью термолюминесцентных детекторов (ТЛД) на основе фторидов лития LiF(Mg, Ti).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

МИФИСТ-0 — учебно-исследовательский токамак, создаваемый на базе кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ. Основными задачами проекта является подготовка высококвалифицированных кадров для работы в области управляемого термоядерного синтеза, исследования высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) методов преддйонизации плазмы в токамаках, а также отработка технологий контроля взаимодействия плазмы с обрращенными к ней элементами установки [12, 13].

Токамак имеет следующие основные параметры: большой радиус $R = 25$ см, малый радиус $a = 13$ см, аспектное отношение $A = 1.9$, тороидальное магнитное поле до 0.8 Тл, ток плазмы до 10 кА, время разряда до 10 мс. Таким образом, рассматриваемую установку можно отнести к категории малых сферических токамаков. Определение параметров плазмы осуществляется с использованием: массива электромагнитных диагностик (петли измерения напряжения на обходе, пояса Роговского для определения тока плазмы, зонды Мирнова для оценки положения плазменного шнура), H_α -диагностики, пассивной спектроскопии в видимой области (350–1000 нм), быстрой камеры (до 10^4 кадров/с), а также материаловедческого зонда для облучения образцов в плазме с последующим *in vacuo* анализом [13]. Нагрев плазмы можно осуществлять как омически, т.е. путем пропускания тока через плазму, так и за счет ввода ВЧ-излучения на частоте ионно-циклотронного резонанса. Для облегчения пробоя рабочего газа возможно формирование СВЧ- или ВЧ-предплазмы.

При исследовании спектрального распределения ультрамягкого и мягкого рентгеновского излучения методом поглотителей удобно применить набор из ТЛД на основе LiF (Mg, Ti) [14]. Принцип действия ТЛД следующий. Образующиеся под действием ионизирующего излучения носители заряда локализуются в центрах захвата и удерживаются в них длительное время, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии. При нагреве облученных детекторов до 240–300°C (в зависимости от материала детектора) наблюдается испускание квантов света (термолюминесценция), количество которых пропорционально поглощенной дозе ионизирующего излучения [10, 11].

Термолюминесцентные детекторы серийно изготавливаются в виде дисков диаметром 5 мм и высотой 0.9 мм. Они нечувствительны к электромагнитным наводкам, а также малочувствительны к ультрафиолетовому излучению и не имеют мертвого поверхностного слоя, что позволяет с их помощью регистрировать кванты с малой энергией. При этом их отклик линеен в широком дина-

мическом диапазоне поглощенной дозы излучения (от 20 мЗв до 10 Зв).

Для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 0,2–15 кэВ был разработан и создан малогабаритный четырехканальный спектрометр ($\varnothing 20$ мм, длина 20 мм) рентгеновского излучения на основе ТЛД LiF (Mg, Ti) [14]. Каналы спектрометра построены по схеме: фильтр поглощения плюс сборка из пяти детекторов LiF (Mg, Ti), расположенных один за другим. Три канала расположены за фильтрами поглощения различной толщины, изготовленными из различных материалов (тефлона, Be, Al, Cu), один канал полностью открыт. Основные преимущества такой сборки заключаются в высокой помехоустойчивости, компактности и низкой стоимости компонентов, что может обеспечить ее применение для исследования рентгеновского излучения на магнитоплазменных установках.

Созданный на основе ТЛД спектрометр был закреплен на вакуумном подвижном вводе материаловедческого зонда, установленного в патрубке откачки токамака (рис. 1). Сборка спектрометра была расположена на расстоянии ~30 см от области горения плазмы. Такое решение позволяло осуществлять монтаж и демонтаж спектрометра через шлюзовую камеру зонда без разгерметизации основной вакуумной камеры токамака, а также при необходимости варьировать расстояние между плазменным шнуром и детекторами.

В ходе измерения спектра рентгеновского излучения использовались различные методы регистрации излучения: метод “серых” фильтров (строилась кривая ослабления по показаниямборок в каждом канале, расположенных за фильтрами поглощения из различных материалов (алюминия, тефлона, бериллия) и различной толщины); метод поглощенной энергии (кривая ослабления строилась на основе сигналов ТЛД одной сборки, при этом ТЛД служат одновременно как детекторами, так и фильтрами поглощения рентгеновского излучения) [10, 11, 14].

Накопление сигнала для получения спектра рентгеновского излучения из плазмы токамака осуществлялось по нескольким импульсам, затем кристаллы извлекались для определения накопленной в них дозы. Показания с ТЛД считывались с помощью прибора ДВГ-02ТМ [11]. Калибровка спектрометра проводилась на специальном стенде, в состав которого входили импульсная рентгеновская трубка с набором эмиттеров из различных материалов (Al, Ti, Fe, Cu, Ge, In) и комплект радиоизотопных источников γ -излучения [10].

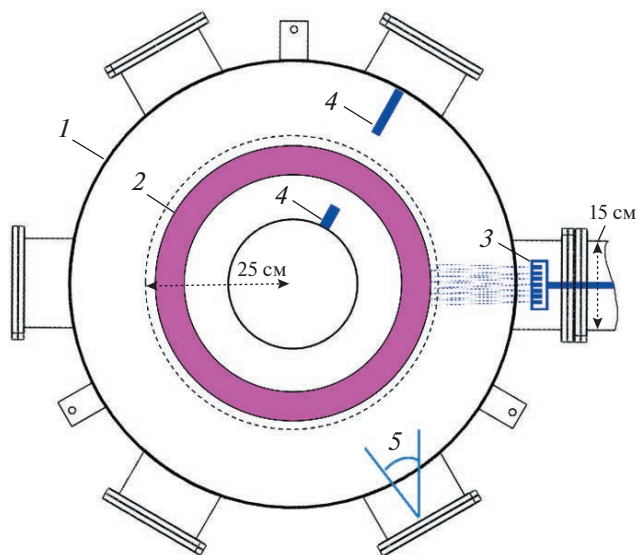


Рис. 1. Условная схема исследования рентгеновского излучения плазмы на токамаке МИФИСТ-0. 1 – вакуумная камера токамака с шестью диагностическими портами; 2 – плазменный шнур; 3 – рентгеновский спектрометр с фильтрами поглощения и ТЛД, закрепленный на подвижном вводе материаловедческого зонда; 4 – стальной лимитер с интегрированными электромагнитными диагностиками; 5 – угол обзора быстрой камеры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектр измерялся по серии из 19 импульсов на токамаке в омическом режиме нагрева плазмы. Эксперимент проводился при рабочем газе протии, давление которого во время импульса подерживалось на уровне $2\text{--}10^{-3}$ мбар, предельное остаточное давление в разрядной камере установки составляло порядка $5\text{--}10^{-7}$ мбар. Для облегчения пробы осуществлялась предьонизация путем ввода СВЧ-излучения мощностью до 3 кВт на частоте 2,45 ГГц, что распространено на современных малых токамаках [15]. Напряжения зарядки конденсаторных батарей питания тороидальных магнитных катушек и центрального соленоида были фиксированы и составляли соответственно 1100 и 1600 В. Коммутация батарей на нагрузку велась с относительной задержкой 900 мкс. Таким образом, основные начальные параметры установки сохранялись в течение серии импульсов для получения схожей по температуре электронов плазмы.

Типичные осциллограммы разряда в ходе набора сигнала на рентгеновском спектрометре представлены на рис. 2. Запуск импульса осуществляется включением СВЧ-магнетрона приблизительно за 5 с до разрядки конденсаторных батарей для выхода на номинальную мощность генерации СВЧ-излучения, а также напуска рабочего газа в объем камеры. Затем происходит подача синхроимпульса на измерительную аппаратуру, что на представленных осциллограммах соот-

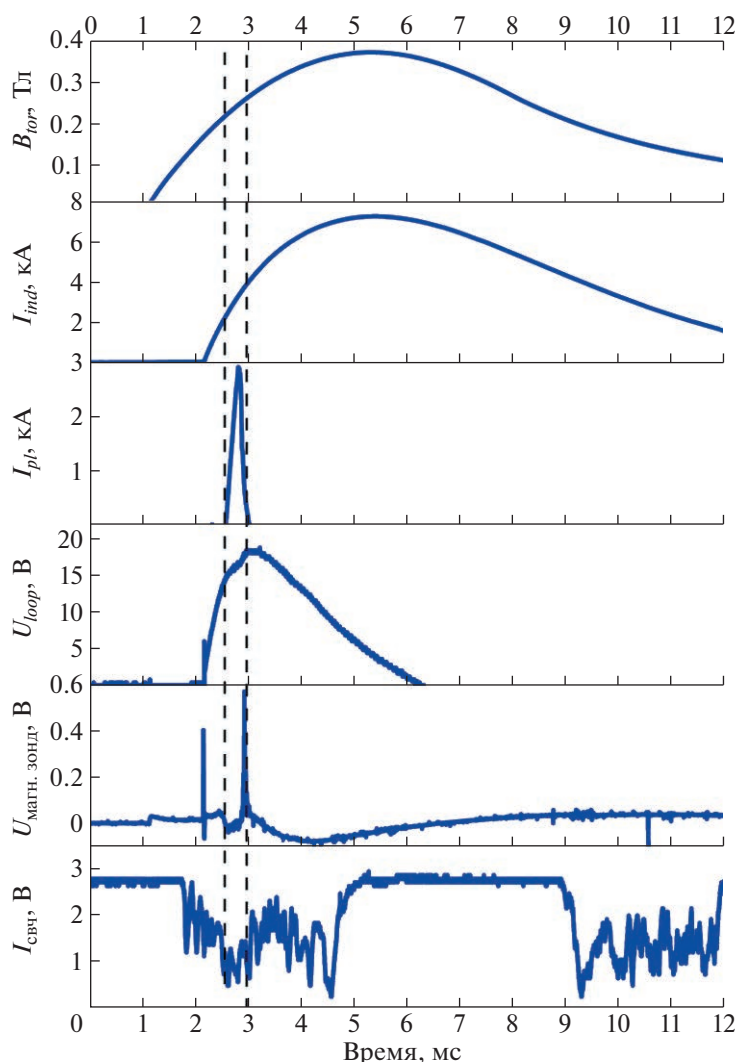


Рис. 2. Типичные осциллограммы разрядов на токамаке МИФИСТ-0 при измерении спектра рентгеновского излучения: $I_{свч}$ — интенсивность СВЧ-излучения из камеры; $U_{магн. зонд}$ — напряжение на катушке Мирнова в экваториальной области на внутренней стенке токамака; U_{loop} — напряжение на обходе камеры; I_{pl} — ток плазмы; I_{ind} — ток в цепи центрального соленоида; B_{tor} — величина тороидального магнитного поля.

ветствует нулевому моменту времени. Через 1 мс осуществляется подача управляющего импульса на тиристор системы коммутации батарей тороидальных катушек, еще через 0.9 мс запускается разряд батареи центрального соленоида, создающего напряжение на обходе разрядной камеры.

На осциллограмме тока плазмы видно, что плазменный шнур начинает формироваться через 0.4 мс после коммутации батарей индуктора, когда напряжение на обходе составляет 14.4 В. На осциллограмме напряжения на обходе также можно заметить область возникновения тока по тору по просадке сигнала. Еще через 0.43 мс после появления тока плазмы имеет место его срыв, что видно по скачку напряжения на обходе. Это можно объяснить сносом шнура на стенку камеры, что подтверждается появлением резкого импуль-

са, регистрируемого катушкой Мирнова, закрепленной на внутренней стенке камеры, внутри лимитера в экваториальной плоскости, в момент времени 2.96 мс от подачи синхроимпульса. Этот срыв также можно видеть на кадрах быстрой камеры (рис. 3) по яркой вспышке на внутренней части D-образного лимитера. Преждевременное прекращение разряда может быть связано с наличием паразитных компонент магнитного поля в токамаке [16].

Таким образом, в рамках данного эксперимента были получены следующие характерные параметры импульса: магнитное поле во время разряда $B_{tor} = 245$ мТл, ток плазмы $I_{pl} = 2.8$ кА, пиковая мощность нагрева 44.8 кВт, время разрядки около 0.4 мс.

По окончании облучения ТЛД была измерена величина накопленной в них дозы для каждого

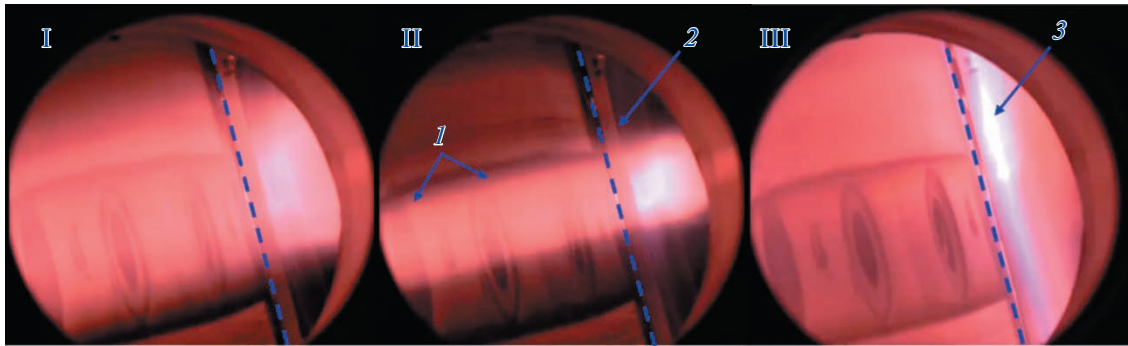


Рис. 3. Кадры I–III с быстрой камеры во время пробоя: 1 – плазменный шнур; 2 – D-образный лимитер; 3 – срыв шнура на лимитер. Штриховой линией показана граница стенки внутреннего цилиндра.

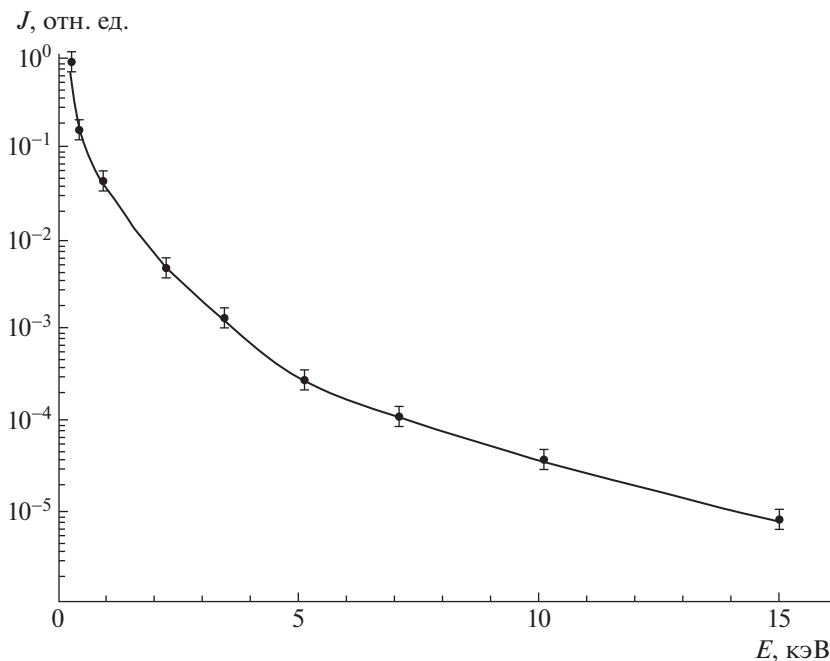


Рис. 4. Усредненный по 19-ти импульсам спектр рентгеновского излучения из плазмы, полученный на токамаке МИФИСТ-0 методом “серых” фильтров.

энергетического канала и построены кривые ослабления. По результатам измеренной в эксперименте кривой ослабления проведено восстановление спектров рентгеновского излучения из плазмы токамака МИФИСТ-0 (рис. 4) с использованием различных математических методов [10, 11, 14, 17]. Детальный процесс восстановления спектра приведен в работе [17].

Спектр рентгеновского излучения, зарегистрированный спектрометром, представляет собой сумму спектров, излучаемых различными участками плазменного шнура, имеющими разную электронную температуру [18].

По полученным экспериментальным данным, спектр мягкой компоненты рентгеновского излучения имеет вид изогнутой линии на всем измеренном интервале от 0.2 до 15 кэВ. Можно пред-

положить, что плазма в токамаке находится в продольном электрическом поле $E_{\parallel} = U_L / (2\pi R)$ (где R – большой радиус тора, U_L – напряжение на обходе тора). Для приведенных разрядов $E_{\parallel}$ составляет около 10 В/м. В условиях, когда $E_{\parallel} > E_{cr}$, где E_{cr} – поле Драйзера, вся плазма находится в режиме непрерывного ускорения и не успевает достигнуть максвелловского распределения по скоростям электронов, т.е. спектр мягкого рентгеновского излучения не будет иметь линейного участка. Скорее всего, этот режим ускорения и реализуется в приведенных разрядах [19–22].

Полученный спектр позволяет оценить оптимальные толщины и материал фильтров при проектировании для токамака МИФИСТ-0 быстрого многоканального спектрометра, работающего на

основе методов фильтров поглощения и позволяющего осуществлять измерения в течение импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диагностика рентгеновского излучения из плазмы методом “серых” фильтров при прохождении излучения через сборку ТЛД получила применение на лабораторных установках различных типов [10, 11, 14]. В данной работе впервые она была применена на токамаке для определения энергетического распределения мягкой компоненты рентгеновского излучения из плазмы в омическом режиме нагрева в диапазоне квантов 0.2–15 кэВ. Полученные данные могут быть полезны для анализа и оптимизации излучательных характеристик плазмы на различных видах установок.

Представленная конструкция работающего на основе метода “серых” фильтров рентгеновского спектрометра с ТЛД оказалась привлекательной своей компактностью, а также высокой помехозащищенностью по сравнению со спектрометрами на основе твердотельных детекторов и фотоэлектронных умножителей, однако требует значительного времени для набора и считывания дозы рентгеновского излучения. Подобный спектрометр, будучи простым в изготовлении и эксплуатации, может быть эффективным для получения первичных оценок диапазона и характерной формы энергетического спектра рентгеновского излучения, полезных при проектировании более сложных быстрых диагностических систем.

Так как представленный спектрометр не позволяет проводить измерения в течение импульса, на основе полученных с его помощью данных для токамака МИФИСТ-0 будет разработан четырехканальный спектрометр на основе алмазных детекторов с наносекундным временным разрешением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана программой НИЯУ МИФИ “Приоритет 2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luce T.C. // *Physics of Plasmas*. 2011. V. 18. № 3. P. 030501. <https://doi.org/10.1063/1.3551571>
2. Shimomura Y., Murakami Y., Polevoi A.R., Barabaschi P., Mukhovatov V., Shimada M. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2001. V. 43. № 12A. P. A385. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/43/12A/329>
3. Hussain S., Sadiq M., Shah S.I.W. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. V. 591. № 1. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/591/1/012009>
4. Стрелков В.С., Лысенко С.Е. Основы техники термоядерного эксперимента. М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
5. Zhao H., Zhou T., Liu Y., Ti A., Ling B., Feng X., Liu A.D., Zhou C., Hu L. // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 149. P. 111336. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111336>
6. Peacock N.J., Robinson D.C., Forrest M.J., Wilcock P.D., Sannikov V.V. // *Nature*. 1969. V. 224. № 5218. P. 488. <https://doi.org/10.1038/224488a0>
7. Han X., Hu A., Li D., Xiao S., Zang Q., Zhao J., Hsieh C., Gong X., Hu L., Xu G. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2018. V. 46. № 2. P. 406. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2791618>
8. Bitter M., Hsuan H., Hill K.W., Zarnstorff M. // *Physica Scripta T*. 1993. V. 47. P. 87. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/1993/T47/014>
9. Мецержаков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. // *ПТЭ*. 2018. № 6. P. 84. <https://doi.org/10.1134/S0032816218050233>
10. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // *ПТЭ*. 2015. № 2. P. 89. <https://doi.org/10.7868/S0032816215020044>
11. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // *ПТЭ*. 2015. № 1. С. 100. <https://doi.org/10.7868/S0032816215010279>
12. Kirneva N.A., Vorobjev G.M., Ganin S.A., Drozd A.S., Kudashev I.S., Kulagin V.V., Kurnae V.A. // *Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion*. 2020. V. 43. № 3. P. 90. <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2020-43-3-90-100>
13. Курнаев В.А., Николаева В.Е., Крат С.А., Вовченко Е.Д., Казиев А.В., Пришвицын А.С., Воробьев Г.М., Степанова Т.В., Гвоздевская Д.С. // *Известия вузов. Физика*. 2021. Т. 64. № 1(757). С. 118. <https://doi.org/10.17223/00213411/64/1/11814>
14. Grigoryeva I.G., Khil'ko M.V., Salakhutdinov G.K. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1390. № 1. P. 2. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1390/1/012105>
15. Khan R., Nazir M., Ali A., Hussain S., Vorobyev G.M. // *Fusion Engineering and Design*. 2018. V. 126. P. 10. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.11.002>
16. Krat S.A., Pryshvitsyn A.S., Alieva A.I., Efimov N.E., Vinitskiy E.A., Bulgadaryan D.G., Vorobyov G.M., Kurnae V.A. // *Phys. Atom. Nuclei*. 2021. V. 84. № 12. P. 1995. <https://doi.org/10.1134/S1063778821120024>
17. Григорьева И.Г., Макаров А.А., Корф А.Н., Салахутдинов Г.Х. // *ПТЭ*. 2022. № 4. С. 90. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040115>
18. Диагностика термоядерной плазмы / Под ред. С.Ю. Лукьянова. М.: Энергоатомиздат, 1985.
19. Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. М.: Наука, 1993.
20. Бобровский Г.А., Разумова К.А., Санников В.В. // *Физика плазмы*. 1976. Т. 2. Вып. 6. С. 897.
21. Дрейсер Г. // *Труды второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Доклады иностранных ученых*. 1958. Т. 1. С. 170.
22. Мецержаков А.И., Вафин И.Ю., Гришина И.А. // *ПТЭ*. 2020. № 5. С. 82. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050195>