

ОТЗЫВ

официального оппонента

Знаменской Ирины Александровны

доктора физико-математических наук, профессора кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

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"

Диссертационная работа Шемахина А.Ю. посвящена разработке математической модели струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела с использованием данных экспериментальных исследований. Данная работа направлена на решение важной научно-технологической проблемы, связанной с созданием основ для разработки новых технологий плазменной модификации материалов.

Актуальность данной работы обусловлена несколькими факторами.

- В современных условиях инновационного развития промышленности особую значимость приобретают технологии плазменной обработки материалов, позволяющие существенно улучшать эксплуатационные характеристики изделий.
- Использование для плазменной обработки струйного ВЧИ-разряда представляет собой сложную и ресурсоемкую задачу, что обуславливает необходимость разработки адекватных математических моделей, позволяющих прогнозировать параметры плазменной обработки расчетным путем.
- Существующие подходы к моделированию ВЧИ-разрядов пониженного давления обладают существенными ограничениями, так как не учитывают в полной мере специфику струйных течений плазмы и особенности взаимодействия плазменного потока с обрабатываемой поверхностью.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Представленные в диссертации Шемахина А.Ю. научные положения, выводы и рекомендации, отличаются достаточно высокой степенью обоснованности, что обусловлено следующим:

1. Проведен комплексный анализ современного состояния проблемы, охватывающий как теоретические аспекты соответствующих разделов механики газа и плазмы, так и практические приложения плазменных технологий;
2. Проведены экспериментальные исследования характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, включающие зондовые измерения параметров плазмы; СВЧ-

зондирование; интерферометрические методы; анализ энергетических характеристик газоплазменного потока;

3. Положения, сформулированные в результате анализа данных экспериментальных исследований, подтверждены результатами моделирования;
4. Проведена верификация и валидация модели путем сравнения с аналитическими решениями модельных задач, результатами других авторов, собственными экспериментальными данными;
5. Практическое применение разработанной автором модели обосновывается результатами внедрения.

3. Научная новизна исследования

К наиболее значимым новым результатам относятся:

1. Впервые обосновано, что плазменная струя ВЧИ-разряда пониженного давления представляет собой несамостоятельный комбинированный разряд, существенно отличающийся по своим характеристикам от классических форм ВЧ-разрядов.
2. Разработана оригинальная концепция многомасштабной структуры струйного разряда, включающая область самостоятельного Н-разряда в разрядной камере, зону несамостоятельного комбинированного разряда в плазменной струе, слой положительного заряда у поверхности обрабатываемого образца.
3. Расчетom установлен и экспериментально подтвержден эффект перегрева периферийных областей плазменной струи, проявляющийся при скоростях потока свыше 440 м/с и мощности разряда более 2,4 кВт.
4. Создан новый гибридный численный метод, позволяющий проводить сквозное моделирование процессов в струйном ВЧИ-разряде с учетом переходного режима течения ($0,016 \leq K_n \leq 0,48$), немаксвелловского распределения электронов по энергиям, влияния метастабильных частиц, сложной структуры электромагнитного поля.

4. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в существенном развитии представлений о физике струйных ВЧ-разрядов пониженного давления. В частности, установлены закономерности формирования пространственной структуры таких разрядов, определены механизмы поддержания ионизации в плазменной струе, исследованы процессы взаимодействия плазменного потока с поверхностью твердого тела.

Практическая ценность исследования заключается в том, что разработаны методики расчета параметров ВЧИ-плазменных установок. Также созданы технологические основы плазменной обработки медицинских инструментов, результаты внедрены в производство (ООО "Плазма-ВСТ", ООО "Медтехника", ООО НПФ «ХЭЛП»), получен экономический

эффект в размере более 13 млн рублей, разработаны практические рекомендации по выбору оптимальных режимов плазменной обработки в зависимости от частоты электромагнитного поля, мощности разряда, расхода плазмообразующего газа.

5. Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 335 страниц со 120 рисунками и 20 таблицами. В списке литературы - 281 наименование.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, подчёркивается необходимость комплексного подхода к описанию струйного ВЧИ-разряда, а также обосновывается актуальность работы для теории и практики механики жидкости, газа и плазмы.

Первая глава носит обзорный характер и содержит детальный анализ современных направлений моделирования плазменных процессов. Автор последовательно рассматривает аналитические и численные методы, отмечает их преимущества и недостатки. Особое внимание уделено проблеме корректного описания переходных режимов течения газа и электромагнитных эффектов.

Во второй главе изложена экспериментальная часть работы, которая играет существенную роль при валидации моделей. Приведены схемы экспериментальной установки, методики диагностики и полученные экспериментальные данные, в частности, распределение температуры несущего газа, потенциала плазмы, плотности тока и др.

Третья глава — одна из центральных частей диссертации. В ней автор строит систему уравнений для описания многокомпонентной плазмы с учётом переноса массы, импульса, энергии и электромагнитного поля. Приводятся подробные математические выкладки (формулы (3.1)–(3.145)), рассматриваются особенности слоя положительного заряда у поверхности, вводятся уточнённые граничные условия. Эта глава отличается высоким уровнем строгости и глубины изложения. Разработанная модель уникальна по набору и количеству уравнений, использованию вычисляемой ФРЭЭ в каждой точке геометрии модели ВЧИ-плазменной установки, использованию телеграфных уравнений в сочетании с уравнением Пуассона для описания как потенциальной, так и вихревой компонент плазмы.

Четвёртая глава посвящена методам решения поставленных задач. Разработан оригинальный гибридный численный алгоритм, объединяющий метод DSMC для несущего газа и метод конечных объемов для потока заряженных частиц. Автор описывает структуру алгоритма, процесс сходимости и тестовые расчёты, демонстрирующие корректность метода. На рис. 4.3 показана схема алгоритма. Разработана методика сквозного моделирования, позволяющая при заданных параметрах поддержания разряда, получить значения энергии ионов и ионного тока, поступающего на поверхность твердого тела.

В пятой главе представлены результаты численного моделирования. Здесь показано, как изменяются распределения температуры, давления, скорости несущего газа, концентрации электронов, ионов и метастабилей, электромагнитных параметров полей в зависимости от характеристик питания в разных частях геометрии установки. Сопоставление с экспериментальными данными (рис. 5.3–5.4) показывает, что модель валидирована успешно.

Автор демонстрирует значимость учёта приповерхностного слоя, в котором происходит либо полировка, либо неизбирательная обработка металлов. Нахождение этих параметров является ярким примером решения прикладной задачи с помощью единой математической модели. Обнаружены эффекты перегрева и наличия слоистой структуры разряда, выявлены частоты для максимизации температуры и характеристик потока ионов на поверхность твердого тела, установлено, что струя ВЧИ-разряда является новым видом ВЧ-разряда пониженного давления.

Шестая глава демонстрирует прикладной потенциал предложенной модели и программного комплекса. Приведены примеры внедрения в промышленность и медицину, что подтверждает практическую ценность работы. Разработаны научные основы использования струйного ВЧИ-разряда и технологические основы применения струйного ВЧИ-разряда пониженного давления.

Заключение подводит итог исследования, формулирует основные выводы, отражающие как теоретические, так и прикладные достижения.

Приложение содержит дополнительные материалы, включая результаты внедрения.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации, отражает объем выполненных исследований, подтверждает достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием аттестованных измерительных приборов, проведенным анализом точности измерений, тестированием программ и численных методов на решениях модельных задач, сравнением результатов математического моделирования с различными источниками - собственными экспериментальными данными, известными данными теоретических и экспериментальных исследований других авторов, то есть выполнена верификация и валидация разработанной модели.

Результаты исследований представлены 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, прошли достаточную **апробацию** на всероссийских и международных научных конференциях.

6. Критический анализ содержания работы

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на достаточно высоком уровне. Вместе с тем работа не лишена недостатков.

1. В главе 6 описано внедрение разработанного метода в промышленность, однако в диссертации отсутствует информация о сроках эксплуатации установок и статистике отказов, что позволило бы объективно оценить надежность предложенного решения.
2. Приведенные на рис. 2.18 изображения получены методом голографической двухлучевой интерферометрии, разработанным и подробно описанным в монографии Белозерова А.Ф. 2007г. В описании рис. 2.18: "Исследования интерферограмм

плазменного потока у поверхности твердого тела (п. 2.1.2) показали, обнаруживают наличие характерного излома интерференционных полос” (орфография сохранена). Интерферограмм - 2, очевидно, они получены для разных режимов. Непонятно, о каком изломе идет речь. Пространственные координаты для изображений не указаны.

3. На стр 74: “... изменение показателя преломления среды, который зависит от длины волны...”. Показатель преломления среды не зависит от длины волны.
4. Приведенное на Рис 2.6 б изображение не является изображением структуры струи.
5. В тексте встречается много опечаток, неточностей, особенно в главе 3, что влияет на восприятие работы. К примеру, только на стр. 68 – 72: с.68 - Оборудования ... включает; с.71 - Устройства контроля... включает; ВЧИ-разряда пониженного проводились; 72 – клориметрированием... и.т.д.

Однако эти замечания не снижают общей высокой оценки выполненной диссертантом работы.

7. Соответствие диссертации критериям ВАК

Диссертационная работа Шемакина А.Ю. полностью соответствует требованиям п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям:

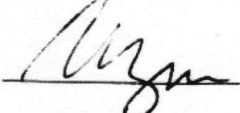
1. Диссертационная работа представляет собой научно-обоснованные разработки для решения важной научной проблемы в области механики жидкости, газа и плазмы, имеющей большое хозяйственное значение. Разработаны научные основы создания струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления, которые включают единую математическую модель, позволяющую проводить расчет конструктивных параметров ВЧИ-плазменных установок и технологических параметров процессов обработки твердых тел в плазменной струе.
2. Полученные результаты имеют существенное значение для развития теории и приложений механики жидкости, газа и плазмы.
3. Методология исследования соответствует современным научным стандартам.
4. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах.
5. Объем и структура диссертации соответствуют установленным требованиям.

Заключение

Диссертация Шемакина Александра Юрьевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, вносящую существенный вклад в развитие механики жидкости, газа и плазмы, плазменных технологий. Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение.

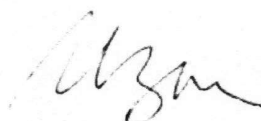
Работа выполнена на высоком научном уровне, соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 "Механика жидкости, газа и плазмы".

Я, Знаменская Ирина Александровна, согласна на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

15 сентября 2025 г.  И.А. Знаменская

15 сентября 2025 г.

Официальный оппонент



Знаменская Ирина Александровна

доктор физико-математических наук, профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, znamenskaya@phys.msu.ru

Подпись проф. Знаменской И.А. заверяю
Ученый секретарь физического ф-та МГУ



Д.ф.-м.н Профессор Стремоухов С.Ю.



ход. № 05-8572
« 01 » 10 2025 г.
подпись 