

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

На правах рукописи



Горбунов Алексей Викторович

**ЛАЗЕРНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
ВОДОРОДНОЙ И ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ**

Специальность 1.3.9. – Физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021 г.

Работа выполнена в отделе ИТЭР Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий (ККТЭИПТ) Федерального государственного бюджетного учреждения Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: **Вуколов Константин Юрьевич**
доктор физико-математических наук,
заместитель начальника отдела ИТЭР Курчатовского
комплекса термоядерной энергетики и плазменных
технологий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Астапенко Валерий Александрович**
доктор физико-математических наук,
профессор Московского физико-технического
института, г. Долгопрудный;

Савёлов Александр Сергеевич
доктор физико-математических наук,
профессор Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Москва.

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований, г. Москва г. Троицк.

Защита состоится 08 декабря 2021 г., начало в 15:00, на заседании
диссертационного совета 02.1.003.02 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по
адресу: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский
институт» и на сайте: <http://www.nrcki.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 02.1.003.02
кандидат физико-математических наук

Ю.В. Капустин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Исследование физических процессов в плазменных установках требует создания новых и модификации существующих методов измерения параметров плазмы. Помимо классических пассивных диагностик, широкое распространения в токамаках получили активные методы измерений, основанные на внешнем воздействии на плазму электромагнитным излучением или потоком заряженных или нейтральных частиц. Главное преимущество активных методов диагностики заключается в локальности измерений, что особенно актуально для установок с диверторной конфигурацией магнитного поля. Помимо локальности, активные методы измерений обычно обладают большей чувствительностью и хорошо подходят для количественных измерений, в то время как пассивные хордовые измерения – для качественного анализа с высоким временным разрешением.

Диагностика лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) относится к активным спектроскопическим методам измерения, используется для исследования атомов, ионов и молекул в пристеночной и диверторной плазме токамаков [1]. ЛИФ позволяет проводить локальные измерения концентрации и температуры атомов и ионов, скорости движения частиц, параметров электронной компоненты плазмы.

ЛИФ будет использоваться на сооружаемом международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР для измерения концентрации гелия – золы термоядерного синтеза дейтерия и трития, и ионной температуры в диверторной плазме [2]. Тот факт, что ЛИФ – локальная диагностика, делает её особенно актуальной в силу больших ожидаемых градиентов параметров плазмы вдоль и поперёк магнитного поля. Модифицированный метод ЛИФ (диагностика лазерного индуцированного тушения – ЛИТ) будет использоваться на токамаке Т-15МД для измерения профилей концентрации рабочего газа в диверторной плазме. Измерения позволят проводить эксперименты по исследованию режимов работы дивертора с полным и частичным отрывом плазмы от стенки.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки диагностики на основе лазерной индуцированной флуоресценции для измерения параметров диверторной плазмы реактора ИТЭР и токамака T-15МД.

Степень разработанности темы исследования

Впервые в плазме термоядерной установки – токамака ЛИФ диагностику применили в 1977 году для измерения концентрации атомов водорода на ФТ-1 в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе [3]. Эта экспериментальная работа положила начало использованию лазерной флуоресценции для диагностики рабочего газа (водорода и дейтерия) в термоядерных установках: токамаках TEXTOR, ASDEX, HIT-SI3 и магнитных ловушках [4; 5].

Кроме измерения концентрации рабочего газа, ЛИФ метод использовался для диагностики примесей. В первую очередь, для исследования процесса эрозии поверхности первой стенки камеры, диверторных пластин и лимитера. Одни из первых работ были посвящены измерениям скорости распыления железа [6]. Кроме железа, диагностика использовалась для исследования поступления в основную плазму со стенки углерода [7], молибдена [8], титана [9] и других примесей. Помимо рабочего газа и материала стенки ЛИФ диагностика также применялась для измерения скорости и концентрации атомарного гелия в ASDEX-Upgrade.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка и апробация методов измерения параметров высокотемпературной плазмы на основе эффектов лазерной индуцированной флуоресценции и лазерного индуцированного тушения.

Для выполнения работы были определены следующие задачи:

1. Разработать столкновительно-излучательные модели атома и водородоподобного иона гелия, учитывающие воздействие лазерного излучения, для моделирования эффектов флуоресценции и лазерного индуцированного тушения.

2. Исследовать с помощью разработанных математических моделей эффект насыщения сигнала флуоресценции и влияние временной и спектральной форм лазерных импульсов на сигналы флуоресценции и интерпретацию результатов измерения.
3. Разработать метод диагностики диверторной плазмы ИТЭР для измерения концентрации атомов гелия и температуры ионов. Рассчитать ошибки измерений для различных сценариев работы ИТЭР с учётом геометрии сбора света, фоновой засветки из плазмы и характеристик предполагаемого диагностического оборудования.
4. Провести эксперименты по лазерной флуоресценции и лазерному индуцированному тушению на стационарном плазменном источнике для проверки математических моделей и отработки метода измерений.
5. Провести эксперименты в плазме токамака Глобус-М: измерить концентрацию электронов на основе флуоресценции атома гелия, исследовать лазерное индуцированное тушения линии D_α атома дейтерия. Выполнить апробацию метода измерений на основе лазерной флуоресценции (индуцированного тушения) в условиях плазмы токамака.

Научная новизна

1. Проведены измерения электронной концентрации на основе анализа временных форм сигналов флуоресценции атома гелия.
2. Предложен и исследован метод измерения параметров плазмы токамака, основанный на принципе лазерного индуцированного тушения.
3. В плазме токамака Глобус-М проведены эксперименты по лазерной флуоресценции и лазерному индуцированному тушению.
4. Разработан метод локальных измерений концентрации атомарного гелия в диверторной плазме ИТЭР на основе лазерной индуцированной флуоресценции.

5. Предложен и разработан метод измерения ионной температуры в диверторе ИТЭР на основе анализа спектральных контуров линии поглощения, полученных с помощью лазерного индуцированного тушения линии P_{α} водородоподобного иона гелия.

Практическая и научная значимость работы

Результаты численного моделирования и проведённых экспериментов использованы при проектировании диагностического комплекса лазерной индуцированной флуоресценции диверторной плазмы ИТЭР. Метод лазерного индуцированного тушения будет применён на ИТЭР для измерения температуры ионов во внешней ноге дивертора. Метод измерения концентрации электронов по временной форме сигналов флуоресценции рассматривается для *in situ* калибровки диагностики диверторного томсоновского рассеяния ИТЭР.

Разработанный метод лазерного индуцированного тушения планируется использовать для диагностики водорода в пристеночной и диверторной плазме токамаков Глобус-М2 и Т-15МД.

Методология и методы исследования

1. Метод **лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ)** основан на лазерном возбуждении оптически-разрешённого перехода между возбуждёнными или основным и возбуждённым состояниями атома / иона и регистрацией отклика из плазмы – флуоресценции на той же или другой спектральной линии. В ЛИФ диагностике используются три вида спектроскопических схем измерений (набор линий лазерной накачки и наблюдения флуоресценции):

- резонансная схема, когда лазерное возбуждение и наблюдение флуоресценции идёт на одной и той же линии;
- трёхуровневая схема с общим верхним уровнем;
- многоуровневые схемы, в которых линии возбуждения и наблюдения флуоресценции не имеют общих уровней.

Резонансная схема в условиях измерения в токамаках сложно реализуема из-за паразитного лазерного излучения, рассеянного на элементах конструкции установок. А так как лазерное излучение и флуоресценция спектрально совпадают, с паразитной засветкой бороться крайне сложно. Преимущество трёхуровневой спектроскопической схемы с общим верхним уровнем состоит в том, что линии лазерного возбуждения и флуоресценции находятся в разных спектральных диапазонах. Сдвиг по длинам волн позволяет использовать спектральные фильтры для борьбы с паразитной лазерной засветкой. Многоуровневые спектроскопические схемы принципиально не отличаются от трёхуровневых с общим верхним уровнем, за тем исключением, что населённости верхних уровней накачки и флуоресценции связаны за счёт столкновений с электронами.

2. Метод **лазерного индуцированного тушения** (ЛИТ) основан на наблюдении частичного тушения свечения спектральной линии атома / иона за счёт лазерного возбуждения оптически-разрешённого перехода на более возбуждённые состояния. Метод в целом схож с ЛИФ за исключением наблюдения не увеличения светимости линии (флуоресценции), а уменьшения светимости (тушения). В ЛИТ используются трёхуровневые спектроскопические схемы с общим нижним уровнем.

Метод ЛИТ был разработан для диагностики водорода и водородоподобных ионов – элементов с вырожденной по орбитальному квантовому числу структурой возбуждённых состояний. За счёт разной длины волны лазерной накачки и наблюдения тушения удаётся избавиться от паразитной лазерной засветки. В некоторых случаях одновременно с тушением можно также наблюдать флуоресценцию на одной из линий атома / иона.

Положения, выносимые на защиту

1. Возможность использования метода лазерного индуцированного тушения для диагностики атомов водорода и водородоподобных ионов в плазме.
2. Анализ временной формы сигналов флуоресценции атома гелия позволяет определить концентрацию электронов в плазме.

3. Расчетное обоснование диагностики лазерной индуцированной флуоресценции и лазерного индуцированного тушения для измерения концентрации атомов гелия и ионной температуры в условиях диверторной плазмы ИТЭР.
4. Экспериментальное подтверждение метода лазерного индуцированного тушения на токамаке Глобус-М.

Степень достоверности результатов

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Достоверность обеспечена многократным повторением экспериментов, а также сопоставлением результатов измерений, проведённых различными диагностическими методами, и сопоставлением с расчётами в разработанных численных кодах.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие во всех экспериментальных и расчётных работах, результаты которых лежат в основе диссертации. При участии автора разработан и создан лазерный диагностический комплекс на токамаке Глобус-М. Автором предложен новый метод диагностики водорода и водородоподобных ионов, основанный на лазерном индуцированном тушении, разработан и проверен метод измерения концентрации электронов по временной форме сигналов флуоресценции. Автор принимал активное участие в международном сотрудничестве по разработке ЛИФ диагностики для ИТЭР.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах НИЦ "Курчатовский институт", Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2010, 2011, 2012, 2015, 2016, 2018, 2020 гг.), всероссийских конференциях по диагностике высокотемпературной плазмы (2011, 2015, 2017, 2019 гг.), Европейской конференции по физике плазмы (Франция, Страсбург, 2011 г.), международных симпозиумах по термоядерным технологиям (Чехия, Прага, 2016, Италия, Сицилия, 2018 гг.), конференции МАГАТЭ по термоядерному синтезу (Индия, 2018 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК. Пять статей проиндексированы в базе данных Web of Science и Scopus.

1. **Горбунов А.В.**, Молодцов Н.А., Шуваев Д.А., Щеглов Д.А. Определение оптимальной спектральной плотности мощности перестраиваемого источника зондирующего излучения ЛИФ-диагностики диверторной плазмы ИТЭР // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 68-72
2. **Gorbunov A.V.**, Shuvaev D.A., Moskalenko I.V. Determination of the electron density in the tokamak edge plasma from the time evolution of a laser-induced fluorescence signal from atomic helium // Plasma Physics Reports, 2012, vol. 38(7), p. 574-578
3. **Gorbunov A.V.**, Mukhin E.E., Berik E.B., Vukolov K.Yu., et al. Laser-induced fluorescence for ITER divertor plasma // Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 123, p. 695-698
4. **Gorbunov A.V.**, Mukhin E.E., Berik E.B., Melkumov M.A., et al. Laser-induced fluorescence of helium ions in ITER divertor // Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, p. 2703-2706
5. Munoz Burgos J.M., Griener M., Loreau J., **Gorbunov A.**, et al. Evaluation of emission contributions from charge-exchange between the excited states of deuterium with He⁺ during diagnostic of thermal helium gas beam injection and laser-induced fluorescence // Physics of Plasmas, 2019, vol. 26(6), 063301
6. Mukhin E.E., Kurskiev G.S., **Gorbunov A.V.**, et al. Integration of Thomson scattering and laser-induced fluorescence in ITER divertor // Nuclear Fusion, 2019, vol. 59(8), 086052

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 135 страницах, содержит 73 рисунка, 3 таблицы, 39 формул и список цитируемой литературы из 86 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертации, проводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по лазерной индуцированной флуоресценции. Определяется цель и формулируются задачи исследования. Показана научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена математическому моделированию эффектов лазерной индуцированной флуоресценции и лазерного индуцированного тушения. Моделирование основано на использовании столкновительно-излучательных моделей (СИМ), описывающих динамику изменения населённостей возбуждённых уровней и, как следствие, изменения светимости линий, в зависимости от параметров окружающей плазмы (n_e , T_e , n_i , T_i и др.) и характеристик лазерного излучения. Разработанные СИМ атома и водородоподобного иона гелия использовались для расчёта ожидаемых сигналов флуоресценции и тушения при заданных условиях в плазме (прямая задача), а также для расчёта интересующих параметров плазмы по сигналам флуоресценции (обратная задача). СИМ корректно описывают такие эффекты, как насыщение сигналов флуоресценции (тушения), влияние временной и спектральной формы лазерных импульсов и др.

Эффект насыщения ограничивает максимально-достижимую амплитуду сигналов флуоресценции (тушения) и играет определяющую роль при выборе мощности лазерного источника для проведения экспериментов. Порог насыщения зависит от начальных населённостей на уровнях, между которыми идёт накачка, от сечения поглощения фотонов накачки и от скорости переноса населённостей между возбуждёнными уровнями (время релаксации). Так как населённости на уровнях и время релаксации в пристеночной и диверторной плазме токамака в основном определяются соударениями со свободными электронами (помимо спонтанного радиационного распада), порог насыщения зависит от концентрации n_e и температуры T_e электронов.

В ЛИФ (ЛИТ) экспериментах используются два типа лазеров: импульсные с длительностью импульсов сопоставимой с временем релаксации возбуждённых состояниях (≈ 10 нс), и модулированные во времени с длинными импульсами (> 1 мкс). Пиковая форма наносекундного лазерного импульса приводит к размытию порога насыщения. Эффект наблюдается в эксперименте, когда спектральная мощность накачки превышает порог насыщения для прямоугольной формы импульса, зависимость сигнала от полной энергии лазерного импульса остаётся (рисунок 1 (а)). Спектральную форму лазерного излучения необходимо учитывать в экспериментах по сканированию линии поглощения. За счёт нелинейной зависимости сигналов от мощности накачки, спектральные крылья приводят к дополнительному уширению измеряемого контура линии. Результаты моделирования в СИМ эксперимента по сканированию контура линии HeI 587,6 нм при разной мощности лазерного излучения показаны на рисунке 1 (б).

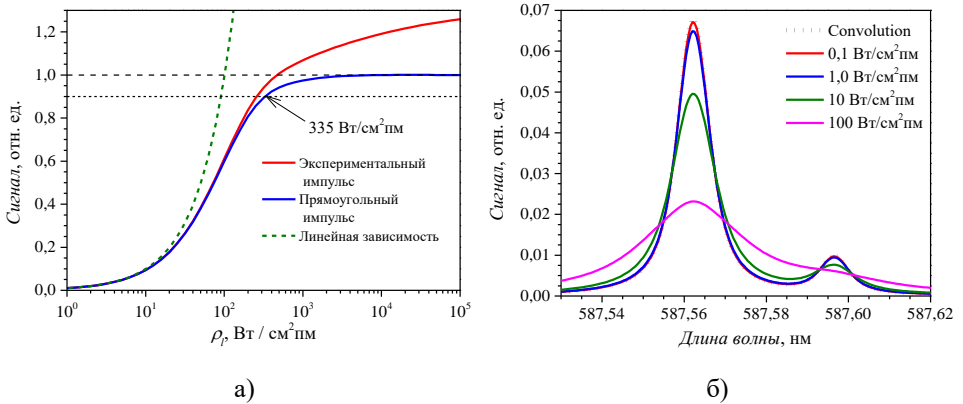


Рисунок 1 – Интегральный сигнал флуоресценции в зависимости от мощности лазерного импульса (а) и рассчитанный в СИМ экспериментальный спектральный контур линии HeI 587,6 нм для разной спектральной мощности лазерной накачки

В экспериментах для уменьшения нелинейного эффекта на сигналы от спектральных крыльев стараются работать с низкими спектральными мощностями лазерного излучения, вдали от порога насыщения.

Вторая глава содержит физическое обоснование ЛИФ для диагностики диверторной плазмы ИТЭРа. ЛИФ будет использоваться для измерений концентрации гелия (n_{HeI}) и ионной температуры (T_i) во внешней ноге дивертора. Основная задача диагностики заключается в измерении распределения n_{HeI} , характеризующего эффективность удаления He – продукта реакции синтеза D и T. Вместе с данными системы вакуумной откачки и показаниями газовых анализаторов, ЛИФ позволит поддерживать процесс термоядерного горения, без превышения критической концентрации гелия в основном объеме плазмы. Данные по распределению T_i используются в расчётах баланса давления в плазме.

ЛИФ на ИТЭР совмещена с диагностикой диверторного томсоновского рассеяния (ДТР). Обе диагностики используют одни и те же оптические элементы наблюдения сигналов и близкорасположенные элементы ввода лазерного излучения в плазму. Совмещение ЛИФ и ДТР возможно благодаря разным спектральным диапазонам работы. Сбор флуоресцентного излучения будет проводиться по 24 хордам через щель между диверторными кассетами (рисунок 2). Для предотвращения запыления продуктами эрозии, первое зеркало системы сбора и лазерные зеркала защищены тонким кварцевым окном.

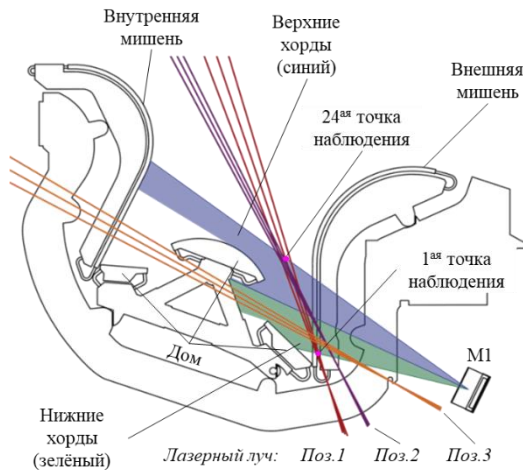


Рисунок 2 – Геометрическая схема ЛИФ диагностики на ИТЭР

Регистрация сигналов ЛИФ будет проводиться осциллографическим способом с помощью кремниевых лавинных фотодиодов, адаптированных для видимого диапазона спектра. 1 ГГц АЦП планируется для оцифровки временной развёртки фонового и полезного сигналов.

Твердотельный импульсный лазер на основе оптического параметрического генератора (ОПГ), также как и импульсный лазер на красителях подходят для задачи измерения концентрации гелия. Обе системы генерируют излучение на необходимых длинах волн и имеют схожие параметры импульсов (энергию $E_l > 1$ мДж, длительность $\tau \approx 10$ нс, спектральную ширину $\Delta\lambda_l = 500-1500$ нм). Частота повторения зависит от лазера накачки и может достигать 1 кГц при накачке III гармоникой Nd:YAG. Для измерения ионной температуры (сканирования спектральной линии поглощения) предлагается использовать модулированный во времени волоконный иттербиевый лазер с генерацией на 1012 нм, пиковой мощностью $P_l = 100$ Вт и спектральной шириной линии $\Delta\lambda_l = 50-100$ нм.

Физическое обоснование ЛИФ для ИТЭР основано на расчёте ожидаемых ошибок измерений n_{HeI} и T_i с учётом геометрии зондирования, параметров оптической системы сбора света, характеристик выбранных лазерных источников и расчётных 2D-распределений параметров плазмы, полученных из кода SOLPS для двух типичных сценариев ИТЭР: DT-сценарий #2505 ($Q = 10$, $P_{SOL} = 100$ МВт) и He-сценарий #2327 как репрезентативный для неядерной стадии с $P_{SOL} = 60$ МВт.

Ожидаемые ошибки измерения n_{HeI} были получены в приближении, что основным источником шума является фотонный дробовый шум, который в свою очередь зависит от полезных сигналов флуоресценции и фоновых сигналов от излучения в спектральных линиях наблюдения, теплового излучения от нагретых диверторных пластин и тормозного излучения плазмы. Сигналы флуоресценции, а также интенсивности фонового излучения в линиях гелия, рассчитаны в СИМ HeI; тепловое излучение получено для сценария с $Q = 10$; тормозное излучение из плазмы рассчитано как интеграл вдоль хорд наблюдения для обоих сценариев.

Ожидаемые ошибки измерения n_{HeI} представлены на рисунке 3. Расчёты показывают, что измерение концентрации гелия можно будет проводить как в He, так и в DT сценариях с относительными ошибками $< 20\%$ в нижних точках, где концентрация атомов достаточно высокая. По мере удаления от поверхности диверторных пластин, концентрация атомов быстро падает, делая невозможным проведение измерений n_{HeI} одновременно с требуемой точностью ($\Delta n_{HeI} < 20\%$) и временным разрешением (20 мс).

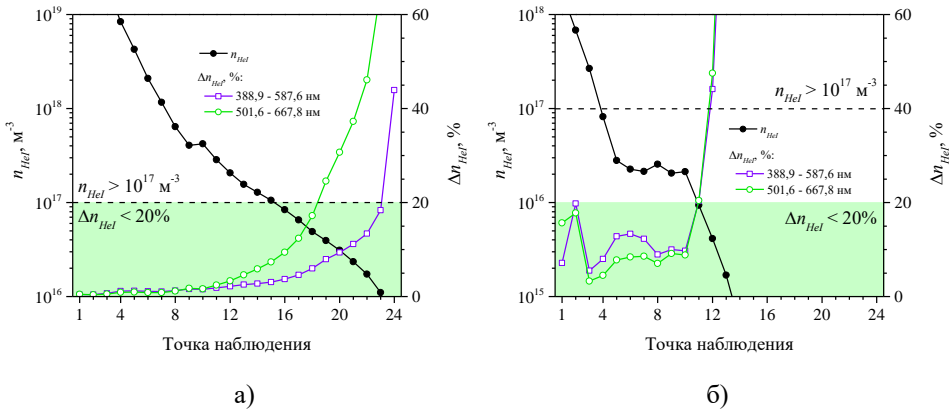


Рисунок 3 – Распределения n_{HeI} вдоль хорды зондирования плазмы (по левым осям) и расчётные ошибки измерения Δn_{HeI} (по правым осям) для двух сценариев ИТЭР: а) гелиевый и б) DT. Ошибки рассчитаны для двух спектроскопических схем: триплетная (возбуждение 388,9 нм и регистрация 587,6 нм) и синглетная (возбуждение 501,6 нм, регистрация 667,8 нм)

Измерения T_i могут проводиться на ионах основной примеси в DT фазе работы реактора – гелия, либо на ионах основного материала первой стенки камеры – бериллия. Если для уменьшения локальных тепловых нагрузок на диверторные пластины в дивертор будет дополнительно инжектироваться азот или неон, измерения можно будет проводить также на ионах дополнительно-инжектируемых примесей. Так как концентрация ионов Be, на основании данных SOLPS, на

несколько порядков меньше концентрации ионов гелия, а инжекция азота / неона может не осуществляться, температуру ионов предлагается измерять на HeII.

Лазерная диагностика HeII осложняется малым временем жизни возбуждённых уровней и высокой скоростью релаксации населённостей после окончания лазерного импульса. Вдобавок, вырождение по орбитальному квантовому числу приводит к невозможности реализации измерений с отстройкой длин волн лазерного и флуоресцентного излучения. Резонансная спектроскопическая схема (возбуждение и регистрация на одной и той же линии) вряд ли реализуема, так как ожидается высокий уровень паразитной засветки от лазерного излучения. Поэтому, для HeII предлагается новая спектроскопическая схема, основанная на частичном уменьшении светимости наиболее яркой линии видимого диапазона 468,6 нм (переход $n = 4 \rightarrow 3$) за счёт лазерной накачки на переходе $n = 4 \rightarrow 5$ (1012,3 нм) (рисунок 4).

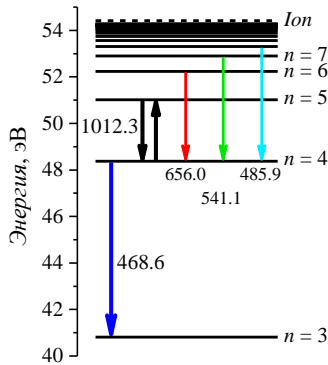


Рисунок 4 – Спектроскопическая схема диагностики ионов гелия HeII, основанная на частичном тушении линии 468,6 нм: лазерное возбуждение на переходе $n = 4 \rightarrow 5$ (1012,3 нм), регистрация сигналов на переходе $n = 4 \rightarrow 3$ (468,6 нм)

Расчёты ожидаемых ошибок измерения T_i выполнялись с помощью численной модели ЛИФ диагностики. Модель состоит из нескольких модулей, включая СИМ HeII и код для расчёта спектрального контура линии HeII 1012,3 нм. Модель позволяет синтезировать экспериментальные сигналы тушения, а на основе

них – спектральные контуры линий, с учётом геометрии сбора света в диверторе, параметров оптической системы сбора света, фотонного шума, характеристик фотодетектора и используемой электроники (усилитель, АЦП). В качестве входных данных в модели используются распределения параметров плазмы по сечению токамака из SOLPS и характеристики предполагаемого лазерного источника.

Синтетические экспериментальные спектральные профили использовались для определения по ним ионной температуры (обратная задача). При этом значения плотности и температуры электронов считались известными (от ДТР). Для каждой точки численный эксперимент повторялся 1000 раз, среднеквадратичное отклонение определённой ионной температуры (T_{meas}) от моделируемой (T_{init}) соответствует относительной ошибке измерения температуры. Результаты расчёта ожидаемых ошибок измерения T_i показаны на рисунке 5.

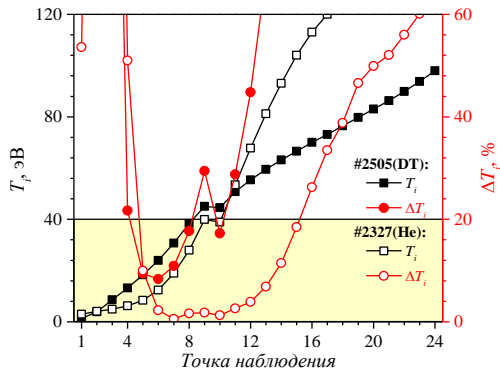
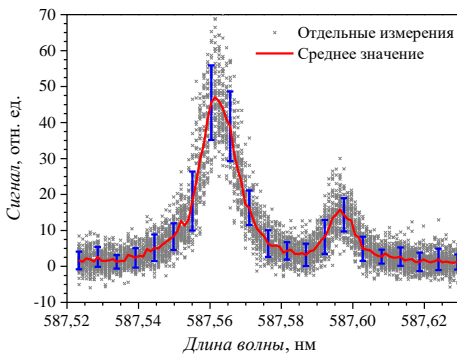


Рисунок 5 – Расчётные ошибки измерения ионной температуры ΔT_i и распределение T_i вдоль лазерного луча для сценариев #2505(DT) и #2327(He)

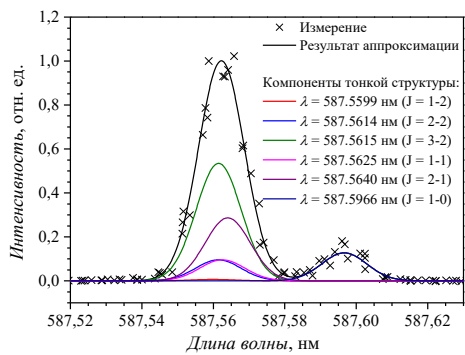
В нижней части хорды зондирования ошибки измерения температуры велики, из-за малого вклада теплового уширения в суммарное уширение спектральной линии. В верхних точках ожидаемые ошибки больше 20% из-за относительно низкого соотношения сигнал/шум и, соответственно, больших ошибок при определении тепловой компоненты в уширении спектрального контура.

Третья глава диссертации содержит результаты экспериментов по лазерной флуоресценции и индуцированному тушению в плазме стационарных источников и на токамаке Глобус-М. Отработка методов ЛИФ / ЛИТ измерений первоначально проходила в простом стационарном источнике – газоразрядной лампе (гелиевой и водородной). Эксперименты в плазме лампы позволили проверить все основные подсистемы диагностики: лазеры, модуль синхронизации и управления, систему регистрации, а также отработать методы измерений.

В гелиевой лампе проведены эксперименты по сканированию контура спектральной линии поглощения лазерного излучения. Измерения проходили по «триплетной» спектроскопической схеме: возбуждалась линия 587,6 нм (переход $1s2p\ ^3P \rightarrow 1s3d\ ^3D$), а отклик флуоресценции регистрировали на линии 388,9 нм ($1s3p\ ^3P \rightarrow 1s2s\ ^3S$). Триплетная линия накачки интересна ярко выраженной тонкой структурой – одна из линий отстоит от остальных примерно на 34 пм. Результаты измерения показаны на рисунке 6 (а). Спектральной контур линии (излучения) также был измерен на спектрометре высокого разрешения (рисунок 6 (б)).



а)



б)

Рисунок 6 – Измеренный спектральный контур линии HeI 587,6 нм (а) ЛИФ методом и (б) эмиссионной спектроскопией

Сравнивая полученные формы контура линии поглощения и излучения, видно, что помимо формы линий также отличается и соотношение амплитуд линий

тонкой структуры. Спектральная форма импульса лазера на красителях ближе к лоренцевой, в то время как аппаратная функция спектрометра ближе к гауссу. Амплитуды линий тонкой структуры в ЛИФ измерениях пропорциональны сечению поглощения лазерного излучения: $I_k \sim A_k$, а в измерениях методом эмиссионной спектроскопии: $I_k \sim w_k A_k$ (A_k и w_k соответственно коэффициент Эйнштейна и статистический вес верхнего уровня).

Эксперименты в гелиевой лампе также позволили проверить новый подход для измерения n_e по скорости распада населённости на возбуждаемом уровне. Время жизни возбуждённых состояний кроме характеристик самого атома также зависит от параметров окружающей плазмы. Воздействуя на атом коротким лазерным импульсом с длительностью меньшей ожидаемого времени жизни возбуждённого состояния и регистрируя осциллограмму сигнала флуоресценции, по временной форме импульса флуоресценции можно рассчитать время жизни уровня, а с помощью СИМ связать полученное время жизни с параметрами плазмы.

Постоянный разряд в газоразрядной лампе позволил набрать хорошую статистику по измерениям n_e на основе анализа временной формы сигналов. Референсные значения температуры и плотности электронов были измерены на основе соотношения интенсивностей трёх линий HeI: 667,8 нм, 706,5 нм и 728,1 нм: получены значения $n_e = (4,78 \pm 0,25) \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = (21,8 \pm 0,7) \text{ эВ}$. Значение $T_e = 21,8 \text{ эВ}$ также использовалось при определении концентрации электронов предлагаемым методом. Пример аппроксимации осциллограммы сигнала синтетическим импульсом флуоресценции показан на рисунке 7 (а). Критерием аппроксимации являлась сумма квадратов отклонений $\sum [I_i - I_{CRM}(n_e)]^2 \rightarrow \min$ (рисунок 7 (б)). В результате обработки всех измерений концентрация составила $n_e = (5,1 \pm 1,6) \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$, которая хорошо соотносится с референсным значением $n_e = (4,78 \pm 0,25) \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

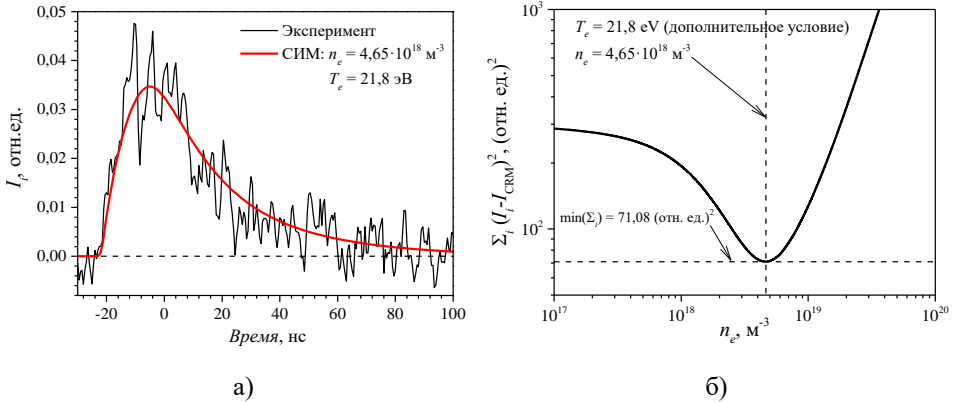


Рисунок 7 – Осциллограмма сигнала флуоресценции HeI и полученный в СИМ импульс флуоресценции (а). Зависимость критерия аппроксимации экспериментального сигнала от n_e при фиксированной температуре $T_e = 21,8 \text{ эВ}$ (б)

Дейтериевая газоразрядная лампа позволила отработать способ измерения параметров плазмы на основе эффекта лазерного индуцированного тушения. Водород и водородоподобный гелий имеют схожую структуру возбуждённых уровней, вырожденных по орбитальному квантовому числу. Схожая структура позволяет использовать эквивалентные спектроскопические схемы для измерений. Наиболее интенсивной в видимом диапазоне является линия дейтерия $D_\alpha = 656,1 \text{ нм}$ (переход $n = 3 \rightarrow 2$). При лазерном возбуждении переходов с $n = 3$ уровня в более возбуждённые состояния (линии пашеновской серии) уменьшается населённость на $n = 3$ уровне, тем самым снижается светимость D_α .

Пример осциллограммы сигнала тушения линии D_α показан на рисунке 8: до лазерного импульса интенсивность D_α составляет примерно 3,5 отн.ед., во время воздействия лазерного излучения, интенсивность D_α падает до 1,3 отн.ед., а после импульса возвращается на прежний уровень. Хорошо видно, что в отличие от флуоресценции HeI, сигнал тушения практически такой же по длительности, как и лазерный импульс (развёртка по горизонтали 20 нс/клетку) из-за высокой скорости

релаксации населённости уровней. В данном примере возбуждалась линия 1004,7 нм (переход $n = 3 \rightarrow 7$).

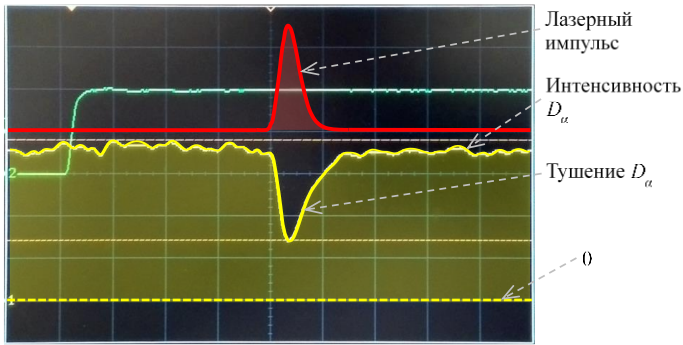


Рисунок 8 – Пример осциллограммы сигнала тушения линии D_α (жёлтая кривая) во время воздействия лазерного импульса (красная кривая)

После тестирования метода измерения концентрации электронов на гелиевой газоразрядной лампе, была проведена серия измерений n_e в плазме токамака Глобус-М в ближайшей к центральному столбу точке (рисунок 9). Для лазерного возбуждения использовался лазер на красителях с спектральной шириной линии генерации ≈ 50 пм; энергия в лазерном импульсе в плазме токамака составляла порядка 1 мДж. Длина волны лазерного излучения 388,9 нм отслеживалась на спектроанализаторе, а также дополнительно проверялась по сигналу флуоресценции на линии 587,6 нм от гелиевой газоразрядной лампы.

Измерения проводились в омических режимах токамака с магнитным полем на оси $B = 0,47$ Тл и током плазмы $I_p = 190$ кА. Напуск гелия шёл в экваториальном сечении от центрального столба со стороны сильного магнитного поля. Напуск начинался примерно за 10-15 мс до окончания импульса токамака. Таким образом, за один импульс токамака получалось выполнить только одно измерение n_e во время напуска гелия.

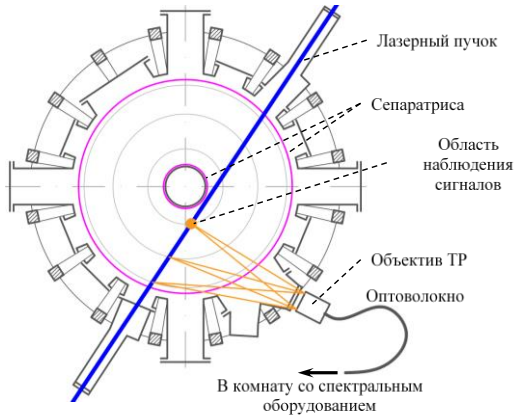


Рисунок 9 – Оптическая схема зондирования плазмы токамака Глобус-М2

Референсные значения $n_e = (2,4 \pm 0,2) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = 110 \pm 18 \text{ эВ}$ в эквивалентной точке были получены от диагностики томсоновского рассеяния. Пример экспериментального сигнала флуоресценции и сигнала, рассчитанного в СИМ, показаны на рисунке 10. Временная форма расчётного сигнала для $n_e = 2,0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = 110 \text{ эВ}$ хорошо аппроксимирует экспериментальный импульс. Ошибка измерения $\Delta n_e = \pm 0,65 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ была рассчитана с помощью численного эксперимента синтетической диагностики.

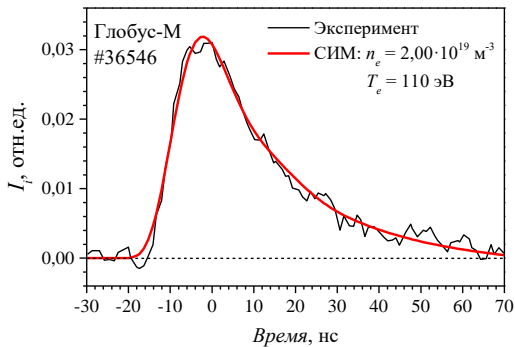


Рисунок 10 – Сигнал флуоресценции HeI получен в импульсе Глобус-М #36546 и синтезированный в СИМ импульс для $n_e = 2,0 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $T_e = 110 \text{ эВ}$

Полученное значение $n_e = (2,00 \pm 0,65) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в пределах рассчитанной ошибки хорошо соотносится с результатом измерений томсоновского рассеяния. В других импульсах токамака с близкими параметрами разрядов, измеренная плотность электронов варьировалась от $3,0 \times 10^{17}$ до $2,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Значение плотности $n_e = 2,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ входит в доверительный интервал измерений томсоновского рассеяния. Низкая плотность электронов, полученная в отдельных измерениях, связана с моментом измерения, когда измерения попадали на конец разряда, на момент «развала» плазмы. Референсных значений от томсоновского рассеяния для столь низких n_e нет, так как они ниже порога чувствительности диагностики.

Успешная проверка ЛИТ метода тушения линии D_α в лампе, позволила перейти к тестовым экспериментам в плазме токамака Глобус-М. Так как сигналы тушения можно наблюдать только в области свечения атомов водорода, а в плазме токамака Глобус-М наиболее ярко водород светится на внутреннем обходе около стенки, сигналы собирались из ближайшей к центральному столбу пространственной области в экваториальном сечении. Ввод лазерного пучка в плазму был аналогичен экспериментам с флуоресценцией на атомах гелия.

Лазерное возбуждение шло в линии водорода 1004,9 нм (переход $n = 3 \rightarrow 7$) при помощи оптического параметрического генератора импульсами с энергией примерно 5 мДж и шириной линии на полувысоте около 600 пм. Спектральная линия наблюдения сигналов тушения выделялась 10 нм полосовым интерференционным фильтром. Регистрация проводилась на фотоэлектронный умножитель с мультищелочным фотокатодом. Тот факт, что фотокатод ФЭУ не чувствителен к длине волны лазерного излучения, позволил полностью избавиться от паразитного рассеянного света лазерного пучка. Регистрация сигналов шла одновременно осциллографом и высокоскоростным АЦП (1 ГГц частота дискретизации), которые были соединены последовательно с учётом согласования нагрузок. Такой способ одновременной оцифровки позволил отслеживать динамику изменения фонового сигнала H_α , собранного вдоль той же хорды наблюдения, что и активных сигналов тушения.

Динамика изменения светимости линии H_α по хорде наблюдения (фоновый сигнал), снятая на осциллограф, и сигналы тушения (S_{LQ} – полезные сигналы), полученные интегрированием импульсов тушения по времени, показаны на рисунке 11. Относительные ошибки сигналов тушения рассчитаны как среднеквадратичное отклонение колебаний фонового сигнала за такое же время интегрирования. Относительное тушение линии H_α составило от 2 до 10%. Значение сильно отличается от экспериментов в газоразрядной лампе в силу геометрического фактора (большая длина хорды наблюдения и маленький объём тушения) и из-за того, что рассматриваются не пиковые, а интегральные значения сигналов.

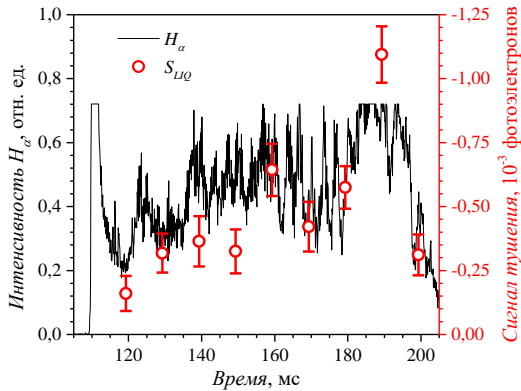


Рисунок 12 – Свечение линии H_α вдоль хорды наблюдения сигнала (чёрная линия по левой оси) и интегральные сигналы тушения от лазерного импульса (красные «о» по правой оси). Импульс Глобус-М #37335

Таким образом, на основании проведённых тестовых экспериментов в плазме токамака можно сделать вывод, что диагностика на основе лазерного индуцированного тушения может использоваться для измерения параметров плазмы. Успешный эксперимент по лазерному тушению в водородной плазме имеет большее значение для исследования физики токамаков, так как демонстрирует новый инструмент для локального измерения концентрации и потоков водорода со стенки (рециклинг рабочего газа).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод и проведены расчёты, подтверждающие возможности диагностики на основе лазерной флуоресценции (тушения) для измерения концентрации гелия (атомарного и водородоподобных ионов) и температуры ионов в условиях диверторной плазмы ИТЭР как в гелиевых, так и в дейтерий-тритиевых сценариях при совместном использовании с диагностикой диверторного томсоновского рассеяния.

Ожидаемые относительные ошибки измерения концентрации гелия $\Delta n_{HeI}/n_{HeI} < 20\%$ при $n_{HeI} > 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при использовании 1 кГц лазера на основе оптического параметрического генератора и усреднении измерений по 20 лазерным импульсам (20 мс). Для измерений T_i с ожидаемыми относительными ошибками $\Delta T_i/T_i < 20\%$ предложен модулированный во времени волоконный лазер с возможностью перестройки длины волны в пределах нескольких нанометров для сканирования спектрального контура линии поглощения иона HeII 1012,3 нм.

2. Эксперименты по ЛИФ (ЛИТ) в плазме стационарного источника и в плазме токамака Глобус-М позволили отработать основные способы измерения параметров плазмы на основе сканирования спектрального контура линии (ионная температура), временной формы сигнала флуоресценции (концентрация электронов), проверить новый подход (лазерное индуцированное тушение) для измерения параметров водорода и водородоподобных ионов.

Хорошее соответствие результатов экспериментов и расчётов в столкновительно-излучательных моделях подтверждает правильность выбора основных атомарных процессов, учитываемых в СИМ, и даёт возможность использовать модели для численных экспериментов и синтетической диагностики диверторной плазмы ИТЭР и других токамаков.

3. Разработанный метод лазерного индуцированного тушения (ЛИТ) объединяет преимущества лазерной флуоресценции и лазерной фотоионизации.

Метод подходит для измерения параметров атомарного водорода и водородоподобных ионов в плазме токамаков и других установок.

Низкая спектральная плотность мощности лазерного излучения, необходимая для наблюдения эффекта тушения линии H_α у водорода (накачка $P_\alpha = 1875$ нм) и линии P_α у водородоподобного гелия (накачка $B_\alpha = 1012$ нм) позволяют рассматривать модулированные во времени лазерные источники для ЛИТ вместо импульсных. Такой подход значительно увеличивает точность измерения и временное разрешение.

4. Измерение концентрации электронов по временной форме сигналов флуоресценции атома гелия имеет ряд преимуществ перед другими локальными диагностиками:

- Для измерений n_e не требуется проводить ни абсолютную, ни спектральную калибровку оптического тракта. Уменьшение пропускания собирающей оптики в 2 раза приводит к увеличению относительной ошибки измерения в $\approx 1,4$ раза.
- При совмещении диагностики лазерной флуоресценции с томсоновским рассеянием метод может быть использован для абсолютной *in-situ* калибровки диагностики ТР.
- Метод хорошо подходит для локальных измерений n_e в пристеночной и диверторной плазме, где работа диагностики ТР может быть осложнена рассеянным лазерным излучением.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Muraoka K. Application of laser-induced fluorescence to high-temperature plasmas / K. Muraoka, M. Maeda // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 1993. – Vol. 35. – № 6. – P. 633-656.
2. Donné A.J.H. Chapter 7: Diagnostics / A.J.H. Donné, A.E. Costley, R. Barnsley, H. Bindslev [et al.] // *Nuclear Fusion*. – 2007. – Vol. 47. – № 6. – P. S337-S384.
3. Бураков В.С. Применение метода лазерной флюоресценции с использованием лазера на красителе для диагностики плазмы в установке токамак ФТ-1 / В.С. Бураков, П.Я. Мисаков, П.А. Науменко, С.В. Нечаев [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. – 1977. – Т. 26. – № 7. – С. 547-550.
4. Schweer B. Application of laser-induced fluorescence to the measurement of the release, the transport and the ionization of Ti-atoms at the ASDEX divertor plates / B. Schweer, P. Bogen, E. Hintz, D. Rusbüldt [et al.] // *Journal of Nuclear Materials*. – 1982. – Vols. 111-112. – № C. – P. 71-74.
5. Galante M.E. Two photon absorption laser induced fluorescence measurements of neutral density in a helicon plasma / M.E. Galante, R.M. Magee, E.E. Scime // *Physics of Plasmas*. – 2014. – Vol. 21. – № 5. – P. 055704.
6. Schweer B. Flux Density Measurements of Neutral Iron in TEXTOR with Laser Induced Fluorescence / B. Schweer // *Research report*. – 1988. – Vol. 861. – P. 17.
7. Moskalenko I.V. The use of the laser induced fluorescence method in the study of helium-like carbon ions in a tokamak plasma / I.V. Moskalenko, D.A. Shcheglov // *Nuclear Fusion*. – 1988. – Vol. 28. – № 1. – P. 169-172.
8. Orsitto F. MoI density measurements by laser induced fluorescence spectroscopy / F. Orsitto, M. Borra, F. Coppotelli, G. Gatti [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 1999. – Vol. 70. – № 1. – P. 921-924.
9. Muller C.H. Dye laser fluorescence spectroscopy on the Doublet III tokamak / C.H. Muller, D.R. Eames, K.H. Burrell, S.C. Bates // *Journal of Nuclear Materials*. – 1982. – Vols. 111-112. – № C. – P. 56-60.