

На правах рукописи



Шемахин Александр Юрьевич

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА
ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ
СЛОЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЗАРЯДА У
ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Казань — 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, доцент
Желтухин Виктор Семенович

Официальные оппоненты: **Знаменская Ирина Александровна**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова,
профессор кафедры молекулярных процессов и
экстремальных состояний вещества

Нагулин Константин Юрьевич,
доктор технических наук, доцент,
Казанский национальный исследовательский тех-
нический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
профессор кафедры лазерных и аддитивных тех-
нологий

Пак Александр Яковлевич,
доктор технических наук,
Национальный исследовательский Томский поли-
технический университет,
профессор отделения электроэнергетики и элек-
тротехники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки Институт теоретической и приклад-
ной механики им. С.А. Христиановича Сибирско-
го отделения Российской академии наук

Защита состоится «17» октября 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертаци-
онного совета 24.2.312.11 на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Ка-
зань, ул. Карла Маркса, 68, ауд. А-330, e-mail: upak@kstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский технологический университет» и на сайте
<https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=547896>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.312.11, канд. техн. наук



Мустафин Тимур Наилевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Актуальной задачей инновационного развития промышленности и проведения качественных изменений в современном индустриальном цикле является повышение надежности, долговечности изделий из материалов органической и неорганической природы и придание им качественно новых свойств. Одним из эффективных способов усовершенствования характеристик материалов является их обработка в струе плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления.

В производстве медицинских инструментов остро стоит проблема полировки и упрочнения рабочих поверхностей зажимных инструментов (пинцеты, зажим). Применение для этой цели ВЧ-плазменного упрочнения сдерживается отсутствием специализированных установок, настроенных на серийную обработку таких изделий. Существенным препятствием к тиражированию плазменных процессов и оборудования является то, что ВЧИ-плазменные установки не поддаются принципу подобия.

Для более эффективного и качественного выбора конструктивных решений при создании установок со струйным ВЧИ-разрядом пониженного давления и разработки методов плазменного воздействия на твердые тела с его использованием, необходима разработка научных основ струйного течения ВЧИ-плазмы пониженного давления и создание на их основе математической модели, с помощью которой можно проводить исследования закономерностей формирования характеристик потока плазмы, а следовательно и параметров плазменной обработки путем теоретических расчетов, что уменьшает затраты на проведение большого количества дорогостоящих и трудоемких экспериментов. На основе проведенных исследований для практических применений требуется разработка технологических основ применения полученных результатов при создании и внедрении конструкций ВЧИ-плазменных установок и технологических процессов модификации твердых тел. В связи с этим, задача разработки научных и технологических основ является актуальной.

За последние десятилетия накоплены обширные экспериментальные данные о свойствах плазмы ВЧ-разрядов пониженного давления, результатах взаимодействия ее с различными материалами, созданы математические модели, учитывающие отдельные характеристики ВЧ-разрядов. Однако, параметры течения ВЧИ-плазмы получены эмпирическим путем в лабораторных условиях для ограниченного набора параметров разрядов и плазмотронов. При этом физические закономерности струйного течения плазмы изучены разобщенно, а существующие математические модели ВЧИ-плазмы пониженного давления не учитывают плазмодинамику потока струи и взаимодействия струи с твердым телом.

Эксперименты показали, что плазменная струя, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: скорость потока до 1000 м/с, степень ионизации $10^{-4} - 10^{-7}$, концентрация электронов

$n_e = 10^{15} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, электронная температура $T_e = 1 - 4 \text{ эВ}$, температура атомов и ионов в плазменном сгустке $T_a = 0,2 - 0,3 \text{ эВ}$, в плазменной струе $T_a = 0,03 - 0,07 \text{ эВ}$ при $p = 13,3 - 133 \text{ Па}$.

Одним из параметров, определяющих характер течения газовой среды является число Кнудсена. Число Кнудсена Kn для потока нейтральных частиц находится в диапазоне $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$. Поэтому в диапазоне давлений $p = 13,3 - 133 \text{ Па}$ при расходе газа $G = 0 - 0,24 \text{ г/с}$ течение несущего газа происходит в переходном режиме между течением сплошной среды и свободно-молекулярным потоком. При этом числа Кнудсена для электронного газа $10^{-3} \leq Kn_e \leq 10^{-1}$, для газа ионов $5 \cdot 10^{-4} \leq Kn_i \leq 5 \cdot 10^{-3}$. В то же время, квазинейтральная плазма в диапазоне давлений $p = 13,3 - 133 \text{ Па}$ характеризуется коллективным взаимодействием заряженных частиц. При разделении заряженных частиц возникают кулоновские силы, которые заставляют электроны и ионы диффундировать с одинаковой скоростью, поэтому для оценки характера течения заряженной компоненты плазмы используется число Кнудсена для ионов. То есть течение заряженной компоненты плазменного потока удовлетворяет гипотезе сплошности. Таким образом, специфической особенностью течения струи плазмы ВЧ-разряда пониженного давления является сочетание переходного режима для нейтральной компоненты и режима сплошной среды для заряженной компоненты.

Поскольку характеристики течения определяются в основном температурой, давлением и скоростью несущего газа, а степени ионизации невелики $n_e/(n_e + n_a) \leq 10^{-4}$, то условимся называть режим течения ВЧ-плазмы переходным, также как режим течения несущего газа.

Особенностью струйного ВЧИ-разряда пониженного давления является наличие трех областей потока, отличающихся характером течения. В разрядной камере поток удовлетворяет условиям течения сплошной среды с проскальзыванием (число Кнудсена $< 0,1$). В плазменной струе, как показано выше, реализуется переходный режим течения. В разрядной камере и плазменной струе концентрации электронов и ионов близки друг к другу, нарушения квазинейтральности незначительны. Непосредственно у поверхности твердого тела возникает слой положительного заряда, в котором концентрация ионов существенно преобладает над концентрацией электронов. Поэтому, модели плазмы в этих областях также отличаются.

Для течения нейтрального газа в переходном режиме не существует устоявшихся моделей типа уравнений Навье-Стокса. Процессы, происходящие в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления характеризуются разномасштабностью по времени и пространству. С учетом всех перечисленных особенностей, для моделирования параметров струйного ВЧИ-разряда пониженного давления требуется разработка единой модели, объединяющей в себе 3 области: течение плазмы в разрядной камере, поток ВЧ-плазменной струи и слой положительного заряда (СПЗ), включая слой, непосредственно приле-

гающий к поверхности твердого тела с характерным размером, соизмеримым с дебаевской длиной (дебаевский слой).

Степень разработанности темы. Исследования в области физики плазмы ВЧ-разрядов в настоящее время интенсивно проводятся во всем мире. Основные группы исследователей работают в США (М. J. Kushner, D. J. Economou, M. F. Romig и др.), Канаде (M. Boulos, J. Mostaghimi и др.), России (А. Ф. Александров, А. А. Рухадзе, Е. А. Кралькина, Абдуллин И. Ш. и др.), Франции (J. P. Boeuf и др.), Нидерландах (Godheer и др.), Турции (E. Turkoz и др.), Китае, Южной Корее и др. Основным направлением этих исследований является изучение свойств ВЧ-плазмы в различных условиях при варьируемых составах плазмообразующих газов и при преобладании диффузии над конвективным переносом.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной проблемы разработки научных основ создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления и единой математической модели в переходном режиме течения при числах Кнудсена Kn для несущего газа $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$, включая взаимодействие с твердыми телами.

В диссертации изложены работы автора в период с 2013 по 2024 г.г. по исследованию струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, разработке математической модели, численного метода и комплекса программ расчета характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, его исследованию в области разрядной камеры, для невозмущенной струи и при обтекании твердых тел.

Работа выполнена во ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» при финансовой поддержке грантов РФФИ 19-71-10055, РФФИ 16-31-60081, программы «Приоритет-2030» и гранта РФФИ 18-48-160056.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка научных основ создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления путем разработки математической модели, обосновывающей, что плазменная струя является самостоятельным комбинированным разрядом и позволяющей прогнозировать параметры взаимодействия с твердым телом.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления и выполнить анализ процессов, протекающих в различных областях разряда: разрядной камере, плазменной струе, слое положительного заряда и сформулировать систему уравнений, граничных и начальных условий, условий сопряжения решений на различных участках течения для единой модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления;

2. Разработать физическую модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, рассматриваемого как единая сущность, обладающая отличающимися характеристиками в разных областях разряда, обеспечивающими связь основных технологических параметров плазменной струи с регулируемыми параметрами ВЧИ-плазменной установки.
3. Разработать математическую модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом переходного режима течения в диапазоне чисел Кнудсена для несущего газа $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$, влияния электромагнитного поля на функцию распределения электронов по энергиям, влияния метастабильных атомов и ионов на баланс энергий и частиц в разряде, потенциальной и вихревой компонент электрического поля;
4. Разработать численные методы и программный комплекс для решения сформулированной задачи и провести численные эксперименты по верификации и валидации разработанной математической модели;
5. Провести численные исследования характеристик струйного ВЧИ-разряда в разрядной камере, плазменной струе и слое положительного заряда, включая дебаевский слой у поверхности тела: распределение заряженных частиц, метастабильных атомов, напряженностей электрического и магнитного полей, электронной и газовой температур, энергии ионов и плотности ионного тока, поступающих на поверхность. Определить значения параметров ВЧИ-плазмы пониженного давления, ответственных за модификацию поверхности твердых тел: энергию ионов и плотность ионного тока на поверхность образца, — и их зависимости от параметров установки;
6. Разработать научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления и технологические основы применения полученных результатов при создании и внедрении конструкций ВЧИ-плазменных установок и технологических процессов модификации твердых тел.

Объект диссертационного исследования.

Струйный высокочастотный индукционный разряд пониженного давления.

Предмет диссертационного исследования.

Математическая модель струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления.

Соответствие исследования паспорту научной специальности.

Диссертация выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» ВАК Минобрнауки РФ (технические науки) и подпунктами 5, 6, 13, 16, 17, 19.

Научная новизна:

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 H -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 $n_e = 10^{17} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$, электронной температурой $T_e = 0,5 - 2 \text{ эВ}$, газовой температурой $T_a = (1 - 4) \cdot 10^3 \text{ К}$; плазменная струя обеспечивает поддержание концентрации заряженных частиц в диапазонах $n_e = 10^{16} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 0,8 - 1,5 \text{ эВ}$, $T_a = 320 - 600 \text{ К}$, транспортировку их к поверхности твердого тела, и участвует в формировании характеристик СПЗ и поверхностного слоя в окрестности тела; в СПЗ под действием потенциального поля $E_p = 30 - 50 \text{ В}$ ионы ускоряются до энергии 30 – 50 эВ; в приповерхностном слое толщиной $\lambda_D = 50 - 70 \text{ мкм}$ 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_{cap} 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,

- немаксвелловский 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 сгустка 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 самостоятельным 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).

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований, доказано, что ВЧИ-разряд с соленоидальным индуктором в диапазоне давлений $p = 13,3 - 133\text{ Па}$, мощности разряда P_p от 100 до 3800 Вт , расходе плазмообразующего газа G до $0,24\text{ г/с}$, частоте электромагнитного поля $f = 1,76 - 13,56\text{ МГц}$ представляет собой новую разновидность ВЧ-разрядов, а именно струйный ВЧИ-разряд пониженного давления.

Эта разновидность ВЧ-разряда отличается от других форм ВЧ-разрядов сосуществованием в одном устройстве нескольких типов разряда, каждый из которых выполняет свои функции. В разрядной камере создается самостоятельный H -разряд, в котором газовый поток ионизируется, в плазменной струе формируется самостоятельный разряд комбинированного типа, который обеспечивает поддержание концентрации заряженных частиц и транспортировку их к поверхности образца и участвует в формировании СПЗ и приповерхностного слоя около тела.

В СПЗ под действием потенциального поля ионы ускоряются до энергии $30-50\text{ эВ}$, в приповерхностном слое происходит фокусировка ионного потока на вершинах микронеровностей поверхности твердого тела и его допол-

нительное ускорение. Таким образом, установлен механизм взаимодействия струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с поверхностью твердого тела.

Практическая значимость работы заключается в том, что её результаты использованы при проектировании ВЧИ-плазменных установок и создании технологических процессов модификации поверхностей медицинских инструментов в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления. С помощью установленных в результате экспериментальных исследований и численных расчетов характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления установлены значения энергии ионов и ионного тока на поверхность изделия, обеспечивающие полировку поверхности ситалла и увеличение показателей прочности рабочих частей зажимных медицинских инструментов (иглодержателей, пинцетов, зажимов кровоостанавливающих, ножниц микрохирургических) в 2—2,5 раза.

Создан программный комплекс, который позволяет проводить сквозной расчет характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, энергии ионов и плотности ионного тока на поверхность образца в зависимости от регулируемых параметров установки: мощности разряда P_p в диапазоне до 3800 Вт, давления в вакуумной камере $p = 13,3 - 133$ Па, расходе плазмообразующего газа G до 0,24 г/с, частоте поля f от 1,76 до 13,56 МГц.

При наличии твердого тела в струе ВЧИ-разряда пониженного давления определены диапазоны скоростей, при которых происходит переход от колоколообразных профилей температуры к М-образным; выделены области постоянства скорости в плазменной струе, которые подтверждают наличие характерной границы струи. Определены области равномерной обработки изделий в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления в зависимости от расхода, температуры плазмообразующего газа и скорости потока.

Определены значения частоты электромагнитного ВЧ-поля при которых достигаются максимальные величины концентрации электронов, электронной температуры и температуры плазмообразующего газа в зависимости от мощности разряда: для получения большей энергии ионной бомбардировки необходимо выбирать частоту, которой соответствует максимум электронной температуры (например, для мощности 2,5 кВт это 5 МГц). Для увеличения плотности ионного тока на поверхность необходимо выбирать частоту соответствующую максимальной концентрации электронов (например, для мощности разряда 2,5 кВт это 2,82 МГц). Для более интенсивного температурного воздействия, нужно выбирать частоту, соответствующую максимальной температуре тяжелых частиц (к примеру, для 2,5 кВт это частота - 1,58 МГц). Так как с уменьшением вкладываемой мощности в разряд уменьшаются абсолютные значения концентрации, температуры электронов, температуры несущего газа и происходит сдвиг максимума по частоте, то для достижения соответствующих величин необходимо увеличить частоту. Например, при $P_p = 700$ Вт максимум электронной температуры достигает

ся при 15,85 МГц, максимум электронной плотности - при частоте 6,5 МГц, максимум температуры несущего газа - при 2,5 МГц.

На основании сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными, разработаны технологические основы применения полученных выводов при создании и внедрении конструкций ВЧИ-плазменных установок, при разработке технологических процессов модификации твердых тел. В частности, процессы полировки конструкционных материалов целесообразно проводить в режиме ионной бомбардировки с энергией ионов $W_i = 30 - 50$ эВ и плотностью ионного тока $J_i = 0,8 - 25$ А/м², что позволяет осуществить трансфер технологического процесса на ВЧИ-плазменные установки с другими конструктивными параметрами и на технологические процессы модификации с различными геометрическими размерами.

Результаты диссертации применены к разработке ВЧИ-плазменных установок для улучшения показателей качества медицинских инструментов и технологических процессов полировки твердых тел.

Результаты диссертации внедрены в ООО «Плазма-ВСТ», ООО «Производственно-техническое объединение «Медтехника» и ООО «Научно-производственная фирма «ХЭЛП» с экономическим эффектом 13,320 млн.руб.

Методология и методы исследования В диссертации применялись современные высокотехнологичные методы исследования неравновесной низкотемпературной плазмы: трубки Пито и калориметрия для измерения газодинамических характеристик потока ВЧИ-разряда пониженного давления, СВЧ-зондирование, миниатюрный магнитный зонд, голографическая интерферометрия, зонд Ленгмюра, анализатор энергии ионов с радиальным электрическим полем. Уравнения математической модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления сформулированы на основе физических принципов и законов механики жидкости, газа и плазмы. В диссертации применялись методы математического и численного моделирования, в том числе метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей, метод прямого статистического моделирования разреженных течений газа. Для решения дискретизованных задач применялись итерационные методы. Верификация модели проводилась путем сравнения с известными работами и измельчением сетки, а валидация — с экспериментальными данными.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием современных аттестованных измерительных средств, анализом точности измерений, тестированием численных методов и программ на решениях модельных задач, сравнением результатов математического моделирования с собственными экспериментальными данными и с известными данными экспериментальных и теоретических исследований других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления как новой разновидности ВЧ-разряда, представляющего собой сосуществование в одном устройстве различных форм ВЧ-

разрядов: самостоятельного H -разряда в разрядной камере, несамостоятельного комбинированного разряда в плазменной струе и слоя положительного заряда (СПЗ) с приповерхностным слоем у границы твердого тела [1-23];

2. Экспериментальные и теоретические результаты, обосновывающие, что струя ВЧИ-разряда пониженного давления является несамостоятельным ВЧ-разрядом комбинированного типа, для которого самостоятельный ВЧИ H -разряд в разрядной камере обеспечивает предварительную ионизацию [9,11,14-17,23];
3. Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления для диапазона чисел Кнудсена $1,6 \cdot 10^{-2} \leq Kn \leq 4,8 \cdot 10^{-1}$ с учетом немаксвелловской функции распределения электронов по энергиям, обеспечивающая сквозной расчет характеристик плазмы от регулируемых параметров установки до характеристик ионного потока, поступающего на поверхность твердого тела [8,11,20,22];
4. Гибридный численный метод решения задачи сквозного моделирования струйного ВЧИ-разряда пониженного давления на основе соединения метода прямого статистического моделирования (ПСМ) для расчета характеристик течения несущего газа в струе и методов конечных элементов и конечных объемов для расчета характеристик потока заряженных частиц и электромагнитного поля [1-5,7-8,11,13,16-17,19,23,24];
5. Результаты численных экспериментов по определению основных характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом немаксвелловской ФРЭЭ, а именно: установленный эффект образования слоистой структуры разряда в ВЧИ-струе, различный характер распределения ЭМП в разрядной камере и плазменной струе (наличие компонент H_φ , H_z , E_φ , E_z в плазменной струе) и превышение концентрации заряженных частиц на 2 порядка в сравнении с рекомбинационной плазмой. Таким образом, теоретически доказывается, что ВЧИ-плазменная струя является несамостоятельным комбинированным ВЧ-разрядом [1,3-5,7-9,12,14-17,19];
6. Результаты численных экспериментов по определению основных характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления в невозмущенной струе и при обтекании образца, в области СПЗ и приповерхностном слое:
 - определена область формирования потока ионов с заданными характеристиками энергии ионов и плотности ионного тока, поступающих на поверхность образца,
 - определено расстояние до области равномерной обработки материалов от базовой плиты вакуумной камеры, коррелирующее с областью наибольшей проводимости плазмы,

- установлен эффект образования зоны перегрева по периферии струи около входного отверстия вакуумной камеры, в которой температура выше температуры в центре потока более, чем на 50 °С при скорости потока на входе в вакуумную камеру более 440 м/с и мощности разряда более 2,4 кВт при расходе плазмообразующего газа более 0,16 г/с.

-обоснован выбор частоты электромагнитного поля с целью максимизации параметров плазмы для различных процессов модификации твердых тел [1,3-11,14,16];

7. Технологические основы практического применения результатов диссертации при создании ВЧИ-плазменных установок и разработке технологических процессов модификации твердых тел струйным ВЧИ-разрядом пониженного давления. Результаты внедрений разработанной математической модели [1,7,10-11,14].

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Четырнадцатая Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2022), г. Алушта, 2022.
2. Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 2024, 2023, 2016, 2014.
3. IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз», г. Москва, 2024, 2023.
4. Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование», г. Саров, 2022-2024.
5. Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП), г. Казань, 2023, 2020, 2017.
6. Международная Открытая конференция Института системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук, г. Москва, 2023.
7. Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (GDP-NANO), г. Казань, 2023, 2021.
8. Фортовская Международная конференция «Уравнения состояния вещества», п. Эльбрус, п. Терскол, 2016-2018, 2020-2022.
9. Международный научный семинар «Критические инфраструктуры в цифровом мире» (IWCI), п. Большое Голоустное, г. Байкальск, 2022, 2021.
10. IV Международная конференция «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг», г. Бухара (Узбекистан), 2022.

11. Байкальская Всероссийская конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (ИМТ), г. Иркутск, д. Куркут, о. Ольхон, 2021-2022.
12. Международная конференция «Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам» (КРОМШ), Крым, 2014-2021.
13. Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», г. Казань, 2019, 2021.
14. Международная конференция «Сеточные методы для краевых задач и приложения», г. Казань, 2012, 2016, 2020.
15. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Долгопрудный, 2020.
16. 47th International Conference on Plasma Sciences (ICOPS-2020), Сингапур, 2020.
17. 69th Annual Gaseous Electronics International Conference, г. Бохум (Германия), 2016.
18. VI международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и технологий», Белгород, 2015.
19. Крымская международная математическая конференция (КММК-2013), г. Судак, 2013.
20. Вторая международная конференция «Высокопроизводительные вычисления — математические модели и алгоритмы», посвященная Карлу Якоби, г. Калининград, 2013.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад соавторов заключается в следующем: Желтухин В.С. – обсуждение постановки задач и полученных результатов, Абдуллин И.Ш. – обсуждение результатов моделирования и экспериментальных исследований, Струнин В.И. - апробация модели на потоках плазмы на установках с числом Kn до 3, Файрушин И.И. – разработка и реализация расчетов параметров модификации материалов методом молекулярной динамики с использованием результатов моделирования свойств струйного ВЧИ-разряда, Хубатхузин А.А., Гатина Э.Б., Худайбергенов Г.Ж., Цокало И.Е., Башкирцев А.А., Ананьев К.В., Некрасов И.К. – участие в проведении экспериментальных исследований, Рябченко Е.Ю., Филин И.В. – обсуждение вопросов разработки программ в операционной системе Linux, Самсонова Е.С., Прялухин И.С., Макеева Е.А. - первичная обработка результатов численных экспериментов, Терентьев Т.Н., Бородаев И.А., Киселев Г.Б., Шемахин Е.Ю., Шуртакова Д.В., Губанова Э.Р., Нуруллина А.Х., Сафиуллина Р.Р., Сухова А.А., Третьякова А.К., Хабириянова А.А. - участие в проведении численных экспериментов с помощью разработанного автором комплекса программ, Байтимилов А.Д., Софроницкий А.О., Тюрин В.А. - участие в сборке и тестировании оборудования. Все основные результаты диссертации получены автором лично. Личный вклад автора в опубликованные работы

ликованных в соавторстве работах состоит в постановке цели и задач исследований, в создании математической модели струйного течения ВЧ-плазмы пониженного давления, разработке комплекса программ расчета характеристик потока ВЧ-плазмы, обобщении полученных результатов и формулировке научных выводов, в постановке задач и проведении вычислительного и натурального экспериментов с участием соавторов. Вклад автора является решающим на всех стадиях работы.

Основные результаты работы изложены 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.

Структура и объем работы. 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.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу работ: по разработанным моделям ВЧИ-плазмы, слоя положительного заряда, исследованиям функции распределения электронов по энергиям в ВЧ-плазме и полученных экспериментальных данных, существующих представлений о структуре и моделях течений. Проведен обзор численных методов и пакетов прикладных программ для решения задач газо- и плазмодинамики. Дан обзор технологическим применениям ВЧ-плазмы пониженного давления, в том числе в области обработки медицинских инструментов. Исходя из анализа современного состояния теоретических и экспериментальных исследований ВЧИ-разрядов пониженного давления, в главе формулируются цель и основные задачи диссертации.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований струйного ВЧИ-разряда пониженного давления в невозмущенной струе и при обтекании твердого тела.

Исследования проводились на ВЧ-плазменной установке, состоящей из стандартных блоков и элементов, включающих в себя генератор, ВЧ-индуктор, вакуумную систему, систему подачи плазмообразующего газа и диагностической аппаратуры (рис. 1).

Высокочастотный генератор, собранный по одноконтурной схеме с общим катодом настроен на индуктивную нагрузку. На основании анализа характерных особенностей процессов, протекающих в потоке неравновесной

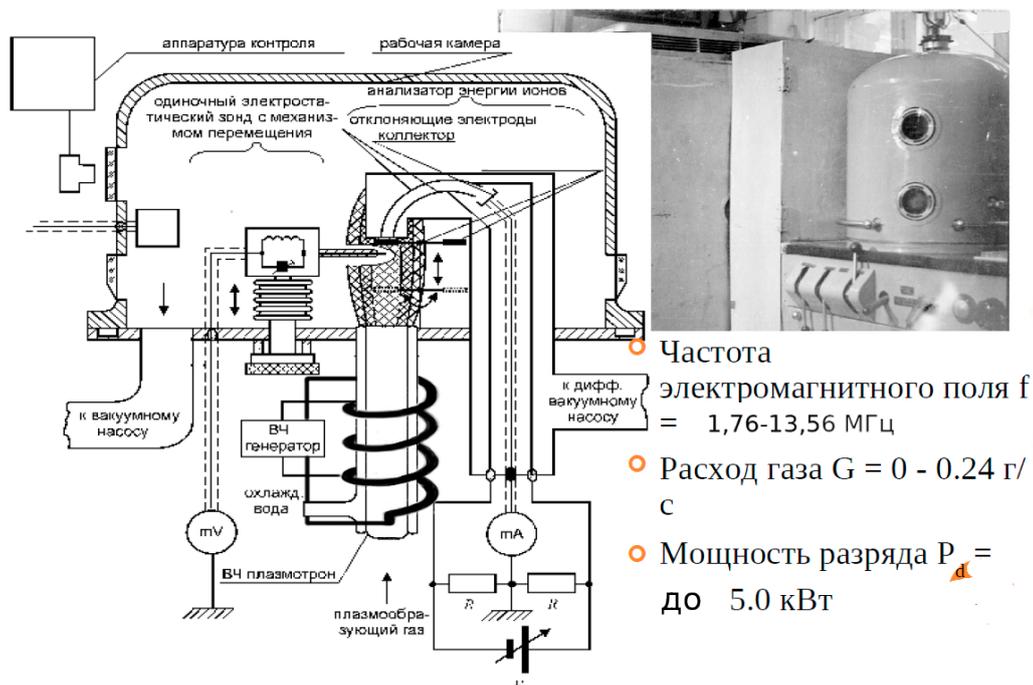
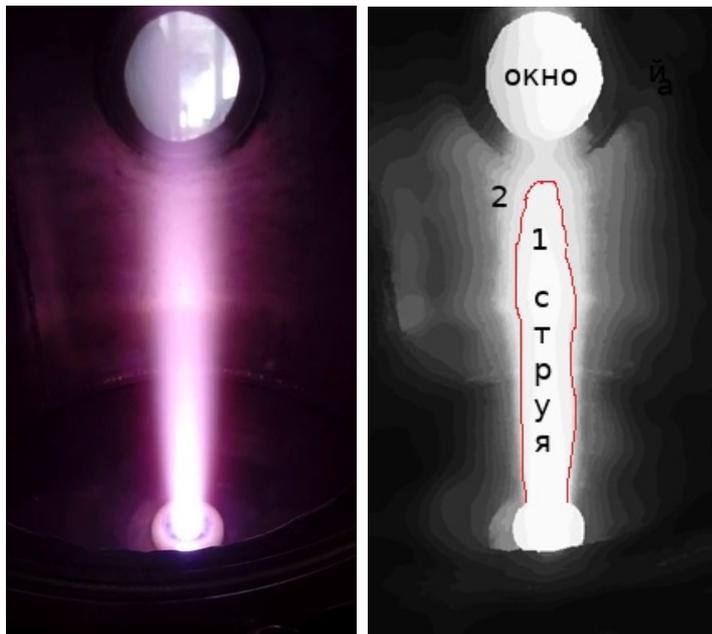


Рис. 1 — Схема ВЧИ-плазменной установки и её внешний вид

низкотемпературной плазмы, разработан исследовательский комплекс для экспериментальных исследований параметров струйных ВЧ-разрядов. Система диагностики состоит из следующих компонентов (в скобках указаны соответствующие диапазоны измерений): оптический спектрометр Avantes AvaSpec-Mini (200–1100 нм), система зондовой диагностики Hiden Espion Langmuir Probe (± 200 В), аппаратура СВЧ-зондирования (1,8–12 ГГц), магнитный зонд (чувствительность 2200 А/мВ), термопары (до 1000 °С), манометр (0,1–500 Па), трубка Пито (до 1000 м/с), calorиметрический измеритель лучистой энергии (до 1 кВт), анализатор энергии ионов (до 200 эВ), интерферометр (голография) (от 1 мкм до 10 см).

При исследовании характеристик плазменного потока входные параметры установки варьировались в следующих пределах: давление от 13,3 Па до 133 Па, расход плазмообразующего газа от 0 до 0,2 г/с, частота генератора 1,76 МГц. В качестве плазмообразующего газа в экспериментах использовался аргон высшего сорта. В исследуемом диапазоне реализован струйный ВЧ-разряд индукционного типа с соленоидальным индуктором. Мощность разряда варьировалась в диапазоне от 0,5 до 5 кВт.

Характеристики плазмы струйных ВЧ-разрядов пониженного давления исследовались в невозмущенном потоке и в присутствии образца из нержавеющей стали марки 40Х13. Изучены газодинамические, электродинамические и энергетические параметры: мощность разряда, скорость потока плазмы, концентрация электронов, напряженность магнитного поля, потенциал плазменного столба относительно образца, плотность ионного тока и энергия ионов, бомбардирующих поверхность материалов.



Области разряда:
 1. Ядро
 2. Оболочка

Рис. 2 — Струя ВЧИ-плазмы пониженного давления и её области.

Струйный ВЧИ-разряд пониженного давления отличается как от ВЧИ-разряда атмосферного давления, так и от ВЧИ-разряда низкого давления с планарной спиральной антенной. Визуально отличия заключаются в том, что длина плазменной струи достигает 0,5 м и более (рис. 2), что существенно больше, чем в ВЧИ-разряде атмосферного давления; в ВЧИ-разряде с планарной антенной струя отсутствует.

Проведенные экспериментальные исследования газодинамических параметров плазменного потока показали, что скорость в плазменной струе $v = 200 - 500$ м/с, в разрядной камере может достигать значения 1000 м/с при T_a около 1000 К, что меньше скорости звука при описанных режимах. Это означает, что при обтекании твердого тела не появляется ударная волна, и, соответственно, не происходит резкого повышения давления и температуры плазмы в СПЗ. То есть основной функцией плазменной струи в контексте обработки твердых тел является транспорт активных частиц плазмы к поверхности тела, а также интенсификация процессов обмена энергиями между электронами, ионами, возбужденными атомами и атомами в основном состоянии. Регулировка скорости плазменной струи может осуществляться путем изменения расхода газа, причем зависимость $v(G)$ близка к линейной (рис. 3а). Управление значениями температуры несущего газа T_a вдоль потока и в поперечном сечении может осуществляться изменением давления и расхода газа. Исследования радиального распределения концентрации электронов показали, что в плазменной струе максимальное значение $n_e(r,z)$ достигается в центре потока при $r = 0$, а в направлении к границе плавно уменьшается экспоненциально по выпуклой вверх кривой. Это означает, что

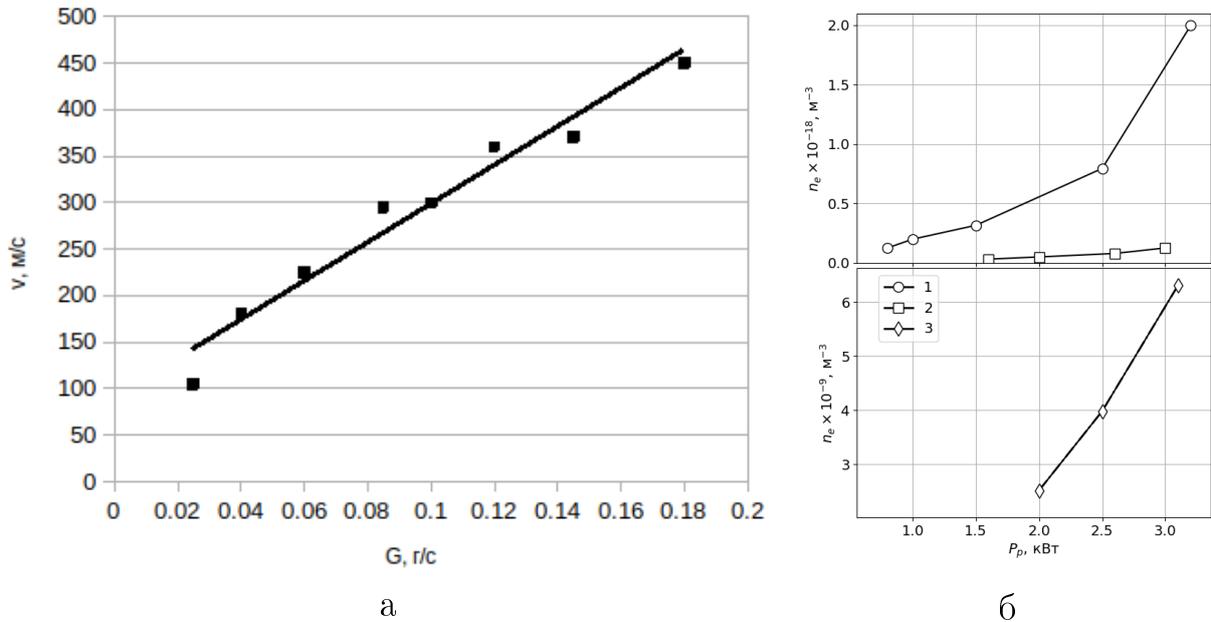


Рис. 3 — а) Влияние расхода газа на скорость газа в центре выходного сечения разрядной камеры при мощности разряда $P_p = 2,4$ кВт.
 б) Сравнение значений n_e в разряде и плазменной струе при $G = 0,04$ г/с, $p = 113$ Па со значениями n_e в рекомбинирующей плазме. 1 – центр плазменного сгустка, $z = -120$ мм; 2 – плазменная струя, $z = 110$ мм; 3 – рекомбинационная плазма, $z = 110$ мм (расчет).

преимущественным механизмом ухода электронов из разряда в радиальном направлении является диффузия.

В связи с длинной светящейся частью плазменной струи ВЧИ-разряда пониженного давления проведена оценка концентрации электронов для потока рекомбинационной плазмы. Теоретическая оценка значений n_e для распадающейся плазмы оказалась на несколько порядков меньше, чем получено в результате измерений (рис. 3б). При этом разница значений n_e в разрядной камере и струе составляет 1–2 порядка. Это означает, что преобладающим процессом в плазменной струе является ионизация, а не рекомбинация, как это было бы, если бы струя была рекомбинационным потоком. При обработке металлов значения концентрации электронов в струе составляют от 10^{15} м^{-3} до 10^{18} м^{-3} , в зависимости от скорости и давления несущего газа через расход G , мощности разряда P_p , координаты z твердого тела в струе относительно выходного сечения разрядной камеры.

Из результатов измерений следует, что магнитное поле в разрядной камере ВЧИ-разряда направлено вдоль оси Oz , радиальная и азимутальная компоненты не фиксируются (рис. 4а). При этом, напряженность магнитного поля $H(r, z)$ в плазменной струе имеет как аксиальную, так регистрируется и азимутальная составляющая H_φ (рис. 4б), что говорит о существовании иного

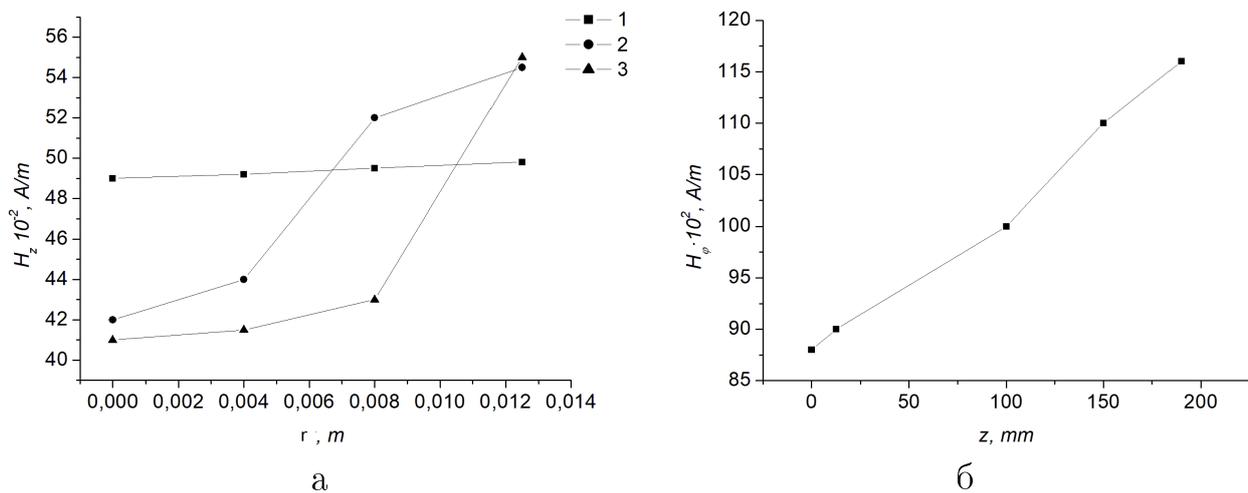


Рис. 4 — а) 1 – холостой ход генератора, 2– $G = 0,04$ г/с, 3 – $G = 0$ г/с.

Распределение $H_z(r)$ в центре разрядной камеры при $z = -120$ мм,

$$P_p = 2,4 \text{ кВт}, p = 113 \text{ Па.}$$

б) Распределение H_φ вдоль струи ВЧИ-разряда при наличии в ней твердого тела, $G = 0,04$ г/с $P_p = 3,8$ кВт, $L_{tb} = 200$ мм.

типа разряда в области плазменной струи. Схема направлений электромагнитных полей (ЭМП) в различных областях струйного ВЧИ-разряда пониженного давления представлена на рис. 5а. То есть в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что ВЧИ-разряд с продувом газа в диапазоне давлений 13,3–133 Па представляет собой отдельную разновидность ВЧИ-разряда, в котором сосуществуют две формы: H -разряд в разрядной камере и комбинированный H - E -разряд в плазменной струе. При этом, плазменная струя отличается от других видов ВЧИ-разрядов высокой ионизацией газа и наличием дополнительных компонент магнитного поля. Это позволяет выдвинуть гипотезу, о том, что плазменная струя является самостоятельным ВЧ-разрядом комбинированного типа.

Около твердого тела в струе возникает слой положительного заряда (СПЗ), аналогичный приэлектродным слоям в ВЧЕ-разряде низкого и пониженного давлений. Следствием образования СПЗ является возникновение ионного потока на поверхность тела, с энергией ионов 30–50 эВ и плотностью ионного тока до 25 А/м^2 .

Измерения концентрации электронов методами СВЧ-зондирования показали, что в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления она достигает значений $10^{15} - 10^{18} \text{ 1/м}^3$. У поверхности образца создается СПЗ, что подтверждается результатами голографических исследований плазмы в окрестности твердого тела, измерений потенциала плазмы относительно тела и характеристик ионного потока (W_i и J_i), поступающего на поверхность образца.

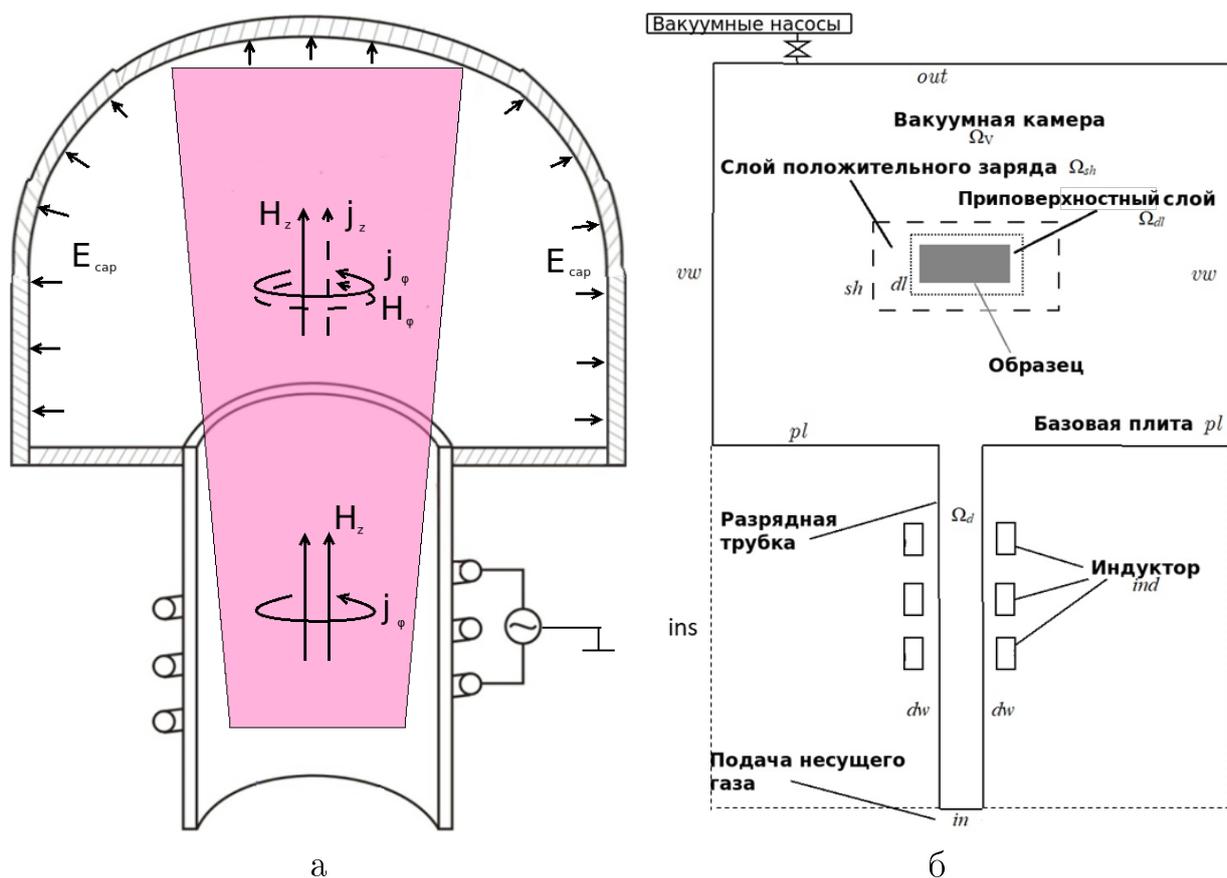


Рис. 5 — а) Электромагнитные поля в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления, б) Расчетная схема ВЧИ-плазменной установки. Прямым полужирным шрифтом обозначены части подобласти, курсивом — обозначения границ.

Таким образом, в работе предложена физическая модель модификации твердых тел в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления, которая заключается в следующем. ВЧИ-разряд принципиально по своей природе отличается от других видов газовых разрядов тем, что он является безэлектродным и спектрально чистым. Энергия электромагнитного поля вкладывается в электроны, которые при столкновениях передают часть энергии атомам, в результате чего они ионизируются и возникает разряд. Так как в камеру подается плазмообразующий газ, то заряженные частицы частично выносятся в вакуумную камеру, где образуют плазменную струю. В плазменной струе поддерживается концентрация заряженных частиц за счет электрического поля индуктора и потенциального поля, возникающего из-за разности потенциалов между индуктором, стенками вакуумной камеры, плазменной струей, твердым телом. Плазменная струя обеспечивает транспортировку заряженных частиц к поверхности твердого тела, где образуется слой положительного заряда (СПЗ). СПЗ — это структура, которая характерна только для ВЧ-разрядов, причина его образования — колебания ЭМП. Непосредственно у поверх-

ности твердого тела в СПЗ формируется приповерхностный слой толщиной 50–70 мкм, который предположительно оказывает существенное влияние на избирательную обработку поверхности.

Результаты исследований показывают, что зависимости характеристик разряда от входных параметров установки являются нелинейными, что не позволяет применить принцип подобия для переноса полученных результатов на установки с другими конструктивными параметрами.

Кроме того, экспериментальные исследования характеристик струйного ВЧИ-разряда при $p = 13,3 - 133$ Па трудоемки, требуют наличия специального дорогостоящего оборудования и высокой квалификации обслуживающего персонала, и позволяют получить данные о свойствах плазменной струи для ограниченного набора входных параметров. При этом при переходе на другую ВЧИ-плазменную установку, необходимо заново исследовать все вышеописанные параметры.

Поэтому для объяснения механизма полученных эффектов и разработки технологических основ модификации поверхности твердых тел с помощью струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, которые позволят сократить трудоемкость трансфера технологий на другие установки и изделия из других материалов, необходима разработка математической модели, учитывающей выявленные особенности струйного ВЧИ-разряда пониженного давления и позволяющей определять параметры плазменной струи и СПЗ расчетным путем.

Третья глава посвящена построению математической модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела.

Существующие математические модели описывают различные области течения плазмы (поток плазмы в разрядной камере и струе, СПЗ, приповерхностный слой) изолированно, без учета взаимосвязи этих областей. В связи с этим разработана единая математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, учитывающая влияние различных его областей на параметры плазменной модификации поверхности, что способствует лучшему пониманию механизма его поддержания и взаимодействия плазмы с материалами.

Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления состоит из нескольких взаимосвязанных систем, описывающих, соответственно, течение несущего газа, распределение ЭМП, динамику заряженных и нейтральных частиц – как в невозмущенном потоке, так и при взаимодействии с образцом.

Ниже используются следующие обозначения областей течения (рис. 5б): $\Omega = \Omega_d \cup \Omega_V$, внутренняя часть разрядной трубки Ω_d , вакуумной камеры Ω_V (рис. 5б). Границы этих областей соответственно обозначены $\partial\Omega_d$, $\partial\Omega_V$, и $\partial\Omega$. Для постановки граничных условий обозначены отдельные участки границ $\partial\Omega_d$ и $\partial\Omega_V$: вход разрядной трубки (inlet) - $in \subset \partial\Omega_d$, стен-

ки разрядной трубки (discharge wall) - $dw \subset \partial\Omega_d$, стенки вакуумной камеры (vacuum wall) - $vw \subset \partial\Omega_V$, поверхность базовой плиты (plate) - $pl \subset \partial\Omega_d$, выход течения из вакуумной камеры (outlet) - $out \subset \partial\Omega_V$, образец (specimen, body) - sp , границы индуктора - ind (inductor). Эти обозначения далее используются также как индексы для значений функций на этих участках.

Единая модель, объединяющая 4 области струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, состоит из следующих подмоделей.

Подмодель течения плазмообразующего газа. Как указано выше, в переходном режиме течения для плазменной струи уравнения Навье-Стокса неприменимы, в связи с чем описание характеристик потока плазмообразующего газа обобщается уравнением Больцмана для несущего нейтрального газа во всех областях течения:

$$\frac{\partial f_g}{\partial t} + v_a \cdot \frac{\partial f_g}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m_a} \cdot \frac{\partial f_g}{\partial v_a} = S(f_g), \quad (1)$$

$$f_g(v_a, \mathbf{r}, 0) = f_{00}^g(v_a, \mathbf{r}), f_g(v_a, \mathbf{r}_{\partial\Omega}, t) = f_{00}^g(v_a, \mathbf{r}_{\partial\Omega}), \quad (2)$$

где

$$\mathbf{F} = -\nabla W_T, \quad W_T = \frac{3}{2} k_B \delta \int v_c n_e (T_e - T_a) d\Omega dt. \quad (3)$$

Газодинамические параметры потока (p, \mathbf{v}_a, T) определяются по формулам

$$p = n_a k_B T_a, n_a = n_{a0} \int f_g(v_a, \mathbf{r}, t) d^3 v_a, \quad T_a = \int v_a^2 f_g(v_a, \mathbf{r}, t) d^3 v_a, \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_a = \int v_a f_g(v_a, \mathbf{r}, t) d^3 v_a.$$

Функция распределения нейтральных частиц по скоростям f_g нормируется с помощью соотношения

$$\iint \rho \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n} dS = G. \quad (5)$$

Подмодель течения заряженных и возбужденных частиц. Модель включает уравнения непрерывности для электронного и ионного газов, газа метастабильных атомов.

Уравнение непрерывности для электронного газа имеет вид:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_e = k_1 n_e n_a + k_2 n_m^2 + k_3 n_m n_e - k_4 n_e n_i - k_5 n_e^2 n_i, \quad (6)$$

где $\mathbf{\Gamma}_e = n_e \mathbf{v}_a - D_e \nabla n_e - b_e \mathbf{E}_0 n_e - n_e (D_e^T \nabla T_e / T_e)$. Граничные условия для него:

$$n_e|_{in} = 0, \mathbf{\Gamma}_e|_{out} = 0, (\mathbf{\Gamma}_e - \gamma_i \mathbf{\Gamma}_i)|_{vw \cup dw \cup pl \cup sp} = 0, \quad (7)$$

$k_i, i = 1, \dots, 5$ - константы скоростей реакций. Коэффициенты D_e, b_e определяются с помощью функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в приближении слабого поля:

$$D_e = \frac{1}{3n_a} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int \frac{\varepsilon_e}{\sigma_m} f_e d\varepsilon_e, \quad (8)$$

$$b_e = \frac{1}{3n_a} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \int \frac{\varepsilon_e}{\sigma_m} \frac{\partial f_e}{\partial \varepsilon_e} d\varepsilon_e, \quad (9)$$

$$f_e = f_{00}^e(v_e) + \frac{f_{1,e}(v_e)v_e}{v_e}, \quad f_{1,e} = \frac{-eE \frac{\partial f_{00}^e(v_e)}{\partial v_e}}{m_e(i\omega + \nu_c(v_e))}, \quad \varepsilon_e = \frac{m_e v_e^2}{2}, \quad (10)$$

$$\nu_c(v_e) = n_a g_{ea} < \sigma_\phi >, \quad g_{ea} = \int \int |v_e - v_a| f_e(v_e) f_g(v_a) d^3 v_e d^3 v_a, \quad (11)$$

$$f_{00}^e(v_e) = n_e \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T_e} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{m_e v_e^2}{2k_B T_e} \right). \quad (12)$$

Уравнение непрерывности для ионного газа имеет вид

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_i = k_1 n_e n_a + k_2 n_m^2 + k_3 n_m n_e - k_4 n_e n_i - k_5 n_e^2 n_i, \quad (13)$$

где $\mathbf{\Gamma}_i = n_i \mathbf{v}_a - D_i \nabla n_i + b_i \mathbf{E}_0 n_i - n_i (D_i^T \nabla T_a / T_a)$. Граничные условия имеют вид

$$n_i|_{in} = 0, \quad (\mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n})|_{d\omega \cup \partial\Omega_V \cup sp} = 0, \quad (\mathbf{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n})|_{sp} = \frac{m_i v_i^2}{2}. \quad (14)$$

Здесь $v_i = \sqrt{8k_B T_a / \pi m_a}$. Для ионов асимметричная часть функции распределения $f_{1,i}(v_i)$ мала, в связи с чем коэффициент диффузии и подвижность вычисляются по формулам

$$D_i = \frac{1}{3n_a} \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \int \frac{\varepsilon_i}{\sigma_m} f_{00}(v_i) d\varepsilon_i, \quad b_i = D_i e / k_B T_a, \quad \varepsilon_i = \frac{m_i v_i^2}{2}, \quad (15)$$

где симметричная часть функции распределения $f_{00}(v_i)$ вычисляется по формуле (11) с заменой m_e и T_e на m_i и T_a , соответственно.

Уравнение неразрывности для метастабильных атомов.

В аргоновой плазме долгоживущие возбужденные атомы (метастабильные) оказывают существенное влияние на баланс заряженных частиц и энергий. Источником метастабильных атомов в ВЧИ-разряде при давлениях от 13,3 до 133 Па являются столкновения электронов с атомами. Время жизни возбужденных частиц составляет $10^{-6} - 10^{-4}$ с. Поэтому для расчета концентрации метастабильных атомов используется приближение сплошной среды, как и для

заряженных частиц. Распределение метастабилей в плазменной струе описывается уравнением

$$\frac{\partial n_m}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_m = k_6 n_e n_a - k_2 n_m^2 - k_3 n_m n_e - k_7 n_m - k_8 n_m n_a - k_9 n_m n_e, \quad (16)$$

где $\mathbf{\Gamma}_m = -D_m \nabla n_m + \mathbf{v}_a n_m$, $k_6 - k_9$ - коэффициенты скоростей реакций. Граничные условия имеют вид

$$n_m|_{in} = 0, \quad (\mathbf{\Gamma}_m \cdot \mathbf{n})|_{dw \cup \partial \Omega_V \cup sp} = 0. \quad (17)$$

Подмодель сохранения энергии электронного газа. Вследствие небольшой степени ионизации и практически одинаковых масс температуры ионов и метастабильных частиц считаются равными температуре атомов в основном состоянии.

Для расчета электронной температуры используется уравнение

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T_e - \frac{5}{2} k_B T_e n_e \mathbf{v}_e) + \frac{3}{2} k_B \delta v_c n_e (T_e - T_a) = \mathbf{j} \mathbf{E}_j - k_1 n_a I_i n_e - I_{ex} k_3 n_m n_e, \quad (18)$$

с граничными условиями

$$T_e|_{in} = 0, \quad \left(\frac{\partial T_e}{\partial \mathbf{n}} - \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{m_a}{2\pi m_e} - 1 \right) \right] \frac{n_e (k_B T_e)^{\frac{3}{2}}}{\lambda_e m_e^{1/2}} \right) \Big|_{dw \cup \partial \Omega_V \cup sp} = 0. \quad (19)$$

Здесь $\mathbf{v}_e = \mathbf{v}_a - (D_e/n_e) \nabla n_e - b_e \mathbf{E}_0 n_e - (D_e^T \nabla T_e / T_e)$, $\mathbf{j} = e(\mathbf{\Gamma}_i - \mathbf{\Gamma}_e)$.

Модель электромагнитного поля. Электромагнитное поле в вакуумной камере имеет сложную структуру из-за наличия нескольких первичных источников: соленоидальный индуктор (порождает компоненты ЭМП H_z, E_φ), разность потенциалов между различными компонентами плазменной системы – индуктором, плазменной струей и заземленными стенками вакуумной камеры (индуцирует компоненты E_r, E_z), постоянный положительный потенциал СПЗ (индуцирует потенциальное электрическое поле, ортогональное к поверхности образца).

Так как индуктор расположен вне вакуумной камеры, а размеры входного отверстия много меньше длины волны, то рассматривая проникновение ЭМП соленоида из разрядной трубки в вакуумную камеру, пренебрежем дифракцией поля, потерями энергии на генерацию токов Фуко в базовой плите и взаимодействием токов Фуко в базовой плите с полем в плазме.

Электрическое поле, возникающее из-за разности потенциалов между различными элементами, – потенциальное, нестационарное, оно имеет постоянную и переменную компоненты. Переменная компонента индуцируется высокочастотными колебаниями напряжения на индукторе, постоянная – раз-

ностью потенциалов между плазменной струей и заземленными стенками, основанием вакуумной камеры, а также с образцом.

В связи со сказанным, в модели ВЧ-плазменной струи необходимо рассмотреть полную систему уравнений Максвелла с учетом всех источников электромагнитного поля и возможной ионизационной неравновесности плазменной струи.

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = e(n_i - n_e), \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (20)$$

где $\mathbf{j} = e(\Gamma_i - \Gamma_e)$, $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, $\varepsilon = 1 - n_e e^2 \omega / \varepsilon_0 m_e (\nu_c^2 + \omega^2)$.

Для реализации модели электромагнитное поле представляется в виде суперпозиции высокочастотного электромагнитного $(\mathbf{E}_{RF}, \mathbf{B}_{RF})$, потенциального электрического \mathbf{E}_{cap} и амбиполярного \mathbf{E}_{amb} : $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{cap} + \mathbf{E}_{RF} + \mathbf{E}_{amb}$ полей. Обозначим суперпозицию амбиполярного и поля, созданного разностью потенциалов $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E}_{cap} + \mathbf{E}_{amb}$.

Уравнения Максвелла при этом разделяются:

$$\nabla \times \mathbf{E}_0 = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D}_0 = e(n_i - n_e), \quad \nabla \times \mathbf{H}_{RF} = \mathbf{j}_{RF} + \frac{\partial \mathbf{D}_{RF}}{\partial t}, \quad (21)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_{RF} = -\frac{\partial \mathbf{B}_{RF}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D}_{RF} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B}_{RF} = 0, \quad (22)$$

где $\mathbf{j}_{RF} = e(\Gamma_i^{RF} - \Gamma_e^{RF})$, $\Gamma_{e,i}^{RF} = \pm b_{e,i} \mathbf{E}_{RF} n_{e,i}$. Здесь знак '+' соответствует ионам, знак '-' соответствует электронам.

Используя метод комплексных амплитуд, уравнения Максвелла для вихревой компоненты ЭМП приводятся к уравнению Гельмгольца:

$$\left(\nabla - \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E}_{RF}(r, t) = \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{j}_{RF}(r, t), \quad (23)$$

которое, с учетом того, что \mathbf{E}_{RF} , \mathbf{H}_{RF} , \mathbf{j}_{RF} пропорциональны $\exp(i\omega t)$, преобразуются к системе уравнений

$$\Delta \mathbf{E}_{Re}(r) = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \omega^2 \mathbf{E}_{Re}(r) + \sigma \mu_0 \omega \mathbf{E}_{Im}(r), \quad (24)$$

$$\Delta \mathbf{E}_{Im}(r) = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \omega^2 \mathbf{E}_{Im}(r) - \sigma \mu_0 \omega \mathbf{E}_{Re}(r). \quad (25)$$

Здесь $\mathbf{E}_{Re} = Re(\mathbf{E}_{RF})$, $\mathbf{E}_{Im} = Im(\mathbf{E}_{RF})$, $\omega = 2\pi f$, $\sigma = b_e n_e \nu_m / (\omega^2 + \nu_m^2)$. Граничные условия для напряженности электрического поля имеют вид:

$$\mathbf{E}_{RF}|_{\partial\Omega_V} = -i\omega \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{s})}{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|} d^3\mathbf{s}, \quad \mathbf{E}_{RF}|_{\partial\Omega_d} = -i\omega \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{s})}{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|} d^3\mathbf{s} \quad (26)$$

$$\mathbf{E}_{RF}|_{ind} = -i\omega \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{s})_{ind}}{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|} d^3\mathbf{s}. \quad (27)$$

В связи с тем, что потенциальное электрическое поле \mathbf{E}_0 является нестационарным, уравнения для потенциальной компоненты ВЧ-поля, индуцируемой разностью потенциалов различных элементов плазменной системы, целесообразно привести к системе относительно скалярного и векторного потенциалов, используя калибровку Лоренца:

$$\frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e), \quad \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} - \Delta \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{j}, \quad (28)$$

Граничные и начальные условия для уравнений

$$\varphi|_{\partial\Omega} = 0, \quad \varphi|_{sp} = \varphi_{fl}, \quad \varphi|_{ind} = U \cos(\omega t), \quad (29)$$

$$(\mathbf{A} \times \mathbf{n})_{\partial\Omega} = 0, \quad \varphi(\mathbf{r}, 0) = \frac{\partial \varphi(\mathbf{r}, 0)}{\partial t} = 0, \quad (30)$$

$$\mathbf{A}(r, 0) = \frac{\partial \mathbf{A}(\mathbf{r}, 0)}{\partial t} = 0, \quad (31)$$

где плавающий потенциал $\varphi_{fl} = -\frac{k_B T_e}{2e} \ln\left(\frac{m_i}{\gamma_0 m_e}\right)$, $\gamma_0 = 2, 3$ - безразмерный коэффициент¹.

Напряженность потенциального электрического поля определяется по формуле

$$\mathbf{E}_0 = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (32)$$

Модель ВЧ-плазменной обработки твердых тел конструируется из 4 последовательных областей: разрядной камеры, вакуумной камеры, СПЗ и приповерхностного (дебаевского²) слоя около образца. Эти области отличаются по пространственным и временным масштабам происходящих в них процессов. Поэтому в диссертации рассматривается каждая из областей на основе разработанной единой модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления. В области разрядной камеры выполняется условие сплошности потока ($Kn \leq 0,1$), поэтому для нее рассматриваются уравнения Навье-Стокса и теплопроводности, а в плазменной струе — уравнения (1)–(5).

Таким образом, в главе построена многомасштабная математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом СПЗ у поверхности твердого тела. В отличие от ранее рассмотренных моделей, поток квазинейтральной плазмы, слой положительного заряда и приповерхностный слой у границы твердого тела рассматриваются как разномасштабные составляющие единого процесса горения разряда и взаимодействия его с твердым телом.

¹Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 511 С.

²В настоящей работе под «дебаевским слоем» понимается слой СПЗ толщиной $\sim \lambda_D$, непосредственно контактирующий с поверхностью твердого тела

Для описания процесса взаимодействия ВЧ-плазмы пониженного давления с поверхностью твердых тел использованы четыре разные системы задач, использующие разную степень приближения, они представляют собой четыре части единой модели. В результате последовательного решения систем краевых задач плазменного потока в разрядной камере и плазменной струе находятся пространственные распределения концентраций, температур и скоростей заряженных и нейтральных частиц, амплитуд, направлений векторов напряженностей вихревых и потенциального электрического и магнитного полей.

Значения этих величин используются в качестве исходных данных для задачи расчета распределения концентраций заряженных частиц и напряженности электрического поля в СПЗ. В результате ее решения находится энергия ионов и плотность ионного тока, поступающих на поверхности твердого тела.

Решение этой подзадачи, в свою очередь, используется в качестве начальных данных для приповерхностного слоя, для которого решается задача движения ионов в электрическом поле к поверхности твердого тела, что позволяет уточнить значение энергии ионов — второго из основных параметров ВЧ-плазменной обработки материалов при пониженном давлении и вычислить коэффициент фокусировки ионного потока на микронеровностях рельефа, определяющий селективность обработки.

Для решения поставленной задачи перейдем к разработке алгоритма и методов её решения.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма, численного метода и комплекса программ для решения задачи расчета параметров струйного ВЧИ-разряда при пониженном давлении.

Алгоритм решения системы задач расчета характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления реализован в виде комплекса программ для ЭВМ. Модель для расчета течения в области плазменной струи в рабочей (вакуумной) камере создана с помощью библиотек пакета OpenFOAM, для течения в разрядной камере – в пакете Comsol Multiphysics, для СПЗ и приповерхностного слоя – в пакете MatLab. Сопряжение происходит через выходные параметры каждой из программ, которые являются входными параметрами следующей программы в соответствии с условиями сопряжения модели.

Входными параметрами модели являются геометрия разрядной камеры (радиус и длина), геометрия рабочей камеры с внутренними элементами, координаты центров витков индуктора, расход плазмообразующего газа, давление на выходе, мощность на индукторе, частота электромагнитного поля, а также информация о термодинамических свойствах частиц, перечень кинетических реакций в системе и их константы скоростей.

В численном методе, используемом в пакете Comsol рассчитываются коэффициенты подвижности и диффузии с использованием немаксвелловской

ФРЭЭ. Они рассчитываются через функцию распределения, учитывающую приложенное ВЧ-поле, ФРЭЭ рассчитывается с помощью двухчастичного приближения уравнения Больцмана.

Программа для расчета характеристик потока плазмы ВЧИ-разряда в разрядной камере при $Kn \leq 0,1$ выполняет расчет характеристик по осесимметричной модели в среде COMSOL Multiphysics с использованием модулей Laminar flow, Magnetic fields, Heat transfer, Plasma module.

Для дискретизации задачи используется метод конечных элементов (МКЭ) с линейными базисными функциями. Системы линейных алгебраических уравнений, которые получаются при дискретизации уравнений модели, решаются с помощью обобщенного метода минимизации невязки GMRES.

Разработанная программа сохраняет в файл значения распределений концентрации электронов, ионов, метастабилей, температуры электронов, температуры плазмообразующего газа, скорости потока, распределения давления, напряженностей вихревой составляющей электромагнитного поля, потенциала электрического поля. Этот файл затем используется в качестве входных параметров для программы расчета параметров в плазменной струе.

Для расчета характеристик струйного течения ВЧ-плазмы пониженного давления (скорость, температура и давление плазмообразующего газа, концентрация заряженных частиц и метастабильных атомов, электронная температура, напряженности вихревой компоненты электромагнитного поля, потенциал электрического поля) в области вакуумной камеры используется гибридный подход. Уравнение Больцмана решается с помощью метода статистического моделирования Г.Берда³, а краевые задачи для компонент ЭМП, уравнения диффузии для электронов, ионов, метастабилей и электронной теплопроводности – методом конечных объемов (МКО). Для расчета параметров плазменной струи создана программа, использующая библиотеки открытого программного обеспечения OpenFOAM.

Так как поток плазмы отличается от потока нейтрального газа наличием распределенного по объему источника тепла, то для расчета характеристик потока нейтрального газа рассматривается модифицированное кинетическое уравнение Больцмана, которое учитывает распределенный по объему источник тепла, отвечающий за перенос энергии от электронов нейтральным атомам вследствие соударений.

Расчет характеристик плазменной струи ведется итерационным методом. Внешние итерации (первый уровень) заключаются в последовательном решении начально-краевой задачи для уравнения Больцмана для несущего газа и системы, состоящей из краевой задачи для уравнений Максвелла в форме телеграфных уравнений относительно комплексной амплитуды вектора напряженности электрического поля, краевой задачи для векторного и скалярного потенциалов, краевой задачи для уравнения неразрывности элект-

³Bird G. A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. – Oxford university press, 1994.

троннов, краевой задачи для уравнения неразрывности метастабилей, краевой задачи для уравнения неразрывности ионного газа и краевой задачи для уравнения сохранения энергии электронного газа.

Так как каждая из задач модели является нелинейной, то на втором уровне строятся итерационные методы решения краевых задач для ВЧ-уравнений Максвелла в форме телеграфных уравнений, уравнений неразрывности электронов, ионов и метастабилей, векторного и скалярного потенциалов и уравнения сохранения энергии электронного газа.

Третий уровень итераций учитывает линеаризацию уравнения сохранения энергии методом сноса нелинейности на предыдущий слой и отдельно расчет уравнений для действительной и мнимой частей вектора напряженности электрического поля. На данном уровне используется итерационный цикл для совместного решения всех уравнений неразрывности и процедура контроля сеточных чисел Пекле $Pe = vL/k$ для конвективных членов, где L — размер ячейки сетки, v — скорость электронного газа, k — коэффициент температуропроводности.

На каждом уровне итерационного процесса используется аналог метода Зейделя, когда найденные ранее решения (под)задач используются при решении остальных в пределах одного уровня итераций.

Процесс продолжается до достижения сходимости, которая оценивалась отношением последовательных приближений в норме

$$\left\| \frac{z^{j+1} - z^j}{z^j} \right\| < \varepsilon_r, \quad (33)$$

где z принимает значения p_a, n_e, T_e , а ε_r - заданная относительная погрешность расчетов ($\leq 10^{-2}$).

Система краевых задач для слоя положительного заряда (СПЗ) решалась итерационно конечно-разностным методом с использованием алгоритма Шарфеттера-Гуммеля⁴.

Программа для расчета характеристик СПЗ и параметров приповерхностного слоя написана в среде MatLab. Программа позволяет получить распределения концентраций электронов, ионов, потенциала электрического поля в СПЗ, энергии ионов и ионного тока, поступающего на поверхность твердого тела.

Разработанные алгоритм, численные методы и комплекс программ позволяют провести расчеты характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления в разрядной камере, плазменной струе, СПЗ и приповерхностном слое.

⁴Kulikovsky A. A. A more accurate Scharfetter-Gummel algorithm of electron transport for semiconductor and gas discharge simulation // Journal of computational physics. – 1995. – Т. 119. – №. 1. – С. 149-155.

В **пятой главе** приводятся результаты численных исследований газодинамических, электродинамических и плазмодинамических параметров течения ВЧИ-разряда пониженного давления.

Проведена верификация метода расчета по трем различным сеткам и путем сравнения с аналитическими решениями, решениями известных задач и валидация по экспериментальным данным.

Представлены результаты численных расчетов по описанной в предыдущих главах математической модели, проведена верификация модели и сравнение расчетов с экспериментальными данными. При различных исходных данных рассчитаны распределения концентрации электронов n_e , ионов n_i и метастабилей n_m , электронной и газовой температур T_e и T_a , давления p , скорости течения плазмообразующего газа \mathbf{v}_a , напряженности электрического поля \mathbf{E}_{Re} , \mathbf{E}_{Im} , потенциала поля φ .

Из рис. 6а и 6б видно, что при расходе несущего газа 2000 ст.куб.см.мин нижняя граница плазменного сгустка смещается к центру индуктора, верхняя граница отдаляется от него. Скорость и температура несущего газа имеют максимум в центре сгустка. Происходит перераспределение концентрации заряженных и метастабильных частиц в пределах области индуктора.

Получено распределение ФРЭЭ для струйного ВЧИ-разряда пониженного давления при частотах поля $f = 1 - 40$ МГц путем решения уравнения Больцмана. Установлено, что использование ФРЭЭ Максвелла возможно только при частоте поля 13,56 МГц и выше. Расчет по двухчастичному приближению для уравнения Больцмана показывает, что при давлениях 13,3—133 Па и частотах ВЧ-поля ниже 13,56 МГц полученное ФРЭЭ отличается от ФРЭЭ Максвелла и Дрюейстейна более чем на 10%, то есть при частотах ВЧ-поля ниже 13,56 МГц необходим расчет ФРЭЭ и учет коэффициентов уравнений системы в зависимости от полученной ФРЭЭ.

С помощью численного экспериментирования подтверждено, что для частот поля ниже 13,56 МГц разница в концентрации электронов при расчете с ФРЭЭ Максвелла и ФРЭЭ, рассчитанной по уравнению Больцмана может отличаться более чем в 1,5 раза в зависимости от входных параметров модели. Это подтверждает вывод о необходимости расчета ФРЭЭ для струйного ВЧИ-разряда пониженного давления.

Исследовано влияние частоты электромагнитного поля для различных процессов обработки изделий. Зависимость электронной концентрации от частоты возбуждения имеет экстремум в диапазоне 250 кГц—39,8 МГц. Например, при подводимой мощности 1 кВт концентрация электронов достигает максимума при частоте 5 МГц. При этом частота, соответствующая максимуму электронной плотности, меняется в зависимости от мощности. При увеличении мощности максимум смещается в сторону более низких частот. Ввиду нелинейной зависимости параметров плазмы, из расчетов можно сделать вывод, что эффективный энергоклад смещается в диапазоне частот от 6,5 МГц при мощности 700 Вт до 2,82 МГц при мощности 2,5 кВт. Таким

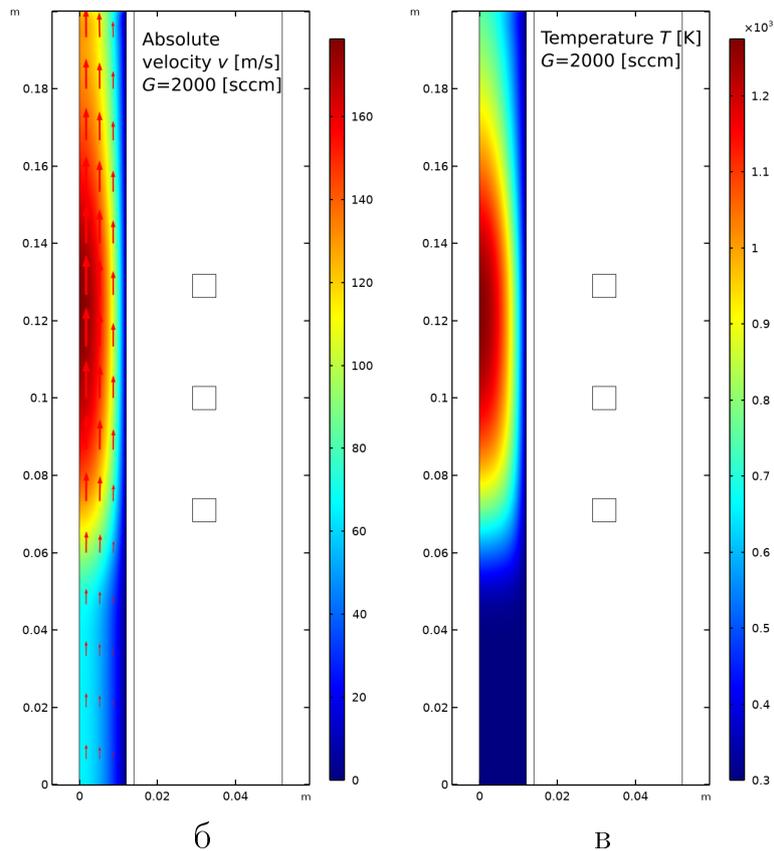


Рис. 6 — Пространственное распределение модуля скорости v (а) и температуры несущего газа (б) при расходе газа $G = 2000$ sccm и давлении 113 Па

образом, можно подобрать требуемую мощность для определенной частоты по установленным зависимостям.

В результате численных экспериментов установлено формирование слоистой структуры разряда в ВЧ-плазменной струе, получены пространственные распределения электронной и ионной плотностей. Обнаружено, что в плазменной струе чередуются области пространственных положительного и отрицательного зарядов. В начале и конце струи плотность ионов больше плотности электронов, тогда как в середине плотность электронов превышает плотность ионов. Причинами этих явлений являются быстрое расширение потока после входа в вакуумную камеру, ограниченные скорости ионизации и рекомбинации, а также высокая скорость потока.

В результате численных расчетов установлено наличие в плазменной струе всех компонент электромагнитного поля: $E_z, E_\varphi, H_z, H_\varphi$ и показано, что струя ВЧИ-разряда не является потоком распадающейся плазмы, то есть подтверждено, что ВЧИ-плазменная струя является несамостоятельным разрядом.

Теоретически предсказан и экспериментально подтвержден эффект перегрева струи по периферии, особенно ощутимый при скоростях потока боль-

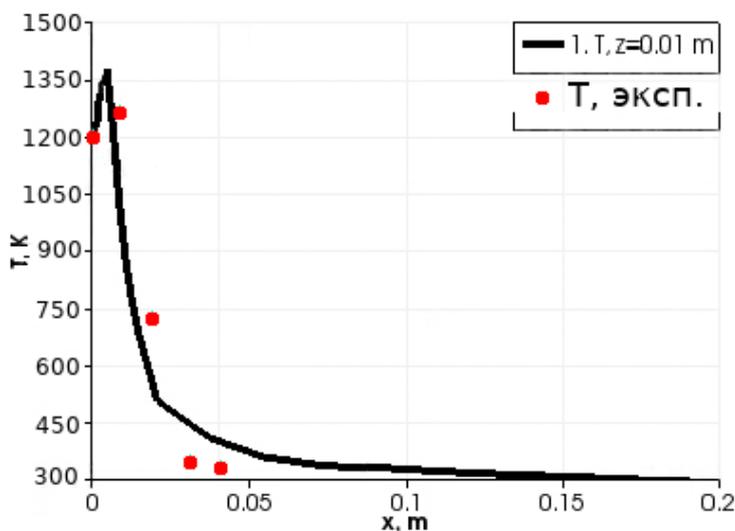


Рис. 7 — а) Радиальное распределение температуры T_a (на рис. обозн. T [K]) в поперечном сечении струи при наличии образца. Образец располагался на расстоянии $L_{tb} = 0,2$ м от входного отверстия ($R_{rk} = 0,012$ м, $R_{vk} = 0,2$ м, $L_{vk} = 0,5$ м, $G = 0,16$ г/с, $P = 2,4$ кВт, $v_{inlet} = 440$ м/с). Точками обозначен эксперимент. б) Экспериментальный фланец с термопарами.

ше 440 м/с и мощности разряда более 2,4 кВт. Максимальное значение температуры создается на периферии струи, а локальный минимум температуры достигается в центре (рис. 7). Температура в поперечном сечении быстро спадает при удалении от струи. Интерпретация этого эффекта следующая: в центре струи несущий газ охлаждается из-за расширения потока; на периферии струи поток плазмы встречается с неподвижным газом внутри вакуумной камеры, при этом возрастает локальное давление газа, что приводит к увеличению частоты столкновений электронов с атомами и ионами, частоты столкновений возбужденных частиц; следствием этого является увеличение объемной рекомбинации заряженных частиц и интенсификация процессов гашения частиц в возбужденных состояниях. В процессах рекомбинации и гашения возбужденных состояний выделяется энергия, затраченная на ионизацию и возбуждение атомов. Совокупное воздействие газодинамических и плазмодинамических эффектов приводит к повышению температуры газа на периферии струи.

С помощью численных расчетов установлено, что у поверхности твердого тела формируется слой положительного заряда, достигающий 50 В, при этом $|E|$ варьируется от 0 до $6 \cdot 10^3$ В/м. Периодическое решение устанавливается в течение ~ 10 периодов колебания поля. После установления периодического решения концентрация ионов в течение одного периода колебания поля практически не меняется. Концентрация электронов изменяется периодически относительно среднего значения. При этом график пространственного

распределения концентрации ионов является выпуклым вверх, разница максимального и минимального значений в СПЗ равняется $3 \cdot 10^{12}$. В то время как распределение концентрации электронов близко к нулю практически во всем объеме СПЗ и резко, на 14 порядков возрастает вблизи границы СПЗ с плазмой, то есть формируется слой положительного заряда.

При рассматриваемых в диссертации условиях $\lambda_D \approx 10^{-5}$ м, в то время как длина свободного пробега частиц составляет величину $\approx 10^{-3}$ м. Поэтому слой, контактирующий с поверхностью твердого тела толщиной λ_D (дебаевский слой), является бесстолкновительным и ионы свободно «падают» сквозь нее на поверхность тела под воздействием поля поверхностного заряда. Расчеты показали, что приповерхностный слой может оказывать существенное влияние на характер взаимодействия плазмы с поверхностью. Роль приповерхностного слоя при обработке поверхности материалов ионами низкой энергии заключается в фокусировке ионного потока на локальных неоднородностях поверхностного заряда образца. Найдены диапазоны энергии ионов, при которых происходит избирательная обработка поверхности твердого тела. В частности, на основании результатов расчетов параметров СПЗ и приповерхностного слоя, проведено моделирование процессов нанесения покрытий и распыления наночастиц серебра и атомов меди в потоке плазмы ВЧИ-разряда пониженного давления.

В **шестой главе** на основании проведенных расчетов описываются разработанные научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления и технологические основы разработки ВЧИ-плазменных установок и технологических процессов модификации твердых тел с использованием струйного ВЧИ-разряда пониженного давления. Описывается применение результатов диссертации при разработке конструкций ВЧИ-плазменных установок, при создании технологических процессов модификации твердых тел и методик определения рабочих параметров ВЧИ-плазменной установки по заданным характеристикам ВЧ-плазмы пониженного давления.

На основании проведенных численных и экспериментальных исследований разработаны научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, представляющие собой совокупность следующих положений:

– 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 *H*-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 раз-

ряда с твердым телом: в разрядной камере создается плазменный поток с концентрацией электронов $n_e = 10^{17} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$, электронной температурой $T_e = 0,5 - 2 \text{ эВ}$, газовой температурой $T_a = (1 - 4) \cdot 10^3 \text{ К}$; плазменная струя обеспечивает поддержание концентрации заряженных частиц в диапазонах $n_e = 10^{16} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_e = 0,8 - 1,5 \text{ эВ}$, $T_a = 320 - 600 \text{ К}$, транспортировку их к поверхности твердого тела, и участвует в формировании характеристик СПЗ и поверхностного слоя в окрестности тела; в СПЗ под действием потенциального поля $E_p = 30 - 50 \text{ В}$ ионы ускоряются до энергии $30 - 50 \text{ эВ}$; в приповерхностном слое толщиной $\lambda_D = 50 - 70 \text{ мкм}$ происходит фокусировка ионного потока на вершинах микронеровностей поверхности и его дополнительное ускорение;

– 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_{cap} 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;

– 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;

Разработаны технологические основы применения математической модели при разработке конструкций ВЧИ-плазменных установок пониженного давления. Одним из направлений применения разработанной единой математической модели струи ВЧИ-разряда пониженного давления является создание новых технологических процессов обработки, получения режимов работы установки, а также разработка оборудования. Суть методик определения рабочих параметров ВЧИ-плазменной установки заключается в проведении серии численных экспериментов при варьировании рабочих параметров ВЧИ-плазменных установок для получения заданных параметров ВЧ-плазменной обработки. На основании расчетов предложены базовые режимы ВЧ-плазменной полировки конструкционных материалов: энергия ионов $W_i = 50 \text{ эВ}$; плотность ионного тока на поверхность тела для диэлектриков $J_i = 25 \text{ А/м}^2$,

для полупроводников $J_i = 15 \text{ А/м}^2$, для металлов $J_i = 10 \text{ А/м}^2$, для кристаллических являются исключением стеклокристаллические материалы (например, ситалл), для которых $J_i = 0,8 - 1,0 \text{ А/м}^2$. Это позволяет на основе полученных результатов рассчитывать параметры ВЧ-плазменных установок других размеров и конструкций.

Разработаны рекомендации по обработке материалов различной физической природы в зависимости от частоты электромагнитного ВЧ-поля и мощности разряда по результатам расчетов, представленных в пятой главе. Установлено, что максимумы интенсивности ионной бомбардировки, температурного воздействия и концентрации электронов наблюдаются на разных частотах, что дает возможность подбирать необходимые параметры воздействия на изделие в зависимости от частоты электромагнитного поля.

В результате теоретических исследований уточнены диапазоны изменения плотности ионного тока и энергии ионов для различных видов обработки. Численное решение позволило рассчитать диапазоны изменения концентрации электронов, их температуры и температуры тяжелых частиц, при которых плотность ионного тока на поверхность подложки меняется в диапазоне $0,3-25 \text{ А/м}^2$, а энергия ионов бомбардирующих поверхность от 10 до 55 эВ.

На основании проведенных расчетов разработаны рекомендации по выбору зоны равномерной обработки изделий в струе ВЧ-плазмы пониженного давления. При рассматриваемых в диссертации параметрах, установлено, что для равномерной обработки рекомендуется устанавливать расход газа не более $0,2 \text{ г/с}$ и изделие размещать на расстоянии не менее 8 см от базовой плиты вакуумной камеры.

На основе результатов расчетов, представленных в настоящей работе, с целью получения струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления и исследований его характеристик и возможностей применения для полировки материалов и обработки медицинских инструментов с твердосплавными пластинами, разработана и создана экспериментальная установка. На основе проведенных численных расчетов получены необходимые конструкционные параметры ВЧИ-плазменной установки: радиус разрядной камеры ВЧИ-плазмотрона – $0,012 \text{ м}$, высота и диаметр ВЧ-индуктора – $0,058 \text{ м}$, диаметр и высота рабочей камеры – $0,5 \text{ м}$, высота разрядной камеры ВЧИ-плазмотрона – $0,3 \text{ м}$.

С помощью установленных в результате экспериментальных исследований и численных расчетов характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления установлены значения энергии ионов и ионного тока на поверхность изделия, обеспечивающие полировку поверхности ситалла и увеличение показателей прочности рабочих частей зажимных медицинских инструментов (иглодержателей, пинцетов, зажимов кровоостанавливающих, ножниц микрохирургических). Испытания, проведенные по заводским методикам, показали увеличенный срок службы в 2–2,5 раза.

Таким образом, в результате проведенных исследований созданы технологические основы применения математической модели при разработке конструкций ВЧИ-плазменных установок и технологических процессов модификации твердых тел с использованием струйного ВЧИ-разряда пониженного давления.

Установленные закономерности струйного течения ВЧ-плазмы пониженного давления количественно согласуются с экспериментальными данными. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных не превышает погрешности измерений. Это означает, что разработанная математическая модель может быть использована для создания новых технологических процессов обработки твердых тел в ВЧИ-плазме пониженного давления. Разработанная методика расчета и модель имеют предиктивный характер.

Результаты диссертации применены к разработке ВЧИ-плазменных установок для улучшения показателей качества медицинских инструментов и технологических процессов полировки твердых тел.

Разработанная математическая модель внедрена в ООО «Плазма-ВСТ», расчеты для изготовления установки – в ООО «Производственно-техническое объединение «Медтехника», г. Казань, расчеты по параметрам обработки – в ООО «Научно-производственная фирма «ХЭЛП». По результатам внедрения получен суммарный экономический эффект 13,320 млн. рублей.

В заключении приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Разработаны научные основы создания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, которые позволили доказать, что он представляет собой новый вид ВЧ-разряда, который является единой сущностью, в котором сосуществуют различные формы ВЧ-разрядов: самостоятельный H -разряд в разрядной камере, несамостоятельный комбинированный разряд в плазменной струе и слое положительного заряда (СПЗ) с приповерхностным слоем у границы твердого тела;
2. Экспериментально и теоретически доказано, что плазменная струя является новым видом несамостоятельного ВЧ-разряда пониженного давления, при этом численно подтверждено наличие в струе как азимутальной составляющей магнитного поля H_φ величиной до 120 А/м, так и аксиальной составляющей электрического поля E_z величиной до 250 В/м. Показано, что в плазменной струе происходит ионизация газового потока, то есть ВЧ-плазменная струя не является потоком распадающейся плазмы, это теоретически доказывает, что ВЧИ-плазменная струя представляет собой несамостоятельный вид разряда комбинированного типа;
3. С помощью сформулированной математической модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом СПЗ у поверхности твердого тела проведены последовательные расчеты характеристик

- плазменного потока в области разрядной камеры, плазменной струе, СПЗ и приповерхностном слое у границы твердого тела, и установлены основные зависимости параметров течения ВЧ-плазмы пониженного давления в невозмущенном потоке и при обтекании твердого тела, проведена верификация и валидация модели;
4. Разработанный гибридный численный метод решения задачи сквозного моделирования струйного ВЧИ-разряда пониженного давления позволил рассчитать основные характеристики струйного ВЧИ-разряда пониженного давления: распределение электромагнитного поля, температуру, скорость и давление плазмообразующего газа, электронную температуру, концентрации электронов, ионов и метастабильных частиц в пределах изменения скоростей плазменного потока до 1000 м/с, расхода плазмообразующего газа G до 0,24 г/с, давлений $p = 13,3 - 133$ Па, мощности разряда P_p в диапазоне от 100 до 3800 Вт, частоты электромагнитного поля $f = 1,76 - 13,56$ МГц;
 5. С помощью немаксвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) рассчитаны коэффициенты переноса и скоростей реакций: коэффициенты диффузии, подвижности заряженных частиц, частот упругих и неупругих столкновений, учитывающие особенности кинетики ВЧИ-разряда с продувом газа в исследуемых пределах входных параметров, что позволило достичь количественного согласования расчетных величин с экспериментальными данными;
 6. В результате численных экспериментов установлено формирование слоистой структуры разряда в ВЧ-струе, представляющее собой чередование зон преобладания положительного и отрицательного объемных зарядов, обнаружен различный характер распределения ЭМП, подтвержден механизм образования струи как самостоятельного вида ВЧ-разряда;
 7. Показано, что разработанная модель является предиктивной и с помощью нее в результате численных экспериментов определена оптимальная зона формирования потока ионов на поверхность твердого тела с заданными характеристиками энергии ионов и плотности ионного тока, определено оптимальное расстояние до области обработки материалов от базовой плиты вакуумной камеры, коррелирующее с зоной наибольшей проводимости плазмы. Обнаружен эффект образования зоны перегрева по периферии струи около входного отверстия вакуумной камеры, в которой температура потока выше температуры в центре потока более 50 °С при скорости потока на входе в вакуумную камеру более 440 м/с и мощности разряда более 2,4 кВт при расходе плазмообразующего газа более 0,16 г/с, который подтвержден экспериментально. Обоснован выбор частоты электромагнитного поля для различных процессов

обработки твердых тел. Установлено, что максимум интенсивности температурного воздействия, энергии и интенсивности ионной бомбардировки достигаются при разных частотах электромагнитного поля, что позволяет оптимизировать выбор частоты для различных процессов модификации твердых тел;

8. На основании проведенных численных исследований составлены рекомендации для практического применения разработанной единой математической модели струйного ВЧИ-разряда пониженного давления, используемой при проектировании технологических процессов и ВЧ-плазменных установок для плазменной модификации твердых тел в потоке ВЧ-плазмы пониженного давления по частоте электромагнитного поля, по параметрам равномерной обработки изделий, по диапазону мощностей для получения необходимых режимов ионной бомбардировки;
9. На основании сопоставления численных расчетов и имеющихся экспериментальных данных, установлено, что полировку конструкционных материалов в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления целесообразно проводить в режиме ионной бомбардировки с энергией ионов $W_i = 50$ эВ и плотностью ионного тока $J_i = 0,8 - 25$ А/м², что позволяет проводить трансфер технологий на установки с другими конструктивными параметрами.
10. Разработанная математическая модель применена в ООО «Плазма-ВСТ» (г. Казань) для разработки технологии полировки изделий из ситалла. Расчеты характеристик струйного ВЧИ-разряда пониженного давления использованы в ООО «Производственно—техническое объединение «Медтехника» (г.Казань) при проектировании и изготовлении установки ВЧ-плазменной обработки медицинских инструментов. С помощью численных расчетов определены параметры обработки медицинских инструментов для ООО «Научно-производственная фирма «ХЭЛП» (г. Казань). В результате обработки медицинских инструментов с помощью созданной ВЧ-плазменной установки удалось увеличить прочность иглодержателей, пинцетов, зажимов кровоостанавливающих, ножниц микрохирургических в 2—2,5 раза. Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления может быть использована при разработке технологических процессов и установок плазменной модификации изделий в легкой промышленности, микроэлектронике, автомобильной и других отраслях промышленного производства.

Работы по теме диссертации, опубликованные в ведущих, рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК РФ, входящие в базы данных Scopus и WoS

1. **Shemakhin A.Y.** Study of the Electron Velocity Distribution Function in Weakly Ionized Radiofrequency Plasma / A.Y. Shemakhin // High Energy Chemistry. — 2024. — V. 58, No. 1. — P. 147–152. — Текст: непосредственный (K2)
2. Абдуллин И.Ш. Сквозная математическая модель струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, **А.Ю. Шемахин** // Инженерно-физический журнал. — 2024. — Т. 97, № 2. — С. 491. — Текст: непосредственный (K1)
3. **Shemakhin A.Y.** Simulation of Low-Pressure Inductively Coupled Plasma with Displacement Potential and Gas Flow/ A.Y. Shemakhin // Plasma Physics Reports. — 2024. — V. 50, No. 1. — P. 89–100. — Текст: непосредственный (K1)
4. **Shemakhin A.Yu.** Investigation of the discharge chamber expansion region influence on the electron density in an inductively coupled RF discharge / A.Yu. Shemakhin, V.S. Zheltukhin, G.B. Kiselev, E.Yu. Shemakhin, T.N. Terentev // High energy chemistry. — 2023. — V. 57. — No. Suppl. 1. — P. S227–S233. — Текст: непосредственный (K1)
5. Fairushin I.I. Simulation of Copper Nanostructure Formation on Silicon Dioxide Microsubstrate Surface / I.I. Fairushin, **A.Y. Shemakhin** //High Energy Chemistry. — 2023. — V. 57, No. Suppl 1. — P. S41–S44. — Текст: непосредственный (K1)
6. Terentev T.N. Frequency dependencies of the characteristics of an inductively coupled radiofrequency discharge at reduced pressure / T. N. Terentev, **A.Y. Shemakhin**, E.S. Samsonova, V.S. Zheltukhin // Plasma Sources Science and Technology. — 2022. — V. 31, No. 9. — P. 094005. — Текст: непосредственный (K1)
7. **Шемахин А.Ю.** Математическое моделирование ВЧ разряда пониженного давления с продувом газа в нелокальном приближении: электро- и плазмодинамика / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Е.Ю. Шемахин // Инженерно-физический журнал. — 2021. — Т. 94, № 5. — С. 1368–1376. — Текст: непосредственный (K1)
8. Fairushin I.I. Molecular Dynamics Simulation of Copper Nanofilm Self-Assembly on Silicon Substrate under Gas-Discharge Plasma Conditions / I.I. Fairushin, **A.Y. Shemakhin**, A.A. Khabir'yanova //High Energy Chemistry. — 2021. — V. 55. — P. 399 — 401. — Текст: непосредственный (K1)
9. **Shemakhin A.Y.** Mathematical modelling of RF plasma flow at low pressures with 3D electromagnetic field / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin //Advances in Materials Science and Engineering. — 2019. — V. 2019. — P. 120217. — Текст: непосредственный (K1)
10. Желтухин В.С. Моделирование течения нейтральной компоненты ВЧ-плазмы в асимметричной вакуумной камере в диапазонах чисел Кнудсена $0,3 < Kn < 3$ для несущего газа / В.С. Желтухин, Г.Ж. Худайбергенов, **А.Ю. Шемахин** // Вестник Омского университета. — 2015. — №2 (76). — С. 30–34. — Текст: непосредственный(K1)
11. Струнин В.И. Моделирование газодинамического истечения свободно расширяющейся газовой струи в пространство с пониженным давлением фона / В. И. Струнин, Г. Ж. Худайбергенов, **А.Ю. Шемахин**, В.С. Желтухин // Вестник Омского университета. —2014. —№2 (72). — С. 53–58. — Текст: непосредственный (K1)

12. Желтухин В.С. Моделирование струйного течения высокочастотной плазмы при пониженных давлениях / В.С. Желтухин, **А.Ю. Шемахин** // Математическое моделирование. — 2013. — Т. 25, №. 6. — С. 64—71. — Текст: непосредственный (К1)
13. Абдуллин И.Ш. Моделирование газодинамического истечения струи аргон-силановой плазмы в затопленное пространство / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, В.И. Струнин, **А.Ю. Шемахин**, Г.Ж. Худайбергенов, А.А. Хубатхузин // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т.16, № 19. — С. 95—98. — Текст: непосредственный (К2)
14. **Shemakhin A.Y.** Numerical and experimental study of a warming up effect of an underexpanded rarefied rf plasma jet outflowing into a flooded area / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin, A.A. Khubatkhusin // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2016. — V. 774, No. 1. — P. 012167.— Текст: непосредственный (К3)
15. **Shemakhin A.Y.** Mathematical modelling of RF plasma flow at low pressure with electrodynamics / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2017. — V. 927, No. 1. — P. 012055.— Текст: непосредственный (К3)
16. Zheltukhin V.S. Simulation of rarefied low pressure RF plasma flow around the sample / V.S. Zheltukhin, **A.Y. Shemakhin** // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2017. — V. 789, No. 1. — P. 012071.— Текст: непосредственный (К3)
17. Zheltukhin V.S. Mathematical modelling of RF plasma flow at low pressure with metastable and electrodynamics / V.S. Zheltukhin, **A.Y. Shemakhin** // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2019. — V. 1158, No. 4. — P. 042044.— Текст: непосредственный (К3)
18. **Shemakhin A.Y.** Experimental installation to study the RF plasma flow at low pressures with experiment data synchronization / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin, E.Y. Shemakhin, T.N. Terentev, A.O. Sofronitsky // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2020. — V. 1588, No. 1. — P. 012018.— Текст: непосредственный (К3)
19. **Shemakhin A.Y.** Study of RF plasma flow at low pressure: Electron temperature influence / Shemakhin A.Yu., Zheltukhin V.S., Shemakhin E.Yu., Pryalukin I.S. // Journal of Physics: Conference Series. — 2020.—V.1588, №1.— P. 012062 — Текст: непосредственный. (К3)
20. Zheltukhin V. S. Calculation of conditions for maintaining an ICRF-plasma using a self-consistent model / V.S. Zheltukhin, T.N. Terentev, **A.Y. Shemakhin**, E.S. Samsonova // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2021. — V. 1870, No. 1. — P. 012018.— Текст: непосредственный (К3)
21. Zheltukhin V. Self-Consistent Model of Low Pressure Inductively Coupled RF Discharge / V. Zheltukhin, **A. Shemakhin**, T. Terentev, E. Samsonova // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. — 2022. — V. 141. — P. 587—595.— Текст: непосредственный (К3)
22. Terentev T.N. Experimental installation for study the low-power ICRF plasma at low pressures with equipment for experiment data synchronization / T.N. Terentev, V.S. Zheltukhin, **A.Y. Shemakhin**, I.K. Nekrasov, E.S. Samsonova, E.Y. Shemakhin, I.E. Tsokalo, V.A. Tyurin // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. — 2022. — V. 2270, No. 1. — P. 012014. — Текст: непосредственный (К3)
23. **Shemakhin A.Y.** A mathematical model of an inductively coupled radio-frequency discharge at low pressure as nonlinear partial eigenproblem / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin, E.Y. Shemakhin, E.S. Samsonova, T.N. Terentev //Journal of Physics:

Conference Series. IOP Publishing. — 2022. — V. 2388, No. 1. — P. 012050.— Текст: непосредственный (К3)

24. **Shemakhin A.Y.** PIGsolver software for simulation RF plasma flow at intermediate pressure //Proceedings - 2024 Ivannikov Memorial Workshop, IVMEM 2024. - 2024. - Vol., Is.. - P.49-54. DOI:10.1109/IVMEM63006.2024.10659714.— Текст: непосредственный (К3)

Иные работы по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях

25. **Shemakhin A. Y.** Calculation of the main characteristics distribution for inductive diffuse discharge in the approximation of endless soleniod / A.Y. Shemakhin, D.V. Shurtakova, A.K. Nurullina, V.S. Zheltukhin, I.A. Borodaev //Modern Science. — 2017. — No. 8. — P. 9—13. — Текст: непосредственный
26. Желтухин В.С. Самосогласованная по внутренним и внешним параметрам модель высокочастотного индукционного разряда пониженного давления / В.С. Желтухин, **А.Ю. Шемахин**, Т.Н. Терентьев, Е.С. Самсонова // Таврический вестник информатики и математики. — 2021. — №. 2 (51). — С. 24—31. — Текст: непосредственный (К3)
27. **Шемахин А.Ю.** Математическое моделирование ВЧ-плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры с заряженным образцом / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Е.Ю. Шемахин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2021. — №. 4 (24). — С. 44 — 49. — Текст: непосредственный (К2)
28. Желтухин В.С. Численное и экспериментальное исследование эффекта разогрева недорасширенной струи разреженной ВЧ плазмы при истечении в затопленное пространство / В.С. Желтухин, **А.Ю. Шемахин**, А.А. Хубатхузин, К.В. Ананьев // Вестник Казанского технологического университета. — 2016. —Т. 19, № 18. — С. 127—131. — Текст: непосредственный (К2)
29. Абдуллин И.Ш. Модель взаимодействия плазмы индукционного высокочастотного разряда пониженного давления с наночастицами серебра / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.А. Бородаев, **А.Ю. Шемахин** // Успехи прикладной физики. — 2013. — № 3. — С. 291—295. — Текст: непосредственный (К2)
30. **Shemakhin A.Y.** Mathematical modeling of RF plasma flow with metastable atoms at low pressure / A.Y. Shemakhin, V.S. Zheltukhin // Mathematica Montisnigri. — 2017. — V. 39. — P. 126—132.— Текст: непосредственный
31. **Шемахин А.Ю.** Характеристики струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления в процессах обработки твердых тел / А. Ю. Шемахин, И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, Е. А. Макеева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2024. — № 3(35). — С. 167-175.— Текст: непосредственный (К2)

Монографии

32. Абдуллин И.Ш. Математическое моделирование газодинамики струйных течений высокочастотной плазмы пониженного давления / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, А.А. Хубатхузин, **А.Ю. Шемахин**. — Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. — 166 с. ISBN 978-5-85247-777-4. — Текст: непосредственный

Свидетельства о регистрации программ

33. **Шемахин А.Ю.** Программа расчета параметров тлеющего разряда пониженного давления. V.1.0.0. 2018. № регистрации 0002022 / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Р.Р. Сафиуллина. — Текст: электронный
34. **Шемахин А.Ю.** Программа визуального масштабирования при отображении двухмерных графиков посредством web-интерфейса. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617244 от 16.07.2014 / А.Ю. Шемахин, Е.Ю. Рябченко, И.В. Филин. — Текст: электронный

Материалы конференций и иные публикации

35. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование процессов в струйном ВЧИ-разряде пониженного давления / А.Ю. Шемахин // XVIII Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование»: сборник материалов, (г. Саров, 10-12 апреля 2024 г.). — Саров: ООО «Интерконтакт», 2024, — 535 с. (2024 г.), С. 337. — Текст: непосредственный
36. Шемахин А.Ю. Сквозная модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления / А.Ю. Шемахин // 51-я конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов, (г. Звенигород, 18-22 марта 2024 г.) / под ред.: В.А. Иванов, И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, Д.Г. Васильков, С.А. Двинин, Ю.А. Лебедев, Г.А. Вергунова, А.И. Мещеряков — Москва: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2024. — 316 с. (2024 г.), С. 185. — Текст: непосредственный
37. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование струйного ВЧИ-разряда пониженного давления / А.Ю. Шемахин // XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии»: Тез. докл. 10 марта — 18 марта 2024 г., Новосибирск — Шерегеш / под ред. Е.И. Крауса; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2024. — 226 с. (2024 г.), С. 206. — Текст: непосредственный
38. Шемахин А.Ю. Сквозная модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления А.Ю. Шемахин // IV международная конференция «газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов (г. Казань, 6-9 декабря 2023 г.) / М-во высшего образования и науки Рос. Федерации, М-во образования и науки Респ. Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т и др. — Казань: Бук, 2023. — 676 с. — Текст: непосредственный
39. Шемахин А.Ю. Сквозная модель и расчет параметров струйного ВЧИ-разряда пониженного давления / А.Ю. Шемахин // X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024»: Сборник научных трудов. (г. Москва, 26-29 марта 2024) / под ред.: Крупышева Полина Олеговна / М.: НИЯУ МИФИ, 2024. — 464 с. (2024 г.), С. 185 — Текст: непосредственный
40. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование процессов в ВЧ-разряде в динамическом вакууме / А.Ю. Шемахин // XVII Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование» (МММ-2023): Сборник материалов, (г. Саров, 5-7 апреля 2023) / под ред. Сироткиной А.Г. / Саров: ООО «Интерконтакт», 2023 — 473 с., С. 339. — Текст: непосредственный
41. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления в условиях динамического вакуума / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Е.Ю. Шемахин // IX Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2023»: Сборник научных трудов. (г. Москва, 28-31 марта 2023) / под ред. Крупышевой П.О. / М.: НИЯУ МИФИ, 2023. — 440 с. (2023 г.), С. 142. — Текст: непосредственный
42. Шемахин А.Ю. Особенности струйного ВЧ-разряда в условиях динамического вакуума / Шемахин А.Ю. // L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: Сборник тезисов докладов. / (Звенигород, 20 — 24 марта 2023 г.) / Составители: В.А. Иванов, И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, Д.Г. Васильков, С.А. Двинин, Ю.А. Лебедев, Г.А. Вергунова, А.И. Мещеряков / М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», Москва 2023 г. — 346 с. (2023 г.), С. 209. — Текст: непосредственный
43. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры в условиях динамического вакуума / А.Ю. Шемахин // XVII Всероссийская школа-конференция молодых

- ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии»: Тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых 26 февраля — 6 марта 2023 г., Новосибирск — Шерегеш / под ред. Е.И. Крауса; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. — 240 с. (2023 г.), С. 219. — Текст: непосредственный
44. Шемахин А.Ю. Модель струйного ВЧ-разряда в условиях динамического вакуума / А.Ю. Шемахин // III Международная конференция "Газоразрядная плазма и синтез наноструктур" (GDP Nano 2022): сборник трудов (г. Казань, 1-4 декабря 2022 г.) / М-во высшего образования и науки Рос. Федерации, М-во образования и науки Респ. Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т и др. — Казань: Бук, 2022. — 676 с. (2022 г.), С. 474 — Текст: непосредственный
 45. Шемахин А.Ю. Математическая модель ВЧ-разряда в динамическом вакууме / А.Ю. Шемахин // Четырнадцатая Международная конференция по Прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2022): Материалы тезисов, 4—13 сентября 2022 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2022. — 488 с.: ил., С. 142. — Текст: непосредственный
 46. Shemakhin A.Yu. Mathematical modeling of RF plasma flow in vacuum chamber at low pressures / A.Yu. Shemakhin, V.S. Zheltukhin // X International conference Plasma physics and plasma technology (PPPT-10, Minsk):: proceedings of the X International conference, Minsk, 12-16 sept. 2022. — Minsk: Kovcheg, 2022. — P. 374—377. — Текст: непосредственный
 47. Шемахин А.Ю. Математическая модель ВЧ-разряда в условиях динамического вакуума / А.Ю. Шемахин // XIV Международная научно-техническая конференция "Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий" (НТП ПНФП 2022): Сборник материалов / (Казань, 1-4 ноября 2022 г.): Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2022.— С. 366—370. — Текст: непосредственный
 48. Shemakhin A. Mathematical modeling of plasma flow at low pressures in vacuum chamber with charge on body / A. Shemakhin, V. Zheltukhin, E. Shemakhin // Proceedings and programme of the International workshop IWCI-2022.— 2022.— P.14. — Текст: непосредственный
 49. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления при наличии модельного образца / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Е.Ю. Шемахин // Математика и математическое моделирование: Сборник Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы. «Интерконтакт».— 2022.— С.4-5 — Текст: непосредственный
 50. Шемахин А.Ю. Моделирование зависимости электронной плотности в индукционной плазме аргона от частоты поля / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Е.С. Самсонова, Т.Н. Терентьев // Математика и математическое моделирование: Сборник Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы. «Интерконтакт», 2022. С. 3. — Текст: непосредственный
 51. Shemakhin A. Mathematical modeling of rf plasma flow at low pressures in vacuum chamber with charged body / A. Shemakhin // Proceedings and programme of the International workshop IWCI-2021. — 2021. — P. 68. — Текст: непосредственный
 52. Желтухин В. С. Самосогласованная одномерная модель индукционно-связанного высокочастотного разряда пониженного давления / В.С. Желтухин, А. Ю. Шемахин, Т. Н. Терентьев, Е. С. Самсонова // Сборник материалов международной конференции КРОМШ. — Симферополь: ПОЛИПРИНТ.— 2021. — С. 97. — Текст: непосредственный
 53. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления с модельным заряженным образцом / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Тезисы XXVI Байкальской Всероссийской конференции с международным участием. — 2021.— С. 97. — Текст: непосредственный

54. Shemakhin A. Yu. Investigation of low-pressure ion cyclotron range of frequencies discharge in a self-consistent formulation / A. Yu. Shemakhin, V. S. Zheltukhin, E. S. Samsonova, T. N. Terentev // Book of abstracts XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. - 2021. — С. 239. — Текст: непосредственный
55. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование высокочастотной плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры с заряженным образцом в потоке / А.Ю. Шемахин // II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов, (г. Казань, 1-4 декабря 2021 г.) / под ред. Б. А. Тимеркаева. — Казань: Бук, 2021. — 388 с. (2021 г.), С.37. — Текст: непосредственный
56. Шемахин А.Ю. Расчет параметров ВЧИ-разряда пониженного давления в 2D постановке / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин, Т.Н. Терентьев, Е.С. Самсонова // II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов, (г. Казань, 1-4 декабря 2021 г.) / под ред. Б. А. Тимеркаева. - Казань: Бук.- 2021. — 388 с. — Текст: непосредственный
57. Желтухин В.С. Условие самосогласования параметров установившегося ВЧИ разряда при пониженном давлении / В.С. Желтухин, А.Ю. Шемахин, Т.Н. Терентьев, Е.С. Самсонова // II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов, (г. Казань, 1-4 декабря 2021 г.) / под ред. Б. А. Тимеркаева. — Казань: Бук.— 2021. — 380 с. — Текст: непосредственный
58. Shemakhin A. Yu. Mathematical modeling of radio-frequency plasma flow at low pressures in nonlocal approximation / A. Yu. Shemakhin, V. S. Zheltukhin // Сборник тезисов XXXV Международной конференции «Уравнения состояния вещества».— 2020.— С. 250. — Текст: непосредственный
59. Желтухин В.С. Расчет условий поддержания ВЧИ-разряда с использованием самосогласованной модели / В.С. Желтухин, А.Ю. Шемахин, Т.Н.Терентьев, Е.С. Самсонова // I Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»: сборник трудов. — 2020. — С. 132-135. — Текст: непосредственный
60. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование параметров ВЧИ-разряда с продувом газа в нелокальном приближении / А. Ю. Шемахин, В. С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2020, Симферополь «Полипринт».— 2020.— С. 269-271. — Текст: непосредственный
61. Самсонова Е.С. Самосогласованная модель ВЧ индукционного разряда пониженного давления / Е. С. Самсонова, Т. Н. Терентьев, А. Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2020, Симферополь «Полипринт».— 2020.— С. 255—256. — Текст: непосредственный
62. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование параметров ВЧИ-плазмы при пониженных давлениях / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ-2019 «XXX крымская осенняя математическая школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам».— 2019.— С. 290-292. — Текст: непосредственный
63. Shemakhin A.Yu. Mathematical modelling of rarefied rf plasma flow with electrostatics / A.Yu. Shemakhin, V.S. Zheltukhin // Proceedings of the XXXIII International Conference on Equations of State for Matter.— 2018.— P. 421. — Текст: непосредственный
64. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления с учетом влияния электромагнитного поля / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции «XXIX Крым-

- ская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральными эволюционными задачам” (КРОМШ-2018). Секции 4—9.— 2018.— С.128-130. — Текст: непосредственный
65. Сафиуллина Р. Р. Расчет основных характеристик тлеющего разряда в одномерном локальном приближении / Р. Р. Сафиуллина, А. Ю. Шемахин, В. С. Желтухин, Е. Ю. Рябченко // Сборник материалов международной конференции “XXIX Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральными эволюционными задачам” (КРОМШ-2018). Секции 4—9.— 2018.— С.116—118. — Текст: непосредственный
 66. Губанова Э.Р. Расчет основных характеристик ВЧЕ-разряда пониженного давления в одномерном приближении с помощью метода БПФ / Э.Р. Губанова, А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции “XXIX Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральными эволюционными задачам” (КРОМШ-2018). Секции 4—9.— 2018.— С.105—106. — Текст: непосредственный
 67. Shemakhin A.Yu. Mathematical modelling of RF plasma flow with metastable atoms at low pressure / A.Yu. Shemakhin, V.S. Zheltukhin // Proceedings of the International Conference “Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter”.— 2017.- P. 96. — Текст: непосредственный
 68. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование процессов в ВЧ-плазме при пониженных давлениях / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ.— 2017.— С.67—68. — Текст: непосредственный
 69. Губанова Э.Р. Расчет ряда характеристик ВЧЕ-разряда пониженного давления в одномерном приближении с помощью метода БПФ / Э.Р. Губанова, А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ.— 2017.— С.39—40. — Текст: непосредственный
 70. Zheltukhin V. Modeling and Simulation of Rarefied RF Plasma Flow / V. Zheltukhin, A. Shemakhin // Bulletin of the American Physical Society. — 2017. — V. 62.— P. 30—35. — Текст: непосредственный
 71. Сафиуллина Р.Р. Расчет ряда характеристик тлеющего разряда в одномерном локальном приближении / Р.Р. Сафиуллина, А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ. — 2017. — С.51—52. — Текст: непосредственный
 72. Шемахин А.Ю. Математическая модель потока ВЧ-плазмы при пониженных давлениях / А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин. // Сборник тезисов Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП.— 2017.— С. 142. — Текст: непосредственный
 73. Нуруллина А.Х. Расчет распределения основных характеристик в середине ВЧИ-разряда в радиальном приближении / А.Х. Нуруллина, А.Ю. Шемахин, В.С. Желтухин // Сборник материалов международной конференции КРОМШ.— 2017. С.46—47. — Текст: непосредственный
 74. Желтухин В.С. Математическое моделирование струйного течения разреженной ВЧ-плазмы с учетом метастабильных атомов / В.С. Желтухин, А.Ю. Шемахин // Сборник тезисов "XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС".— М: Изд-во: ПЛАЗМАИОФАН, 2016.— С. 288. — Текст: непосредственный
 75. Shemakhin A. Yu. Calculations of rf plasma flow with metastable atoms at low pressure / A. Yu .Shemakhin, V. S. Zheltukhin // Book of Abstracts of "XXXI International Conference on Equations of State for Matter".— 2016.— P. 323. — Текст: непосредственный

76. Zheltukhin V. An Upwarming Effect in Rarefied RF Plasma Stream at Low Pressure / V. Zheltukhin, A. Shemakhin, A. Khabatkhusin // Bulletin of the American Physical Society. — 2016. — P. 40–45. — Текст: непосредственный
77. Zheltukhin V. Microwave techniques for electron density measurements in low pressure RF plasmas / V. Zheltukhin, I. Gafarov, A. Shemakhin // Bulletin of the American Physical Society. — 2016.— P. 50-55. — Текст: непосредственный
78. Желтухин В.С. Математическая модель индукционного диффузного разряда / В.С. Желтухин, А.Ю. Шемахин, К.В. Плетнева // Сборник материалов XI Международной конференции «Сеточные методы и приложения», С. 118–122. — Текст: непосредственный
79. Шемахин А. Ю. Исследование эффекта перегрева струи разреженной ВЧ-плазмы: теория и эксперимент / А. Ю. Шемахин, В. С. Желтухин, А. А. Хубатхусин, К. В. Ананьев // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2015. — С. 20–22. — Текст: непосредственный
80. Шемахин А.Ю. Математическое моделирование потока разреженной высокочастотной плазмы / А. Ю. Шемахин, В. С. Желтухин // Сборник тезисов 25-ой Крымской осенней математической школы-симпозиума.— 2014. — Т.2. — С.53. — Текст: непосредственный
81. Абдуллин И.Ш. Модификация свойств полиуретанового нанокompозита в результате ВЧ-плазменной обработки при пониженном давлении / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, И.А. Бородаев, А.Ю. Шемахин // Сб. тез. докл. ХLI Междун. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 10 — 14 февраля 2014 г. 2024. — С.282. — Текст: непосредственный