



УТВЕРЖДАЮ
Врио директора ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов

« 08 » июля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Чекмарева Никиты Владиславовича «Разложение углекислого газа в СВЧ разрядах атмосферного давления» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Работа выполнена в отделе физики плазмы (120) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Водопьянов Александр Валентинович, заведующий отделом физики плазмы ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, доцент.

В 2022 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.02. Физика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2022 года по 31 августа 2026 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000046 от 08 июля 2026 года.

В период подготовки диссертации соискатель Чекмарев Никита Владиславович работал младшим научным сотрудником в отделе физики плазмы (120) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты, представленные в работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач исследования, подготовке и проведении всех экспериментов, а также обработке и анализе полученных данных.

Все численные расчёты, включая модели химической кинетики, электродинамическое, газодинамическое и тепловое моделирование, выполнены автором лично. Обработка и анализ результатов моделирования также проводились автором.

Автором был предложен метод газовой закалки в области обратных реакций СВЧ разряда, включая идею использования в качестве закалочного газа охлажденную смесь продуктов реакции из расширительной камеры.

Автором совместно с сотрудниками лаборатории прикладной физики плазмы была разработана и запатентована конструкция волноводного плазмотрона для разложения углекислого газа (RU 2215061).

Измерение оптических эмиссионных спектров, их обработка и оценка температурных характеристик плазмы выполнены совместно с сотрудниками лаборатории прикладной физики плазмы ИПФ РАН.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. На основании проведенных экспериментов и численного моделирования установлено, что эффективное подавление обратных реакций при разложении CO_2 в атмосферной СВЧ-плазме достигается при скоростях закалки не ниже $10^6 - 10^7 \text{ K/s}$, степень конверсии возрастает вплоть до скорости охлаждения $2 \cdot 10^8 \text{ K/s}$. При этом нагрев газа до температур свыше 4000 К не ведет к росту степени конверсии.
2. Разработан и реализован СВЧ-плазмотрон атмосферного давления на основе магнетрона 2.45 ГГц с интегрированной системой рециркуляционной закалки продуктов реакции. Впервые для атмосферных СВЧ-разрядов предложен и экспериментально реализован легко масштабируемый универсальный метод закалки направленным потоком холодного газа, позволивший в 1,5 – 2 раза повысить максимальную степень конверсии в разработанной установке (до 19%) и максимальную энергоэффективность (до 44%) без изменения состава реакционной смеси.
3. Выполнено комплексное моделирование электродинамических, газодинамических и тепловых процессов в волноводном плазмотроне, использующем излучение гиротрона с частотой 24 ГГц. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована новая конструкция волноводного СВЧ-плазмотрона с коэффициентом поглощения излучения 60 – 70 %, обеспечивающая нагрев всего поступающего газа.
4. Методами численного моделирования показано, что за счет закалки потоком газа в волноводном плазмотроне можно увеличить скорость охлаждения продуктов реакции до $\approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ K/s}$ и увеличить степень конверсии на 50 %.
5. В СВЧ разряде на 24 ГГц в волноводном плазмотроне в чистом CO_2 за счет использования рециркуляционной закалки экспериментально получен трёхкратный рост степени конверсии CO_2 с 7,3 % до 23,4 % и рост энергоэффективности с 12,8 % до 19,4 %, что подтверждает эффективность предложенного подхода к организации плазмохимического процесса.
6. Экспериментально показано, что эффективность закалки зависит как от потока закалочного газа, так и от его свойств: плотности и теплоемкости.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методов диагностики плазмы, сопоставлением экспериментальных данных с результатами численного моделирования, а также хорошим соответствием полученных результатов современным представлениям о механизмах плазмохимической конверсии углекислого газа. Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях и обсуждались на научных семинарах.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии представлений о механизмах плазмохимической конверсии углекислого газа в атмосферных микроволновых разрядах и выявлении роли процессов постразрядной рекомбинации в формировании конечного состава продуктов реакции. Полученные результаты расширяют существующие знания о физических механизмах, ограничивающих степень разложения CO_2 . Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов при разработке перспективных плазмохимических технологий переработки углекислого газа, а также при создании высокоэффективных микроволновых плазмотронов атмосферного давления. Разработанные технические решения защищены патентом и могут быть использованы в дальнейших исследованиях и прикладных разработках.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Мансфельд Д. А., Водопьянов А. В., Чекмарев Н. В., Преображенский Е. И. Конверсия углекислого газа в плазме СВЧ-разряда с закалкой встречным потоком газа // Письма в журнал технической физики. 2025. Т. 51, № 7. С. 55–58.
2. Chekmarev N. V., Mansfeld D. A., Vodopyanov A. V., Sintsov S. V., Preobrazhensky E. I., Remez M. A. Enhancement of CO_2 conversion by counterflow gas quenching of the post-discharge region in microwave plasma sustained by gyrotron radiation // *Journal of CO2 Utilization*. 2024. Vol. 82. Art. 102759..
3. Мурзанев А. А., Мансфельд Д. А., Чекмарев Н. В., Синцов С. В., Викторов М. Е., Преображенский Е. И., Водопьянов А. В. Интерферометрическая диагностика температуры газа в разряде, поддерживаемом СВЧ-излучением гиротрона с частотой 24 ГГц в потоке аргона при атмосферном давлении // Изв. вузов. Радиофизика. 2024. Т. 67, № 6. С. 491–499..
4. Чекмарев Н. В., Мансфельд Д. А., Преображенский Е. И., Синцов С. В., Рemez М. А., Водопьянов А. В. Подавление обратных реакций при разложении углекислого газа в плазме микроволнового разряда // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49, № 24.
5. Мансфельд Д. А., Водопьянов А. В., Синцов С. В., Чекмарев Н. В., Преображенский Е. И., Викторов М. Е. Разряд атмосферного давления, поддерживаемый

миллиметровым излучением в волноводном плазмотроне // Письма в журнал технической физики. 2023. Т. 49, № 1. С. 39–42.

6. Мансфельд Д. А., Чекмарев Н. В., Синцов С. В., Водопьянов А. В. Оптимизация волноводной структуры реактора с плазмой, поддерживаемой мощным микроволновым излучением гиротрона на частоте 24 ГГц // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 9. С. 323–328.

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых российских и международных журналах и призовыми местами на конкурсах студенческих докладов. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах, получили высокую оценку ведущих специалистов и имеют высокую цитируемость.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.9. Физика плазмы.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

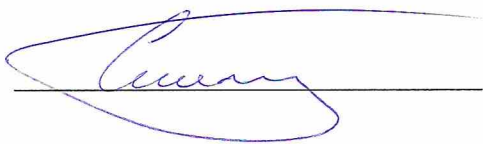
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Разложение углекислого газа в СВЧ разрядах атмосферного давления» Чекмарева Никиты Владиславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.9. Физика плазмы.

Присутствовало на заседании 17 чел.

Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.
протокол № 9 от «29» июня 2026 г.



Скалыга Вадим Александрович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения физики
плазмы и электроники больших мощностей



Моченева Ольга Станиславовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения физики плазмы и
электроники больших мощностей