

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Синцова Сергея Владиславовича**

«Разряд атмосферного давления, поддерживаемый в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Разряд в газах атмосферного давления, как основа всевозможных технологических, экологических и биомедицинских приложений, исследуется широко и активно. Патентуются новые технологии, источники плазмы, происходит коммерциализация научных результатов. Новейшие плазмохимические технологии доказывают свою эффективность, экономическую целесообразность и заслуженно попадают в государственные «регуляторные» справочники. Например, «Информационно технический справочник по наилучшим доступным технологиям» (ИТС НДТ) или его европейский аналог «Best available technologies» (BAT).

Физические (и химические) основы многих типов разрядов уже подробно изучены. Однако, все еще остаются, как «необычные» формы разрядов, не столь широко изученные, так и области параметров разрядов (например, частоты электромагнитных полей, возбуждающих разряд), проникновение в которые затруднительно из-за отсутствия необходимой научно-технической базы.

В диссертационной работе Синцова Сергея Владиславовича: подробно экспериментально изучены характеристики разряда атмосферного давления, возбуждаемого и поддерживаемого в пучках излучения миллиметрового диапазона длин волн; проанализированы плазмохимические процессы; оценена эффективность данного вида разряда для деструкции целевых примесей; определены возможные пути управления «химией» разряда. Поэтому тема диссертационной работы Синцова С.В. является **актуальной**, как для фундаментальной физики газового разряда, так и для промышленных технологических применений.

Диссертация содержит 172 страницы, 58 рисунков и 4 таблицы, состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Во **введении** благодаря обзору современных научных работ и предшествовавших работ, раскрыта актуальность исследования плазмохимических применений газового разряда атмосферного давления, но в то же время подчеркнута уникальность изучаемого разряда. Введение также содержит цели и задачи исследования, которые отчетливо указывают на большой объем экспериментальной работы, представшей перед диссертантом. Практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, и апробация работы также приведены во введении.

В начале **первой** главы диссертации представлен подробный обзор исследований по тематике диссертации: как по природе разряда в пучках миллиметровых и сантиметровых волн, так и по прикладным исследованиям

применений других видов разрядов для разложения примесных газов. Экспериментальные исследования, представленные в первой главе посвящены изучению плазменного факела, создаваемого излучением 24 ГГц гиротрона и в потоке аргона, напускаемого в окружающую атмосферу воздуха. Установка на базе технологического гиротрона с непрерывной генерацией подробно описана диссертантом, а также приведены расчеты фокусировки электромагнитных полей. Установлено, что в разряде поглощается порядка 10% от подаваемой СВЧ мощности, а длина плазменного факела увеличивается с ростом вводимой СВЧ мощности. Полученные с помощью высокоскоростной камеры снимки разряда с временами экспозиции 4 мкс позволили выявить боковые неоднородности разряда и филаментарные структуры, берущие начало на срезе трубки газонапуска и ориентированные вдоль потока напускаемого газа. Методом лазерной оптической интерферометрии измерено распределение поступательной температуры газа в области поддержания разряда, также указывающее на возникновение нитевидных структур. Установлено, что поперечный размер нитей составляет 0.4 мм и определяется амбиполярной диффузионной длиной. Тщательно выполненная спектроскопия разряда позволила получить, как интегральные спектры, так и локальные из разных областей по длине плазменного факела, с помощью которых определялись температурные характеристики разряда. Было установлено, что температура возбуждения электронных уровней атомов аргона не зависит от скорости потока газа и поглощенной СВЧ мощности и составляет порядка 5000 К. По линиям второй положительной системы азота были определены колебательная и вращательная температуры (2000 К и 1500 К соответственно), подтвердившие неравновесность разряда. Электронная температура плазмы в ореоле разряда была измерена с помощью двойного зонда, правомерность использования которого обоснована диссертантом, и составила 1 эВ. Средняя плотность плазмы измерялась методом СВЧ зондирования на частоте 35 ГГц (источник диод Ганна) с применением коаксиально-волноводного перехода для непосредственного наблюдения набега фаз между опорным и прошедшим через плазму излучением на осциллографе. Измеренное значение средней плотности электронов менялось от 7.5 до  $8.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с увеличением поглощенной мощности нагрева. Дополнительно плотность электронов определялась и по штарковскому уширению линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  водорода. Так для нитевидных структур была сделана оценка  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

Во второй главе исследовался также СВЧ разряд атмосферного давления в сфокусированных пучках, однако, теперь частота излучения, возбуждающего разряд, увеличена более чем в 10 раз и составляет 263 ГГц (при мощности до 1 кВт). Перетяжка пучка равна 1.2 мм, что меньше диаметра трубки напуска газа, в отличие от эксперимента, описанного в главе 1. В главе 2 приведен задействованный в исследованиях экспериментальный стенд и расчеты интенсивности пучка в поперечном сечении. В экспериментах удавалось возбуждать плазменный факел в потоке аргона,

напускаемого в воздух атмосферного давления навстречу пучку СВЧ излучения. Полученные с помощью камеры кадры разряда со временем экспозиции 20 нс продемонстрировали существенную неоднородность и нестационарность разряда на таких временах. Спектроскопические измерения, выполненные аналогично представленным в главе 1, показали, что температура возбуждения атомов аргона составляет 1.5 – 1.7 эВ и не зависит от скорости напуска газа, однако, немного повышается с ростом мощности СВЧ излучения (в использованном диапазоне 650 – 1000 Вт). Колебательная температура составила 3000 К и при увеличении потока аргона падала, указывая на большую неравновесность разряда вследствие уменьшения влияния молекулярного азота на выравнивание температур. Сходным образом при росте потока аргона от 5 до 30 л/мин вела себя и вращательная температура, уменьшаясь от значения 2000 – 2500 К до 1500 К. По представленной во второй главе методике определения плотности плазмы по штарковскому уширению линий  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  водорода, который в малом количестве подмешивался в аргон, измеренная плотность составила порядка  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и не изменялась с ростом мощности и потока газа в пределах погрешности измерений.

**Третья** глава посвящена решению возможных прикладных задач по разложению примесных газов с помощью разряда поддерживаемого в сфокусированных пучках излучения миллиметрового диапазона длин волн. Примесным газом, эффективность деструкции которого проверялась в диссертационной работе, был диоксид углерода. В начале главы приведен подробный обзор исследований по тематике разложения углекислого газа в разрядах различного типа со сравнением достигнутых степеней конверсии и энергоэффективности. Разряд возбуждался в сфокусированном пучке СВЧ излучения частотой 24 ГГц при мощностях от 1.2 кВт до 5 кВт. Благодаря специальной конструкции (металлический конус, оба конца открыты), размещенной в области перетяжки пучка удалось довести поглощение микроволнового излучения в разряде до 60% (в отличие от экспериментов в первой главе, где оно было 10%). В экспериментах газоразрядная камера наполнялась смесью аргона и углекислого газа, потоки газа через систему напуска составляли до 50 л/мин для аргона и до 30 л/мин для углекислого газа. Колебательная (3000 – 5000 К) и вращательная (2000 – 3800 К) температура определялись по линиям  $C_2$  системы Свана, а температура возбуждения (5000 – 8000 К) атомов аргона по линиям аргона соответственно. Температура возбуждения оказалась на 30% больше, чем в экспериментах главы 1 (поток аргона в воздухе). Делается предположение, что такое повышение наблюдается вследствие большей величины порога возбуждения колебательных состояний молекулы  $CO_2$  (0.8 эВ), чем молекулы  $N_2$  (0.3 эВ). Было установлено, что, начиная со скоростей напуска газа больше 30 л/мин, температура возбуждения повышается с ростом скорости напуска газа, что указывает на увеличение неравновесности разряда. Однако даже при высоких скоростях напуска при увеличении мощности нагрева, начиная с некоторого порогового значения (чем выше скорость потока, тем

выше порог) мощности СВЧ излучения, наблюдалось падение температуры, что указывает на выравнивание температур в разряде. По полученному распределению молекул  $C_2$  по колебательному возбуждению сделан вывод о существовании инверсного механизма заселения верхних колебательных уровней прямым электронным ударом. Массовый состав обработанного разрядом газа анализировался с помощью масс-спектрометра и газоанализатора с оптическими и электрохимическими сенсорами. Результаты анализа показали, что степень конверсии углекислого газа достигает  $\sim 30\%$ . Также было проведено исследование по возбуждению разряда в потоке чистого углекислого газа, где степень конверсии  $CO_2$  была порядка  $10\%$ . Были проведены эксперименты по исследованию зависимости степени конверсии углекислого газа и энергоэффективности процесса от соотношения компонент ( $Ar:CO_2$ ) в напускаемом газе, от мощности СВЧ излучения и от скорости напуска. С ростом мощности степень конверсии росла, а энергоэффективность падала. Наиболее оптимальным соотношением  $Ar:CO_2$  оказалось  $5:1$ . С ростом скорости напуска газа степень конверсии, в целом, падала, а энергоэффективность росла.

В заключении диссертации приведены основные результаты.

**Научная новизна и ценность работы** состоит в обширном экспериментальном исследовании характеристик (плотности плазмы, температуры электронов, колебательной, вращательной температур, температуры возбуждения атомов, временной динамики) необычного типа разряда, возбуждаемого в пучках непрерывного излучения миллиметрового диапазона длин волн в газах атмосферного давления. Причем в работе для возбуждения разряда использовался, как технологический гиротрон с частотой излучения  $24$  ГГц, так и гиротрон с частотой  $263$  ГГц, что делалось впервые и позволило получить более высокие плотности плазмы и температуры в разряде. Для разряда в сфокусированном пучке излучения  $24$  ГГц стоит отметить выявление и изучение тонких ( $\sim 0.4$  мм) нитевидных структур, ориентированных вдоль направления потока плазмообразующего газа, с плотностью электронов на порядок превышающей плотность в основном теле факела. Безусловно, интересно и обнаружение нестационарных островковых структур с характерным размером порядка длины волны возбуждающего разряд излучения  $263$  ГГц благодаря использованию камеры со временем экспозиции кадра  $20$  нс.

Работа, безусловно, имеют высокую **практическую значимость**, поскольку развивает газоразрядные методы деструкции молекулярных газов для экологических целей. Полученные зависимости параметров разряда (длина факела, температуры, плотность плазмы) от мощности и длины волны СВЧ излучения, скорости напуска газа позволяют продвинуться непосредственно к реализации технологии. Еще больший вклад в решение данной задачи вносят проведенные эксперименты непосредственно по деструкции примесных газов атмосферного давления с помощью изучаемого разряда на примере углекислого газа. Так, при варьировании скоростей напуска газов, соотношения плазмообразующего и примесного газов, схемы

напуска газа, мощности нагрева найдены режимы с оптимальным соотношением степени разложения углекислого газа и энергоэффективности процесса. А на примере сравнения степени конверсии углекислого газа при возбуждении разряда в чистом  $\text{CO}_2$  и в аргоне, в который затем подмешивался  $\text{CO}_2$ , показана важность неравновесности разряда для достижения высоких значений степени конверсии. Полученные значения степени конверсии и энергоэффективности могут достойно конкурировать с другими газоразрядными методами разложения примесных газов, при этом диссертантом предложены возможные пути по увеличению данных показателей.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов не вызывает сомнений. Этому способствует применение в работе большого количества известных и зарекомендовавших себя методов исследования параметров газового разряда: спектроскопия, лазерная интерферометрия, зондовые измерения, СВЧ зондирование. Особо стоит отметить тщательную проработку спектроскопических методов определения температур (возбуждения атомов аргона, колебательной, вращательной), определения плотности по штарковскому уширению линий  $\text{H}_\alpha$  и  $\text{H}_\beta$  с анализом применимости и определением погрешностей методики. Погрешности приведены и для других методов, например, для зондовых измерений погрешность не превышает 0.3 эВ. Положительно сказывается и объяснение наблюдаемых в эксперименте зависимостей параметров разряда (плотность, температуры, пространственные размеры) от мощности и длины волны СВЧ излучения, скорости напуска газа, рода газа на основе существующих представлений о физике газового разряда. В пользу достоверности и обоснованности также говорит большое количество статей Синцова Сергея Владиславовича в ведущих международных рецензируемых научных журналах.

К работе Синцова С.В., тем не менее, имеется несколько **замечаний**:  
1) В работе не анализируется динамика развития ионизационно перегретой неустойчивости. Не обсуждается переход от инициации к стационарной фазе разряда в режиме непрерывной генерации гиротрона (если стационар в прямом смысле слова существует, а разряд не прерывается и возникает снова) и роль ионизационно перегретой неустойчивости в этом процессе. В достаточной мере не объяснено, почему в эксперименте наблюдаются филаменты, вытянутые вдоль потока газа, а не филаменты, вытянутые вдоль направления электрического поля волны, как ожидается для данного типа неустойчивости.

2) При оценке перспективности разложения углекислого газа с помощью изучаемого газового разряда для экологических задач не учтен тот факт, что при генерации 1 кВт·ч электроэнергии, впоследствии затрачиваемой на работу гиротрона, в воздух выбрасывается в среднем 400 мг углекислого газа, который также будет необходимо разлагать.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Синцова Сергея Владиславовича «Разряд атмосферного давления, поддерживаемый в сфокусированных квазиоптических пучках непрерывного миллиметрового излучения» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент

Борзосеков Валентин Дмитриевич, кандидат физико-математических наук по специальности «Физика плазмы» (01.04.08), старший научный сотрудник отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук" (ИОФ РАН).

Адрес. 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН, отдел физики плазмы.  
Тел. +7 (499) 503-8777, доб. 5-82.

Адрес электронной почты [borzosekov@fpl.gpi.ru](mailto:borzosekov@fpl.gpi.ru)  
<https://www.gpi.ru/>

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

В.Д. Борзосеков  
05 ноября 2020 г.

Подпись В.Д. Борзосекова удостоверяю

Заместитель директора ИОФ РАН  
по научной работе, к.ф.-м.н.



Д.Г.Кочиев