

ОТЗЫВ

официального оппонента

Пака Александра Яковлевича

доктора технических наук, профессора отделения электроэнергетики и электротехники

Национального исследовательского Томского политехнического университета

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

Современное развитие электроэнергетики, материаловедения и медицинской техники сопровождается активным внедрением плазменных технологий. В частности, высокочастотный индукционный (ВЧИ) разряд пониженного давления используется для очистки и модификации поверхности, осаждения тонких пленок, стерилизации и получения наноструктурированных материалов.

Вместе с тем, несмотря на богатый экспериментальный опыт эксплуатации плазменных установок, фундаментальные механизмы образования и эволюции струйной ВЧИ-плазмы остаются недостаточно изученными. Многие работы описывают либо поведение плазмы внутри разрядной камеры, либо параметры струи без учета приповерхностных эффектов и роли положительного заряда на твердой границе.

Таким образом, актуальность диссертации Шемахина А.Ю. определяется необходимостью комплексного подхода к моделированию струйных ВЧИ-разрядов, который позволит объединить в рамках одной модели процессы в камере, в струе и в приповерхностной области.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Автором представлен разносторонний анализ процессов в ВЧИ-плазме пониженного давления. Для повышения достоверности результатов он сочетает:

- Экспериментальные методы: электрические зонды, спектроскопия излучения, термографические измерения поверхности, СВЧ-зондирование.
- Математическое моделирование: система уравнений неразрывности и сохранения энергии для ионов, электронов, метастабилей и уравнение Больцмана для нейтралов, дополненная уравнениями Максвелла.

- Численные методы: гибридный подход, в котором нейтральная компонента рассчитывается методом прямого статистического моделирования (DSMC), а заряженные частицы и поля – методами конечных элементов и объемов.

Обоснованность результатов подтверждается сопоставлением расчетов с экспериментами, выполненными как автором, так и другими исследователями. В ряде случаев совпадение по ключевым параметрам составляет 90–95 %.

Таким образом, научные положения и выводы диссертации имеют достаточную степень надежности и могут быть использованы в практических разработках.

3. Научная новизна

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

1. Разработана комплексная математическая модель струйного ВЧИ-разряда, учитывающая все основные физические области: камеру, приповерхностный слой и область положительного заряда у границы твердого тела.
2. Выявлен новый эффект комбинированного характера плазменной струи, сочетающей признаки самостоятельного и несамостоятельного разряда.
3. Получено количественное описание влияния слоя положительного заряда на устойчивость и структуру плазменной струи.
4. Разработан и реализован гибридный численный метод, позволяющий корректно описывать переходный режим течения газа при $Kn = 0,01–0,5$.
5. Установлены закономерности формирования пространственного распределения температуры и концентраций метастабильных частиц, влияющих на энергообмен в струе.

Эти результаты представляют собой принципиально новое направление в исследовании струйных ВЧИ-плазм и имеют важное значение для дальнейшего развития науки и техники.

4. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в развитии математического аппарата моделирования многокомпонентной плазмы при пониженном давлении. Автор предложил универсальный подход, который может быть адаптирован не только для струйных ВЧИ-разрядов, но и для других типов низкотемпературной плазмы.

Практическая значимость подтверждается:

- внедрением результатов в работу промышленных предприятий, где они использованы при оптимизации режимов плазменной обработки;

- применением модели для прогнозирования ресурса и надежности плазменных систем, используемых в медицине и микроэлектронике;
- созданием оригинального программного комплекса, который может служить инструментом для инженеров и исследователей при проектировании установок.

Экономическая эффективность внедрений превышает 13 млн. рублей, что подтверждает востребованность полученных результатов.

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. Обозначена прикладная цель исследования: создание такой модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, которая позволяет не только описывать фундаментальные физические процессы, но и служит инструментом для инженерных расчётов. Автор акцентирует внимание на том, что существующие теоретические модели не часто находят прямое применение в производственных условиях. 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. Автор указывает, что большинство моделей ограничиваются либо описанием камеры, либо струи, и практически не учитывают процессы на границе плазмы с твёрдым телом. Для практических приложений это принципиально важно: именно в приповерхностном слое формируется условия, обеспечивающие качество обработки поверхности, адгезию покрытий и стерилизационный эффект. Автор делает вывод о необходимости разработки единой модели, включающей все области. На основе анализа сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе подробно описана экспериментальная база, 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. Особое внимание уделено диагностике приповерхностной зоны, что имеет прямое значение для

технологических применений. Установлено, что плазменная струя является самостоятельным комбинированным разрядом, отличающимся от классических форм ВЧ-разрядов.

Третья глава описывает физико-математическую модель, которая учитывает процессы в камере, струе и приповерхностной зоне. Автор формулирует уравнения (3.1–3.145), вводит граничные условия, включая контакт плазмы с твёрдым телом. Математическая модель струйного ВЧИ-разряда объединяет четыре области: разрядную камеру, плазменную струю, СПЗ и приповерхностный слой. Модель позволяет прогнозировать такие параметры, как распределение температуры, энергию ионов и ионный ток на поверхности твердого тела, которые непосредственно определяют эффективность плазменной обработки.

Четвёртая глава посвящена численной реализации модели. Разработанный гибридный алгоритм не только обеспечивает высокую точность, но и характеризуется приемлемым временем расчёта. Автор отмечает, что программный комплекс может быть адаптирован для конкретных установок и работать как инженерный инструмент. Это существенное отличие от многих фундаментальных моделей, которые не доходят до стадии программной реализации.

Пятая глава демонстрирует результаты сопоставления численных данных с экспериментальными результатами. Погрешность в пределах 10–15 % делает модель пригодной для практического прогнозирования. Приведены изолинии теплового потока на поверхность и профили температуры несущего газа, которые могут быть непосредственно использованы для выбора режимов обработки. Такое совпадение расчётных и экспериментальных данных показывает высокую степень готовности модели к практическому применению.

Шестая глава играет ключевую роль в вопросах применения результатов диссертации. Автор демонстрирует конкретные области внедрения: 1) плазменная модификация медицинских инструментов, где показано увеличение износостойкости; 2) плазменная обработка металлических поверхностей для улучшения адгезии покрытий;

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

Приложение содержит сведения о результатах внедрения.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации, отражает весь объем выполненных исследований.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием аттестованных измерительных средств, корректным анализом точности измерений, использованием протестированных численных методов и

программ, использованием сравнений результатов моделирования с экспериментальными данными.

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

Структура работы выстроена понятно и логично, все главы дополняют друг друга и взаимосвязаны. Содержание работы дает основания считать, что ее результаты соответствуют паспорту заявленной специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

6. Критический анализ содержания работы

При всей научной ценности исследования, выполненного на высоком уровне, можно выделить несколько замечаний:

1. В модели в главе 3 пока не в полной мере учтены химические реакции с участием примесей и многозарядных ионов.
2. Алгоритмы гибридного численного метода изложены в обобщённом виде, в частности, не ясно какие виды сеток использовались для метода конечных объемов и метода прямого статистического моделирования – одинаковые или разные.
3. В главах 3 и 4 структура подачи материала перегружена формулами и уравнениями при минимальных пояснениях.
4. В ряде представленных зависимостей не отмечены доверительные интервалы, в этой связи не понятно с какой точностью или погрешностью определены некоторые величины.

Однако, эти замечания носят частный характер и не снижают высокой научной ценности диссертации.

7. Соответствие диссертации критериям ВАК

Работа отвечает всем требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям: поставлена и решена крупная научная проблема; получены объемные результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью; основные результаты исследования опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах Scopus и WoS; результаты широко апробированы на российских и международных научных конференциях; результаты внедрены в промышленное использование.

Считаю, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой и полностью удовлетворяет всем критериям п.9. "Положения о порядке присуждения ученых степеней" ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям (утверждено Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013).

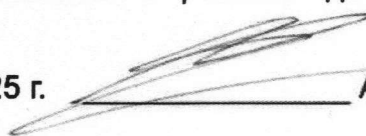
Заключение

Диссертация Шемахина А.Ю. «Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела» является завершенным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. Работа содержит новые фундаментальные и прикладные результаты, обладающие высокой теоретической и практической значимостью, которые внедрены в промышленные работы.

Автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Пак Александр Яковлевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

22 сентября 2025 г.


А.Я. Пак

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор
отделения электроэнергетики и электротехники
Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, ТПУ,
ayapak@tpu.ru


А.Я. Пак

Подпись Пака А.Я. заверяю
Ученый секретарь ТПУ


В.Д. Новикова



Вход. № 05-8573
« 01 » 10 2025 г.
подпись 