



“УТВЕРЖДАЮ”

директора Института

Ф.м.н. Е.И. Краус

2025 г.

17.09.2025

ведущей организации

**Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
на диссертационную работу Шемахина Александра Юрьевича**

**«Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя
положительного заряда у поверхности твердого тела»,**

**представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».**

1. Актуальность темы исследования

Современная наука и техника характеризуются активным внедрением плазменных технологий в материалы, энергетику, медицину, микроэлектронику и экологию. Одним из наиболее перспективных направлений является использование струйных ВЧИ-разрядов пониженного давления. Такие установки позволяют получать плазменные струи с уникальными характеристиками: низкой температурой, концентрацией активных частиц и регулируемой структурой потока.

Вместе с тем, понимание фундаментальных закономерностей протекания процессов в струйной ВЧИ-плазме до сих пор ограничено. Имеющиеся модели либо описывают плазму в объеме разрядной камеры, либо фокусируются на характеристиках струи, не учитывая важную роль приповерхностных эффектов и слоя положительного заряда у границы с твердым телом.

Работа Шемахина А.Ю. восполняет этот пробел. Она направлена на построение комплексной математической модели, объединяющей разрядную камеру, струю и приповерхностный слой. Актуальность диссертации определяется тем, что именно такие модели необходимы для создания новых поколений плазменных установок и повышения эффективности существующих технологий.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Результаты диссертации основаны на сочетании экспериментальных исследований и численного моделирования.

Экспериментальная часть включает диагностику параметров плазмы различными методами: зондовыми измерениями, спектроскопией, СВЧ-зондированием, термографией и др.

Построена физическая модель, которая охватывает как процессы в плазме (перенос массы, энергии и импульса, взаимодействие электронов и ионов, электромагнитное поле), так и процессы в газовой среде (течение с переходным числом Кнудсена).

Для численной реализации разработан оригинальный гибридный метод, сочетающий DSMC и метод конечных объемов.

Автором проведена тщательная верификация и валидация модели, включая сопоставление расчетных данных с результатами измерений. Совпадение ключевых параметров составляет 85–95 %. Таким образом, выводы и рекомендации диссертации обоснованы и достоверны.

3. Научная новизна

Научная новизна работы подтверждается следующими положениями:

1. Разработаны научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, представляющие собой совокупность следующих положений (пп. 5, 6, 13, 16, 17 паспорта специальности 1.1.9):

— струйный ВЧИ-разряд в диапазоне давления плазмообразующего газа 13,3–133 Па, скорости продува газа до 1000 м/с, мощности разряда до 3,8 кВт, частоте генератора 1,76 МГц является единой сущностью, которая представляет собой сосуществование различных форм ВЧ-разрядов: самостоятельного Н-разряда в разрядной камере, несамостоятельного комбинированного разряда в плазменной струе, слоя положительного заряда (СПЗ) с приповерхностным слоем у границы твердого тела;

— различные области струйного ВЧИ-разряда отличаются по пространственным и временным масштабам происходящих в них процессов, и определенным образом влияют на формирование параметров взаимодействия разряда с твердым телом: в разрядной камере создается плазменный поток с концентрацией электронов $10^{17} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$, электронной температурой 0,5 – 2 эВ, газовой температурой $(1 - 4) \cdot 10^3 \text{ К}$; плазменная струя обеспечивает поддержание концентрации заряженных частиц в диапазонах $10^{16} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, электронной температуры 0,8 – 1,5 эВ, температуры несущего газа 320 – 600 К, транспортировку их к поверхности твердого тела, и участвует в формировании

характеристик СПЗ и поверхностного слоя в окрестности тела; в СПЗ под действием потенциального поля $E_p = 30 - 50$ В ионы ускоряются до энергии $30 - 50$ эВ; в приповерхностном слое толщиной $\lambda_D = 50 - 70$ мкм происходит фокусировка ионного потока на вершинах микронеровностей поверхности и его дополнительное ускорение;

— расчеты энергии ионов и плотности ионного тока, поступающего на поверхность образца производятся с помощью единой модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, которая позволяет при заданных значениях регулируемых параметров плазмотрона проводить сквозной расчет характеристик плазменного потока в разрядной камере, плазменной струе, СПЗ и приповерхностном слое у границы твердого тела: концентрации электронов и ионов, электронной температуры, параметров электромагнитного поля, концентрации метастабильных частиц, температуры, скорости и давления плазмообразующего газа;

2. Впервые теоретически обосновано, что плазменная струя является несамостоятельным ВЧ-разрядом комбинированного типа со свойствами, существенно отличающимися от свойств ВЧИ-разряда пониженного давления в разрядной камере: в струе возникают дополнительные составляющие электромагнитного поля, которые отсутствуют в разрядной камере — азимутальная компонента магнитного поля H_ϕ до 120 А/м, аксиальная компонента электрического поля E_z до 250 В/м, потенциальное электрическое поле $E_{с\text{ар}}$ до 500 В/м, — вызванные разностью потенциалов между индуктором и стенками вакуумной камеры и характерной плазмодинамической структурой струи, которая заключается в чередовании слоев положительного и отрицательного объемных зарядов (пп. 13, 17 паспорта специальности 1.1.9);

3. Впервые создана единая математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, которая учитывает (пп. 13, 19 паспорта специальности 1.1.9):

- переходный режим течения в диапазоне чисел Кнудсена для несущего газа в плазменной струе и слое положительного заряда при $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$
- влияние метастабильных атомов и ионов на баланс энергий и частиц в разряде,
- потенциальную и вихревую компоненты электрического поля,
- немасвелловский вид функции распределения электронов по энергиям,
- коэффициенты переноса и ионизации, рассчитанные по функции распределения электронов по энергиям, полученной с помощью решения кинетического уравнения Больцмана.

За счет этого достигается не только качественное, но и количественное согласование расчетных параметров с экспериментальными данными;

4. Показано, что влиянием потенциальной составляющей электромагнитного поля на функцию распределения электронов по энергиям в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления можно пренебречь по причине преобладания процессов конвекции над диффузией и экранировки плазменного ступка от аксиальной составляющей напряженности электрического поля за счет сильного вихревого электромагнитного поля (п. 17 паспорта специальности 1.1.9);
5. Разработан гибридный метод численной реализации единой математической модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления на основе соединения метода прямого статистического моделирования для расчета характеристик течения нейтральных атомов в области плазменной струи и слоя положительного заряда около образца с методами конечных элементов и конечных объемов для расчета характеристик потока заряженных частиц, метастабилей и электромагнитного поля во всех областях течения с учетом зависимости функции распределения электронов по энергиям от частоты электромагнитного поля (п. 19 паспорта специальности 1.1.9);
6. Выявлены основные особенности течения ВЧ-плазмы пониженного давления в невозмущенном потоке и при обтекании твердого тела, а именно: обнаружена слоистая структура ВЧ-струи, представляющая собой чередование областей, в которых нарушается электронейтральность, подтверждено наличие в струе как азимутальной составляющей магнитного поля H_ϕ , так и аксиальной составляющей электрического поля E_z , численно подтверждено, что ВЧ-плазменная струя не является потоком рекомбинационной плазмы. Это теоретически доказывает, что ВЧИ-плазменная струя пониженного давления является несамостоятельным видом разряда комбинированного типа (пп. 6, 17 паспорта специальности 1.1.9);
7. Установлено, что максимальные значения концентрации электронов, температуры электронов и температуры плазмообразующего газа достигаются при различных значениях частоты электромагнитного поля, что позволяет управлять процессами взаимодействия ВЧИ-плазменной струи с твердым телом (п. 16 паспорта специальности 1.1.9);
8. Впервые, в результате численных экспериментов теоретически предсказан и экспериментально подтвержден эффект образования зоны перегрева по периферии струи около входного отверстия вакуумной камеры, в которой температура потока выше температуры в центре потока более 50°C при скорости потока на входе в вакуумную камеру более 440 м/с и мощности разряда более $2,4 \text{ кВт}$ при расходе плазмообразующего газа более $0,16 \text{ г/с}$. Данный эффект количественно согласуется с результатами экспериментальных исследований (пп. 5, 6, 16 паспорта специальности 1.1.9).

Эти результаты являются оригинальными, обладают высокой научной ценностью и развивают фундаментальные представления о механике жидкости, газа и плазмы.

4. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в разработке научных основ создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления как нового вида разряда, в развитии математического аппарата описания многокомпонентных плазменных потоков, в том числе в условиях переходного режима газа. Модель может использоваться как для исследования ВЧИ-разрядов, так и для других типов низкотемпературной плазмы.

Практическая значимость работы выражается в следующем:

- результаты внедрены в деятельность промышленных предприятий (плазменная обработка медицинских инструментов, нанесение покрытий, стерилизация);
- создан программный комплекс для прогнозирования характеристик плазменных установок; достигнут значительный экономический эффект (более 13 млн рублей);
- определены значения частоты электромагнитного ВЧ-поля при которых достигаются максимальные величины концентрации электронов, электронной температуры и температуры плазмообразующего газа в зависимости от мощности разряда;
- разработаны технологические основы применения полученных выводов при создании и внедрении конструкций ВЧИ-плазменных установок, при разработке технологических процессов модификации твердых тел.

Таким образом, работа имеет прикладную ценность для машиностроения, медицины и материаловедения.

5. Содержание диссертации

Диссертация включает введение, шесть глав, заключение, список литературы и приложение. Диссертационная работа Шемахина А.Ю. построена по традиционной логике докторских исследований. Общий объем текста составляет 335 страниц, включая 120 рисунков и 20 таблиц, 281 источник литературы.

Во введении автор обосновывает актуальность исследования, которая определяется возрастающим интересом к струйным ВЧИ-разрядам в задачах обработки материалов, микроэлектроники и медицины. Отмечается, что существующие теоретические подходы разрознены: одни описывают процессы в объеме плазмы, другие — структуру струи, но практически отсутствуют модели, которые учитывали бы образование положительного пространственного заряда вблизи поверхности твердого тела. Цель работы формулируется

как разработка научных основ создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления путем разработки комплексной модели струйного ВЧИ-разряда, а задачи включают как построение системы уравнений, так и создание численных алгоритмов, а также экспериментальную проверку результатов.

Первая глава посвящена обзору литературы. Автор проанализировал как отечественные, так и зарубежные исследования, начиная с классических работ по физике газоразрядной плазмы и заканчивая современными публикациями в журналах *Plasma Sources Science and Technology*, *Journal of Applied Physics* и *IEEE Transactions on Plasma Science*. Важно, что обзор не ограничивается констатацией результатов, а включает критический анализ: показаны сильные стороны существующих подходов и выявлены пробелы. Автор справедливо отмечает, что роль приповерхностных эффектов в формировании параметров струйной плазмы остаётся недооценённой. Обзор завершается формулировкой научной гипотезы о необходимости включения слоя положительного заряда в общую модель. Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава описывает экспериментальную базу исследования. Подробно приведены схемы установки (рис. 2.1–2.2), характеристики генератора, вакуумной системы и систем подачи газа. Автор применил комплекс методов диагностики: электрические зонды, оптическую спектроскопию, СВЧ-зондирование, тепловую визуализацию. Особое внимание уделено приповерхностному слою: на рис. 2.20–2.22 представлены графики энергии ионов и плотности ионного тока вблизи поверхности. Эти данные обладают самостоятельной научной ценностью, поскольку впервые получены для данного диапазона давлений (13,3–133 Па) и режимов работы. В главе на основе экспериментальных данных делается вывод о том, что плазменная струя ВЧИ-разряда в диапазоне давлений 13,3–133 Па представляет собой отдельную разновидность ВЧИ-разряда.

Третья глава посвящена разработке физико-математической модели. Автор формулирует систему уравнений: газодинамика плазмообразующего газа описывается кинетическим уравнением Больцмана (формулы (3.27)–(3.30)), динамика заряженных и возбужденных частиц описывается уравнения неразрывности для электронов, ионов и метастабилей (формулы (3.31)–(3.42)), энергетический баланс – уравнением сохранения энергии (формулы (3.43)–(3.44)), электромагнитное поле – уравнениями Максвелла (3.45–3.59), учитывается уравнение для распределения электронов по энергиям, а также выделяется блок, описывающий слой положительного заряда (3.130–3.139). Подробно обсуждаются граничные условия: на стенках

камеры и на границе плазмы с поверхностью. Автор чётко указывает ограничения применимости модели, что свидетельствует о научной добросовестности.

Четвёртая глава раскрывает методы численного решения. Разработаны алгоритмы решения задачи в области разрядной камеры, слоя положительного заряда, приповерхностного слоя и плазменной струи. Для расчета параметров струи разработан гибридный численный метод, сочетающий метод прямого статистического моделирования (DSMC) для несущего газа с методом конечных объемов для остальных уравнений системы. Алгоритм представлен в виде схемы (рис. 4.3), приводятся критерии сходимости (с. 158). Автор показывает, что использование гибридного подхода позволяет существенно снизить вычислительные затраты при сохранении точности. В главе разработана методика сквозного моделирования, позволяющая при заданных параметрах поддержания разряда, получить значения энергии ионов и ионного тока, поступающего на поверхность твердого тела.

Пятая глава содержит результаты численного моделирования. Проведена валидация и верификация численной модели. На рис. 5.12–5.27, 5.34–5.72 приведены пространственные распределения электронной температуры, концентрации электронов, ионов и метастабилей, напряженностей электромагнитного поля, скорости, давления и температуры несущего газа. Исследованы частотные зависимости в разрядной камере струйного ВЧИ-разряда пониженного давления. Показана необходимость использования немаксвелловской ФРЭЭ. Особое внимание уделено влиянию слоя положительного заряда: показано, что его учёт позволяет воспроизвести характерное изменение профилей вблизи поверхности (рис. 5.73–5.78). Сравнение с экспериментом показывает несовпадение в пределах 10–15%. Представлены расчеты значений энергии ионов и плотности ионного тока, приходящиеся на поверхность диэлектрического твердого тела в зависимости от давления плазмообразующего газа, траектории ионов в приповерхностном слое около заряженной поверхности при наличии шероховатостей (рис 5.80). В результате численных экспериментов обнаружен эффект образования зоны перегрева по периферии струи около входного отверстия вакуумной камеры. Выявлено образование слоистой структуры разряда в ВЧ-плазменной струе, представляющее собой чередование зон преобладания положительных и отрицательных зарядов. Определены характеристики струйного ВЧИ-разряда пониженного давления при обтекании твердого тела, в зоне СПЗ и приповерхностном дебаевском слое, а именно: определена область формирования потока ионов с равномерным распределением концентрации электронов и температуры несущего газа.

Шестая глава посвящена прикладным аспектам. Автор демонстрирует возможности использования модели для оптимизации технологических процессов: улучшения эксплуатационных характеристик медицинских инструментов, плазменной обработки поверхности, нанесения покрытий. Приведены примеры внедрения в промышленность и экономический эффект, превышающий 13 млн рублей. Созданы научные и технологические основы разработки ВЧИ-плазменных установок и технологических процессов с использованием струйного ВЧИ-разряда пониженного давления. Разработаны рекомендации по выбору параметров течения рабочего газа для равномерной обработки изделий в потоке ВЧ-плазмы пониженного давления, в том числе для полировки стали марки 40Х13 и параметры взаимодействия с поверхностью твердого тела.

Заключение суммирует основные результаты и подчёркивает, что предложенная модель является универсальной основой для дальнейших исследований и практических разработок.

В приложении размещены акты внедрения.

Таким образом, структура работы выстроена логично и последовательно, каждая глава дополняет предыдущие, а итоговый результат представляет собой законченный научный труд, сочетающий фундаментальные разработки и прикладные перспективы. В заключении выделены ключевые результаты: доказательство нового типа разряда, создание предиктивной модели, внедрение результатов с экономическим эффектом. Приложение содержит результаты внедрения.

Автореферат диссертации в полной мере отражает диссертационную работу, объем выполненных исследований, подтверждает обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов, полностью соответствует содержанию диссертации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием современных аттестованных измерительных средств, анализом точности измерений, тестированием численных методов и программ на решениях модельных задач, валидацией программного комплекса, сравнением результатов численного моделирования с собственными экспериментальными данными, а также с известными данными теоретических и экспериментальных исследований ряда других авторов.

Результаты исследований прошли достаточную **апробацию** на всероссийских и международных научных конференциях, опубликованы в 23 работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов докторской диссертации, в том числе, входящих в базы данных Scopus и WoS, в 6 иных рецензируемых научных изданиях и в одной монографии.

6. Критический анализ содержания работы

Работа выполнена на высоком уровне, однако можно отметить следующие моменты:

1. В главах 2 и 5 влияние газового состава на характеристики струи рассмотрено ограничено (основное внимание уделено аргоновой плазме).
2. В главах 5 и 6 недостаточно подробно исследованы вопросы масштабирования моделей к установкам большой мощности.
3. В литературном обзоре целесообразно было бы более широко рассмотреть зарубежные исследования последних лет, в частности за 2020-2024 годы в списке литературы значатся около 16 работ.
4. В п. 5.2.4 и 5.5 рекомендации по оптимальной частоте не подтверждены экспериментально, рассмотрены только экспериментальные данные по точке 1,76 МГц. Выводы о максимизации температурного и ионного воздействия основаны исключительно на моделировании.
5. Целесообразно было бы провести дополнительные исследования величины падения потенциала на катодном слое у объекта обработки в зависимости от типа объекта (металл, диэлектрик, керамика) и величины коэффициента эмиссии, т.к. это будет определять энергию ионов. Энергия ионов 30-50 эВ при бомбардировке металлической поверхности будет достигаться при концентрации ионов $>10^{18} \text{ м}^{-3}$, а не 10^{16} м^{-3} (как указано на стр. 12) за счет увеличения частоты перезарядки ионов при увеличении ширины катодного слоя у объекта.

Тем не менее, указанные замечания носят частный характер и не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение

Диссертация Шемахина А.Ю. «Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком

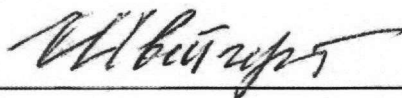
исследовательском уровне, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения в области воздействия потоков плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления на поверхности твердых тел для модификации их функциональных и эксплуатационных показателей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных организациях, занимающихся исследованиями и разработками в области применения плазменных методов модификации характеристик материалов, а также на машиностроительных, медико-инструментальных, авиастроительных и других производственных предприятиях при внедрении и отработке технологических процессов с использованием высокочастотной плазменно-струйной обработки изделий и создании установок для реализации этих технологических процессов.

Диссертационная работа Шемакина А.Ю. полностью соответствует требованиям п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Результаты диссертации доложены и обсуждены, отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара ИТПМ 15 сентября 2025 года (Протокол №104 от 15.09.2025). Присутствовало 15 чел., в том числе 10 докторов и 5 кандидатов наук. Результаты голосования “за” – 15, “против” – 0, “воздержался” – 0.

Швейгерт Ирина Вячеславовна



доктор физико-математических наук, 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы»,
ведущий научный сотрудник ИТПМ СО РАН

Почтовый адрес:

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Тел.: +7(383) 330-85-34 Факс: +7(383) 330-72-68 E-mail: admin@itam.nsc.ru

Веб-сайт: <http://www.itam.nsc.ru>

Вход. № 05-8571
« 01 » 10 20 25 г.
подпись 