

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Лагунова Владимира Владимировича "КОЛИЧЕСТВЕННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МОЛЕКУЛ ВОДЫ И КИСЛОРОДА, УЧАСТВУЮЩИХ В ОБЪЕМНЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ В ГАЗЕ И ПЛАЗМЕ", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Спектроскопические методы уже в течение длительного времени широко применяются при проведении научных исследований, а также успешно используются в различных отраслях промышленности и других сферах человеческой деятельности для проведения качественного и количественного анализа состава газовой среды, для измерения температуры атомов и молекул, определения их внутренних возбужденных состояний и т.д., при этом область применения указанных методов постоянно расширяется и усложняется. Одной из таких новых и сложных задач является оптическая диагностика неравновесных газовых и плазменных сред низкой плотности, взаимодействующих с поверхностями твердых тел. В этом случае адекватная интерпретация результатов измерений, полученных с использованием традиционных спектроскопических методов, становится весьма проблематичной из-за отсутствия простой функциональной связи между населенностями различных энергетических уровней молекул. Характерным примером такой задачи является взаимодействие неравновесной низкотемпературной плазмы со стенками термоядерного реактора. Существующие в настоящее время методы и подходы к ее решению не удовлетворяют в полной мере всем предъявляемым требованиям. В свете сказанного, тема диссертации В.В. Лагунова, посвященная разработке нового спектроскопического метода детектирования молекул воды и кислорода в неравновесных условиях, несомненно, является актуальной и имеет большое научное и прикладное значение.

Диссертация состоит из Введения, 6 глав, Заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы из 107 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, приведены цели и задачи работы, указана её научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации.

В **первой главе** приведено детальное описание разработанного автором двухканального диодного лазерного спектрометра с цифровым управлением, который

был использован для исследования динамики молекул кислорода и воды в плазме тлеющего газового разряда низкого давления. Для достижения высокой чувствительности по поглощению и высокого спектрального разрешения, необходимых для измерения невысоких концентраций частиц, разделения компонентов вращательной структуры молекулярного спектра и определения формы контура индивидуальных спектральных линий диссертант использовал ряд оригинальных решений и подходов, среди которых следует особо выделить использование газоразрядной трубки как внешнего аналитического резонатора с неосевой юстировкой и применение дихроичной оптики. Приведены параметры созданного двухлучевого спектрометра, которые соответствуют лучшим мировым образцам.

Вторая глава посвящена исследованию обнаруженных в работе эффектов искажения спектров поглощения частиц в высокочастотном внешнем резонаторе, которые проявляются при скорости перестройки частоты просвечивающего лазерного излучения на 2-4 порядка меньшей, чем известной в литературе. Для объяснения наблюдаемых эффектов разработана физическая модель, с помощью которой было показано, что основной причиной искажения контуров линии поглощения является конечное время жизни фотона в резонаторе, превышающее время когерентности просвечивающего источника. Установленный механизм искажения линии поглощения позволил разработать способы определения концентраций частиц и температуры газа по искаженным спектрам поглощения с высоким временным разрешением и чувствительностью.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследования временной динамики объемной плотности молекул воды, обусловленной процессами адсорбции-десорбции молекул на стенках кварцевой трубки, полученные методом диодной лазерной спектроскопии. Установлено, что эволюция плотности молекул в процессе перехода к равновесному состоянию удовлетворительно описывается набором степенных функций, что свидетельствует о нескольких одновременно протекающих процессах. Для объяснения полученных результатов разработана кинетическая модель, которая учитывает параллельные конкурирующие процессы адсорбции и десорбции по физическому и химическому механизмам. Показано, что в начальной стадии формирования поверхностного слоя доминирует физическая адсорбция, в то время как в состоянии динамического равновесия преобладает химическая адсорбция. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, которое показало их хорошее соответствие друг другу. Установлено, что в процессах

адсорбции-десорбции молекул воды на поверхности кварца полное число молекул сохраняется и химических превращений не происходит.

Четвертая глава посвящена исследованию роли предварительной активации поверхности кварцевой трубки тлеющим разрядом низкого давления в последующей динамике концентраций молекул кислорода в газе и плазме тлеющего разряда, зажигаемого в активированной трубке в различных кислородсодержащих газовых смесях. Установлено, что взаимодействие плазмы тлеющего разряда с поверхностью кварцевой трубки приводит к длительному изменению ее адсорбционных свойств и оказывает заметное влияние на дальнейшее поведение молекул кислорода в объеме трубки как в газовом, так и плазменном режиме. Предложено качественное объяснение наблюдаемым эффектам в поведении концентраций молекул кислорода.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований одновременной (коррелированной) динамики концентраций молекул кислорода и воды в тлеющем разряде низкого давления в кварцевой трубке. Одновременные измерения концентраций молекул воды и кислорода, а также температуры газа выполнены с использованием разработанного диссертантом двухканального диодного лазерного спектрометра. Для интерпретации экспериментальных результатов была разработана численная 0D – мерная модель изучаемого газового разряда с детальной кинетикой заряженных и нейтральных частиц, учитывающая элементарные процессы как в газовой фазе, так и на стенках газоразрядной камеры. С целью устранения обнаруженного в экспериментальных измерениях нарушения элементного дисбаланса частиц по водороду в кинетическую модель впервые введена гетерогенная реакция свободных атомов кислорода, которые нарабатываются в тлеющем разряде, с молекулами воды, адсорбированными на стенках кварцевой трубки. Конечными продуктами этой реакции являются молекулы водорода и кислорода, которые поступают в плазму тлеющего разряда и обеспечивают выполнение баланса атомов водорода в объеме кварцевой трубки.

Шестая глава посвящена исследованию превращений изотопомеров воды H_2O и HDO в тлеющем разряде в различных газовых смесях, содержащих пары воды и молекулы дейтерия. Эта задача актуальна для исследований низкотемпературной пристеночной плазмы в термоядерных реакторах синтеза изотопов водорода. Установлено постоянство изотопического соотношения концентраций обычной H_2O и полутяжелой HDO воды, генерируемой в тлеющем разряде, сохраняющееся в широком диапазоне экспериментальных условий. Высказана гипотеза, что наблюдаемые

закономерности обусловлены протекающими на поверхности газоразрядной трубки гетерогенными процессами. Представлены результаты измерений концентрации воды в тлеющем разряде методом спектроскопии поглощения и методом оптической актинометрии. Показано, что результаты двух независимых методов хорошо соответствуют друг другу.

Приложение 1 посвящено новому методу оптимизации внешних резонаторов для повышения чувствительности измерений концентрации частиц.

Приложение 2 содержит полный список реакций, использованных для моделирования плазмохимических процессов, рассмотренных в Главе 5.

В Заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Изложенные в диссертации результаты опубликованы в 14 научных статьях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Они многократно докладывались на различных международных и всероссийских конференциях. Все публикации по теме диссертации соответствуют специальности 1.3.6 – Оптика.

К числу наиболее важных и интересных результатов, полученных автором, следует отнести следующие:

1. Разработан уникальный двухканальный спектрометр, позволяющий проводить одновременные измерения концентраций молекул, связанных взаимными превращениями в разряде, описаны физические ограничения его применения.
2. Предложен и апробирован метод исследования процессов адсорбции и десорбции частиц поверхностью кварца в условиях, когда число частиц в газовой фазе сопоставимо с числом частиц на стенке камеры.
3. Исследован компонентный состав плазмы пониженного давления в различных условиях, выявлена роль стенки в установлении объемных концентраций частиц. Результаты измерений хорошо описываются разработанной моделью плазмохимических процессов, учитывающей не только объемные, но и гетерогенные процессы на поверхности разрядной камеры.

В качестве замечаний по диссертации можно отметить следующее:

1. В диссертации подробно исследованы процессы адсорбции/десорбции молекул воды и кислорода, протекающие на внутренней поверхности газоразрядной кварцевой трубки. Одним из важных параметров, характеризующим состояние поверхности, является ее шероховатость, величина которой регламентируется ГОСТ №2789-73 «Шероховатость поверхности». В работе следовало бы привести сведения об этом параметре.

2. В главе 5 на рис. 5.3а и 5.4а приведены зависимости концентрации молекул воды от времени при разных начальных концентрациях кислорода, при этом концентрация кислорода в исходной газовой смеси варьируется в несколько раз, а скорость образования молекул воды изменяется в существенно меньших пределах. Какова возможная причина слабой зависимости концентрации паров воды, образующейся в разряде, от начальной концентрации кислорода?

3. Рисунки в диссертационной работе в разных местах по тексту имеют подписи на английском и на русском языках. Следовало бы оформить их единообразно на русском языке.

4. Несмотря на то, что в целом материал работы изложен на хорошем литературном уровне, текст диссертации не лишен ряда опечаток и погрешностей. Так, например, на стр.20 стоит: «Длина трубок $L_c = 50$ мм». Правильно: «Длина трубок $L_c = 500$ мм». На стр.35 вместо рис.1.3 указан рис.1.2.

Отмеченные недостатки имеют частный характер и не снижают общий высокий уровень диссертационной работы.

Полученные автором результаты являются новыми, они актуальны для установления особенностей поведения примесных веществ в плазменных условиях, а также их влияния на окружающие частицы. Результаты представляют большой интерес для разработки диагностических комплексов в составе высокоэнергичных электровакуумных камер.

Обоснованность и достоверность защищаемых положений и выводов подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, современных методов обработки результатов измерений, соответствием результатов моделирования и эксперимента, а также обсуждением результатов работы на многочисленных международных конференциях и публикациями в авторитетных рецензируемых журналах.

Представленная диссертация В.В. Лагунова является законченной научно-квалификационной работой, автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Диссертационная работа В.В. Лагунова "Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме" удовлетворяет всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24

сентября 2013 г. В.В. Лагунов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – "Оптика".

Официальный оппонент:

Начальник лаборатории физики плазмы Отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных исследований акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", доктор физико-математических наук

Трушкин Николай Иванович

25.09.2025г.

142190, Россия, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12,
e-mail: trushkin@triniti.ru, +7(495)841-52-36.

Подпись Трушкина Николая Ивановича удостоверяю:

Учёный секретарь акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", кандидат физико-математических наук

Ежов Александр Александрович

25.09.2025г.

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук Трушкина Н.И. по тематике диссертации Лагунова В.В. "Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме" за последние 5 лет

1. V. N. Babichev, D. V. Vysotskii, K. É. Galeeva, A. N. Kirichenko, A. A. Nekrasov, A. V. Ugodchikova, N. I. Trushkin, A. V. Filippov, Yu. V. Cherepanova & V. E. Cherkovets, Plasmachemical Processes of Iron Corrosion in a Moist Air Medium Exposed To Ionizing Radiation of Radioactive Decay // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2024. – Vol. 97, No. 6. – P. 1628-1640. – DOI 10.1007/s10891-024-03041-7.
2. V. N. Babichev, K. E. Galeeva, A. N. Kirichenko, A. A. Nekrasov, A. V. Ugodchikova, N. I. Trushkin, A. V. Filippov, Yu. V. Cherepanova & V. E. Cherkovets, Iron Corrosion in the Radiative Plasma of Moist Air // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49, No. 5. – P. 563-574. – DOI 10.1134/s1063780x22601924.
3. Babichev V. N., D. V. Vysotskyi, K. E. Galeeva, A. N. Kirichenko, A. A. Nekrasov, A. V. Ugodchikova, N. I. Trushkin, A. V. Filippov, Yu. V. Cherepanova & V. E. Cherkovets, Specific Features of Plasmachemical Corrosion of Iron in the Air Plasma of an Electron Beam // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – №. 11. – P. 1322-1331. – DOI 10.1134/S1063780X23601542.
4. Babichev V.N., Galeeva K.E., Kirichenko A.N., Nekrasov A.A., Ugodchikova A.V., Trushkin N.I., Filippov A.V., Cherepanova Yu.V., Cherkovets V.E., Iron corrosion in the radiative plasma of moist air, // Plasma Physics Reports. – 2023. – Vol. 49. – №. 5. – P. 563-574. – DOI: 10.1134/s1063780x22601924.
5. Ю. С. Акишев, А. В. Петряков, Н. И. Трушкин. Газоразрядный источник соосных и разнонаправленных плазменных струй на основе барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке // Прикладная физика. – 2020. – № 4. – С. 18-23.
6. Y. S. Akishev, V. B. Karalnik, A. V. Petryakov, N. I. Trushkin. Spectroscopic determination of the composition and spatial distribution of active particles in a plasma jet of helium and argon being blown out into atmospheric air // Journal of Physics: Conference Series – 2020. – P. 012006. – DOI 10.1088/1742-6596/1698/1/012006.
7. Y. S. Akishev, A. V. Petryakov, N. I. Trushkin. Dielectric barrier discharge in radially converging gas flow generating two coaxial and opposite directed nonthermal plasma jets // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – P. 012019. – DOI 10.1088/1742-6596/1698/1/012019.