

ОТЗЫВ

официального оппонента

Нагулина Константина Юрьевича

доктора технических наук, профессора кафедры лазерных и аддитивных технологий
Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.

Туполева-КАИ

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

Работа посвящена разработке математической модели струйного высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления, учитывающей наличие слоя положительного заряда у поверхности твердого тела. Тематика диссертационной работы, несомненно, является актуальной по следующим причинам.

Во-первых, плазменная обработка поверхности материалов, в том числе в струе ВЧИ-разряда, занимает ключевое место среди современных методов модификации поверхности материалов и изделий, обеспечивающих повышение их долговечности, износостойкости и придание им новых функциональных свойств.

Во-вторых, оптимизация технологических процессов, основанная только на результатах экспериментальных исследований, существенно ограничена как в наборе исходных данных, так и в допустимых режимах, которые не всегда поддаются экстраполяции. Численное моделирование физических процессов, основанное на их математической модели, дают более широкий простор для оптимизации таких процессов.

В-третьих, модели ВЧИ-разрядов, представленные в литературе, как правило, не учитывают особенности струйных течений, переходный характер движения нейтральной компоненты, а также специфическую роль приповерхностного слоя и слоя положительного заряда.

Таким образом, диссертация Шемахина А.Ю. закрывает существенный пробел в современной теории и практике плазмодинамики.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Автором проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования, обеспечивающие высокую степень достоверности полученных результатов.

Экспериментальная часть включает диагностику ВЧИ-плазмы различными методами: зондовыми измерениями, интерферометрией, СВЧ-зондированием, анализом ионных потоков. Степень достоверности полученных экспериментальных результатов обеспечивается использованием современных аттестованных измерительных средств, анализом точности измерений.

Теоретическая часть основана на построении системы уравнений, описывающих динамику плазмы в разрядной камере, струе, слое положительного заряда и приповерхностном слое.

Для численной реализации разработан оригинальный гибридный подход, сочетающий метод прямого статистического моделирования (для нейтральной компоненты) и методы конечных элементов/объемов (для заряженных частиц и электромагнитных полей).

Проведена верификация и валидация модели. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными автора и независимыми публикациями показывает расхождение не более 10–15 %, что можно считать высокой степенью соответствия.

Рекомендации по использованию разработанных методов основаны не только на расчетах, но и на результатах внедрения в практику. Это подтверждает обоснованность выводов и прикладную ценность исследования.

3. Научная новизна исследования

В работе получен ряд новых результатов, обладающих высокой степенью научной новизны:

1. Впервые предложена и реализована единая математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, учитывающая разнородные физические процессы в разрядной камере, струе, слое положительного заряда и приповерхностной области.
2. Теоретически доказано и подтверждено расчетами, что плазменная струя является самостоятельным комбинированным разрядом, что существенно отличается от классических представлений о ВЧ-разрядах.
3. Выявлен и количественно описан эффект перегрева периферии струи, наблюдающийся при высоких скоростях потока и мощностях разряда.
4. Разработан гибридный численный метод, объединяющий разные подходы к моделированию нейтральной и заряженной компонент, что позволяет адекватно учитывать переходный режим течения ($0,016 \leq K_n \leq 0,48$).

5. Впервые показано, что в плазменной струе формируются дополнительные компоненты электромагнитного поля, отсутствующие в области разрядной камеры.

Все эти результаты имеют оригинальный характер и представляют собой вклад в развитие механики жидкости, газа и плазмы и численных методов газо- и плазмодинамики.

4. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в развитии представлений о механизмах формирования характеристик струйной ВЧИ-плазмы. Разработанная модель позволяет описывать не только основные макропараметры потока, но и особенности распределения заряженных частиц, электрических и магнитных полей, что ранее не учитывалось.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов: Разработанный программный комплекс применён для расчета характеристик плазменных установок в различных режимах. На разработанные программы получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Полученные данные использованы при разработке технологий упрочнения и полировки медицинских инструментов (ООО «Плазма-ВСТ», ООО «Медтехника», НПФ «ХЭЛП»), о чем имеются акты внедрения. Экономический эффект внедрения составил более 13 млн рублей, что подтверждает ценность работы не только в научном, но и в прикладном плане. Необходимо отметить и значительный социальный фактор практической значимости, поскольку внедрение осуществлялось в области производства медицинского оборудования и инструментов.

5. Содержание диссертации

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

Во введении обоснована актуальность темы, связанной с разработкой математической модели струйного высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления. Определены цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ современных исследований в области ВЧИ-плазмы, включая модели разрядов, слоя положительного заряда (СПЗ) и функции распределения электронов по энергиям. Рассмотрены существующие численные методы и программные комплексы для моделирования газо- и плазмодинамики. Особое внимание уделено

технологическим применениям ВЧ-плазмы, включая обработку медицинских инструментов. На основе анализа сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований струйного ВЧИ-разряда. Описана установка, методы диагностики (зондовые измерения, СВЧ-зондирование, магнитные зонды и др.), а также полученные данные о характеристиках плазмы в разрядной камере, струе и при взаимодействии с твёрдым телом. Экспериментально установлено, что плазменная струя является самостоятельным комбинированным разрядом, отличающимся от классических форм ВЧ-разрядов.

В третьей главе разработана математическая модель струйного ВЧИ-разряда, объединяющая четыре области: разрядную камеру, плазменную струю, СПЗ и приповерхностный слой. Модель включает уравнения для течения нейтрального газа, динамики заряженных частиц, электромагнитных полей и энергетических процессов. Особое внимание уделено учёту переходного режима течения и немаксвелловской функции распределения электронов, что выделяет эту модель среди других моделей ВЧ-плазмы и является существенной научной новизной исследования.

В четвёртой главе описан алгоритм и численные методы решения поставленных задач. Разработан гибридный подход, сочетающий метод статистического моделирования для нейтрального газа и методы конечных элементов/объёмов для плазмы и электромагнитных полей. Приведены детали реализации программного комплекса на базе пакетов OpenFOAM, COMSOL и MATLAB.

В пятой главе представлены результаты численных экспериментов, включая распределения концентраций частиц, температур, полей и других параметров. Проведены верификация и валидация модели, подтверждены эффекты слоистой структуры струи, наличия дополнительных компонент электромагнитного поля и перегрева периферии потока. Результаты расчетов доказывают, что струя является новым видом ВЧ-разрядов, обладающим характеристиками, существенно отличающимися её от известных ранее видов ВЧ-разрядов по структуре ЭМП и степени ионизации.

В шестой главе сформулированы научные основы создания струйного ВЧИ-разряда и технологические рекомендации для разработки установок и процессов обработки материалов. Описано практическое применение результатов в медицине и промышленности, включая увеличение прочности медицинских инструментов.

В заключении подведены итоги работы, выделены ключевые достижения: доказательство нового типа разряда, создание предиктивной модели, внедрение результатов с экономическим эффектом.

Приложение содержит акты о внедрении результатов диссертационного исследования в производственную деятельность трех промышленных предприятий: ООО «Плазма-ВСТ», ООО «Медтехника», НПФ «ХЭЛП».

Структура диссертации четко выстроена, главы взаимосвязаны, материал изложен логично и последовательно.

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

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием аттестованных измерительных приборов, учтен анализ точности измерений, сравнением результатов математического моделирования с собственными экспериментальными данными, с известными данными экспериментальных и теоретических исследований других авторов, проведено тестирование численных методов и программ на решениях модельных задач.

Результаты исследований прошли необходимую **апробацию** на всероссийских и международных научных конференциях, опубликованы в 23 работах в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов докторской диссертации, в том числе, есть работы из баз данных Scopus и WoS, существует и одна монография. Зарегистрированы два результата интеллектуальной деятельности в виде программ для ЭВМ.

6. Критический анализ содержания работы

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне.

Следует отметить отдельные моменты, требующие внимания:

1. В разделе «Степень разработанности темы» при перечислении основных групп исследователей, работающих в области физики плазмы ВЧ- разрядов, по непонятной причине совершенно упущены работы группы проф. Гильмутдинова А.Х., причем работы проводились с 80-х годов, начиная с экспериментального исследования и моделирования ВЧ спектральных источников излучения для аналитической спектрометрии, далее источники индуктивно – связанной плазмы для эмиссионной и масс-спектрометрии и, наконец, технологической ИСП. Были разработаны математические модели ИСП 3-х мерные в пространстве и с динамикой во времени.

2. В работе недостаточно подробно описан вопрос использования расчетной сетки совместно методом ПСМ и МКО.
3. В работе в основном приведено сопоставление с собственными экспериментами автора, сравнительный анализ с результатами других групп выполнен менее детально.
4. Утверждение о несамостоятельности разряда несколько преуменьшено. Согласен, разрядная камера является предионизатором, однако симметрия относительно базовой плиты между ВЧИ-разрядом в разрядной камере и струей отсутствует, что может характеризовать струю как самостоятельный вид разряда.
5. Проводилась ли автором оценка погрешности моделирования электромагнитных полей индуктора, связанной с наклоном плоскости витков реального индуктора относительно его оси? В используемой автором упрощенной модели наклон витков не учитывается. Тем не менее, в реальном индукторе отклонение вектора магнитной индукции от вертикали приводит к появлению в плазменном потоке вихревых процессов, как показано в работе M. Voronov, I. Tsivilskiy, R. Nazarov, K. Nagulin, A. Gilmudinov, Force-based analysis of vortices in atmospheric pressure ICPs, Plasma Sources Sci. Technol. (2018), <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaef1c>.
6. Описание экспериментального оборудования представлено недостаточно полно: не ясно, использовался серийный или оригинальный ВЧ генератор, как была модифицирована трубка Пито.
7. Стр.141, рисунок 3.7. Отсутствуют обозначения (а), (б), (в), (г). Также нет информации об оборудовании, на котором измерялись параметры шероховатости поверхности.
8. Стр.176, рисунок 5.3, стр.188, рисунок 5.13, стр.189, рисунок 5.14, стр.192, рисунок 5.18, стр.197, рисунок 5.22, стр.199 - 201, рисунок 5.23, 5.24, 5.25 подписи по осям на английском языке.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают высокой научной и практической ценности исследования.

Заключение

Диссертация Шемахина А.Ю. «Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком 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.

Диссертационная работа Шемахина 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».

Я, Нагулин Константин Юрьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

30 сентября 2025 г.

 К.Ю. Нагулин

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор

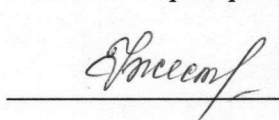
Нагулин К.Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

 К.Ю. Нагулин

Подпись Нагулина К.Ю. заверяю

Ученый секретарь Ученого совета университета



/Ф.А. Жестовская/



Нагулин Константин Юрьевич - доктор технических наук, профессор кафедры лазерных и аддитивных технологий, 05.11.13 — «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Почтовый адрес: 421001, Россия, г. Казань, ул. Четаева 18а

Контакты: +7 843 23 11 625, внутренний номер 8625, knagulin@mail.ru