

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета 24.2.312.11, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 17 октября 2025 г. № 14

О присуждении Шемахину Александру Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Математическая модель струйного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом слоя положительного заряда у поверхности твердого тела» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 10 июня 2025 года (протокол заседания № 8) диссертационным советом 24.2.312.11, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, приказ № 1305 нк от 22.06.2023 г.

Соискатель, Шемахин Александр Юрьевич, 19 ноября 1987 года рождения. С 2004 по 2009 год проходил обучение в специалитете, с 2009 по 2012 год обучался в аспирантуре «Казанского (Приволжского) федерального университета», в 2012 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Математическое моделирование газодинамики струй ВЧ-плазмы при пониженных давлениях». С 2009 года работал в должности ассистента, а с 2015 года переведен на должность доцента кафедры радиофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Диссертация выполнена на кафедре радиофизики Федерального государственного автономного образовательного учреждения 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 технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, профессор кафедры лазерных и аддитивных технологий;

Пак Александр Яковлевич,

доктор технических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор отделения электроэнергетики и электротехники;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), г. Новосибирск в своем положительном заключении, подписанном Швейгерт Ириной Вячеславовной, ведущим научным сотрудником ИТПМ СО РАН и утвержденным и.о. директора института д.ф.-м.н. Е.И. Краусом, указала, что диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком исследовательском уровне, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения в области воздействия потоков плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления на

поверхности твердых тел для модификации их функциональных и эксплуатационных показателей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Научная новизна работы подтверждается следующими положениями:

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

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

— различные области струйного ВЧИ-разряда отличаются по пространственным и временным масштабам происходящих в них процессов, и определенным образом влияют на формирование параметров взаимодействия разряда с твердым телом: в разрядной камере создается плазменный поток с концентрацией электронов 10^{17} – 10^{20} м⁻³, электронной температурой 0,5–2 эВ, газовой температурой $(1-4) \cdot 10^3$ К; плазменная струя обеспечивает поддержание концентрации заряженных частиц в диапазонах 10^{16} – 10^{19} м⁻³, электронной температуры 0,8–1,5 эВ, температуры несущего газа 320–600 К, транспортировку их к поверхности твердого тела, и участвует в формировании характеристик СПЗ и поверхностного слоя в окрестности тела; в СПЗ под действием потенциального поля $E_p = 30-50$ В ионы ускоряются до энергии 30–50 эВ; в приповерхностном слое толщиной $\lambda_D = 50-70$ мкм происходит фокусировка ионного потока на вершинах микронеровностей поверхности и его дополнительное ускорение;

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

2. Впервые теоретически обосновано, что плазменная струя является несамостоятельным ВЧ-разрядом комбинированного типа со свойствами, существенно отличающимися от свойств ВЧИ-разряда пониженного давления в разрядной камере: в струе возникают дополнительные составляющие электромагнитного поля, которые отсутствуют в разрядной камере — азимутальная компонента магнитного поля H_ϕ до 120 А/м, аксиальная компонента электрического поля E_z до 250 В/м, потенциальное электрическое поле $E_{\text{ср}}$ 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 несамостоятельным видом разряда комбинированного типа (пп. 6, 17 паспорта специальности 1.1.9);

7. Установлено, что максимальные значения концентрации электронов, температуры электронов и температуры плазмообразующего газа достигаются при различных значениях частоты электромагнитного поля, что позволяет управлять процессами взаимодействия ВЧИ-плазменной струи с твердым телом (п. 16 паспорта специальности 1.1.9);

8. Впервые, в результате численных экспериментов теоретически предсказан и экспериментально подтвержден эффект образования зоны перегрева по периферии струи около входного отверстия вакуумной камеры, в которой температура потока выше температуры в центре потока более 50°C при скорости потока на входе в вакуумную камеру более 440 м/с и мощности разряда более 2,4 кВт при расходе плазмообразующего газа более 0,16 г/с. Данный эффект количественно согласуется с результатами экспериментальных исследований (пп. 5, 6, 16 паспорта специальности 1.1.9).

Диссертационная работа Шемахина А.Ю. полностью соответствует требованиям п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N842 (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям. Тема работы полностью соответствует п. 5, 6, 13, 16, 17, 19 паспорта специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация Шемахина Александра Юрьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 23 работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов докторской диссертации, в том числе, входящие в базы данных Scopus и WoS, 6 иных рецензируемых научных изданий и одну монографию. Опубликованные по теме дис-

сертации работы отражают содержание разделов диссертации в части обзора литературных источников, их критического анализа, постановки целей и задач исследований, предложенных методов их решения и полученных результатов. Результаты апробированы на международных научных и научно-практических конференциях. В опубликованных работах представлены результаты исследований, выполненных лично автором или при его непосредственном участии на всех этапах проведения работы.

Все основные результаты диссертации получены автором лично. Личный вклад автора в опубликованных 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 вычислительного и натурного экспериментов с участием соавторов. Вклад автора является решающим на всех стадиях работы.

В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения о работах, опубликованных соискателем ученой степени, заимствованный материал без ссылки на автора и/или источник заимствования, а также результаты научных работ, выполненных Шемахиным А.Ю. в соавторстве, без ссылок на соавторов. Авторский вклад соискателя составляет 82,5%.

Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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, No.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, No. 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. — No2 (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. — No. 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, No. 6. — С. 64—71. — Текст: непосредственный (K1).

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, No 19. — С. 95—98. — Текст: непосредственный (K2)

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. Khubatkhuzin // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. — 2016. — V. 774, No. 1. — P. 012167. — Текст: непосредственный (K3).

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 (K3).

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 (K3).

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 (K3).

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 (K3).

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, No1. — P. 012062 — Текст: непосредственный (K3).

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 (K3).

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 (K3).

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 (K3).

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 (K3).

24. Shemakhin A.Y. PIGsolver software for simulation RF plasma flow at intermediate pressure // Proceedings–2024 Ivannikov Memorial Workshop, IVMEM 2024. – 2024. – V., Is. – P. 49–54. DOI:10.1109/IVMEM63006.2024.10659714. — Текст: непосредственный (K3).

На автореферат поступило 13 отзывов, в которых отмечена актуальность решаемой задачи, новизна полученных результатов, а также их практическая значимость. Все отзывы положительные, 6 отзывов содержат замечания:

- доктор техн. наук Коваль Н.Н., Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (г. Томск). 1) Модель требует значительных вычислительных ресурсов, что может ограничить её применение в промышленности. Возможно, стоит разработать упрощенные версии для инженерных расчетов. 2) Модель валидирована для аргоновой плазмы в определенном диапазоне параметров. Желательно расширить ее на другие газы. 3) Из автореферата неясно, о каком порядке величины микронеоднородностей идет речь при обработке поверхности материалов ионным потоком, генерируемым струйным ВЧИ-разрядом.

- доктор физ.-мат наук Зобнин А.В., Объединенный институт высоких температур РАН (г. Москва). В автореферате не раскрыт способ учета отклонения

функции распределения электронов от функции Максвелла, хотя это заявлено в одном из положений, вынесенных на защиту.

- доктор физико-математических наук Лебедев Ю.А., Институт нефтехимического синтеза РАН (г. Москва). 1) Для плазмы аргона в указанном диапазоне давлений следовало бы дополнительно учесть ионы димеров Ar^{2+} , роль излучательных переходов в балансе энергии; 2) В автореферате отсутствует информация о том, какие именно наборы сечений использовались для расчета констант скоростей, поскольку для аргона существуют значительные расхождения между различными литературными источниками; 3) Заключение о новой форме несамостоятельного ВЧ разряда в автореферате недостаточно обосновано.

- доктор физико-математических наук Титов В.А., Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (г. Иваново). 1) Из текста автореферата не ясно, какие процессы соударений электронов учитывались при решении уравнения Больцмана. 2) Неравновесная функция распределения электронов по энергиям зависит от приведенного электрического поля в плазме (E/N). При каких значениях E/N выполнены расчеты, и из каких соображений эти значения приведенного поля были выбраны 3) Учитывался ли при интерпретации результатов измерений температуры в поперечном сечении струи газа (стр. 32 автореферата) эффект нагрева термопар, обусловленный тепловыделением при рекомбинации на их поверхности заряженных частиц и метастабильных электронно-возбужденных атомов?

- доктор физико-математических наук Гасилов В.А., Институт прикладной математики им. Келдыша РАН (г. Москва). 1) Каковы величины давления, при которых возможен расчет в модели сплошной среды, а при каких необходимо приступить к расчету в модели переходного режима в условиях, рассматриваемых в диссертации задач? 2) Расчетные сетки какой структуры использовались для моделирования в разных частях установки – в вакуумной и разрядных камерах?

Насколько подробным был уровень дискретизации расчетной области в этих частях установки, необходимый для достижения достаточной точности расчетов?

- доктор технических наук Корнеева Н.В., Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН (г. Москва)

Математическая модель разработана для аргоновой плазмы, в то время как для модификации поверхности материалов часто требуются реакционные газовые среды. Было бы полезно, если бы автор рассмотрел такую возможность.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью по проблематике диссертации, широкой известностью и авторитетом в научном сообществе, опытом работы и публикационной активностью в области механики жидкости, газа и плазмы, в частности, исследований процессов в плазме, что определяет их способность дать профессиональную оценку новизне и научно-практической значимости диссертации.

Ведущая организация широко известна своими исследованиями в области математического моделирования в механике жидкости, газа и плазмы, аэрогазодинамике, физико-химической механике, механике твердого тела, деформации и разрушения. Труды сотрудников ведущей организации опубликованы в ведущих российских научных журналах, а также в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Ведущая организация и оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что наиболее **существенные результаты, полученные лично соискателем, и их научная новизна** заключается в следующем:

- *разработана* методология определения технологических характеристик плазмы струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления, основанная на единой математической модели, позволяющей

выполнять сквозной расчет параметров плазменного потока в различных областях горения разряда;

- *предложена* оригинальная научная гипотеза о том, что струйный высокочастотный индукционный разряд пониженного давления является сосуществованием в разрядном пространстве двух форм ВЧ-разряда: Н-формы в разрядной камере и комбинированной Е-Н формы в плазменной струе;

- *доказана* эффективность применения разработанной математической модели для проектирования ВЧИ-плазменных технологических процессов и струйных ВЧИ-плазменных установок пониженного давления

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- *доказано*, что плазменная струя высокочастотного индукционного разряда пониженного давления является несамостоятельным разрядом комбинированного типа, сочетающего индукционную и емкостную форму высокочастотных разрядов, что вносит вклад в расширение представлений о физике и механике потоков неравновесной низкотемпературной плазмы;

- *применительно к проблематике диссертации результативно использованы* методы вычислительной гидродинамики для моделирования сложных многомасштабных течений и анализа траекторий ионов при ионной бомбардировке поверхности твердого тела в сочетании с физическим экспериментом по изучению характеристик потока плазмы струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления;

- *изложены* подходы к увеличению эффективности взаимодействия плазменной струи высокочастотного индукционного разряда пониженного давления с твердым телом за счет теоретически обоснованного выбора положения тела в струе, вкладываемой в разряд мощности, давления и расхода плазмообразующего газа, частоты электромагнитного поля;

- *раскрыты* механизмы формирования слоистой структуры плазменной струи с

чередованием зон преобладания положительного и отрицательного зарядов, образования зоны повышения газовой температуры на периферии струи, истекающей из разрядной камеры высокочастотного индукционного разряда пониженного давления;

- *изучены* гидродинамические характеристики течения плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления, включая области разрядной камеры, плазменной струи и слоя положительного разряда, что расширяет теоретические основы создания потоков неравновесной низкотемпературной плазмы;

- *проведена модернизация* математических моделей высокочастотных разрядов, методов численного моделирования многомасштабных процессов в струйном высокочастотном индукционном разряде пониженного давления, повышающих точность прогнозирования значений технологических параметров плазмы за счет введения в модель немаксвелловской функции распределения электронов по энергии и учета влияния метастабильных атомов на баланс энергии и заряженных частиц в разряде.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- *разработаны и внедрены* инновационные технологии полировки материалов, состоящих из легко распыляемой аморфной компоненты, упрочнения медицинских инструментов на предприятиях ООО НПФ «ХЭЛП», ООО ПТО «Медтехника», ООО «Плазма-ВСТ»;

- *определены* рекомендации по использованию разработанной математической модели струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления при разработке конструкций ВЧИ-плазменных установок, при создании технологических процессов модификации твердых тел и методик определения рабочих параметров ВЧИ-плазменной установки по заданным характеристикам

ВЧИ-плазмы пониженного давления;

- *создана* методика расчета энергии ионной бомбардировки и плотности ионного тока для процессов ВЧИ-плазменной модификации поверхности твердых тел при заданных параметрах режима поддержания стационарного ВЧИ-разряда пониженного давления с учетом изменения технологических режимов работы установок;
- *представлены* методические рекомендации по выбору частоты электромагнитного поля и мощности разряда для повышения эффективности плазменной модификации поверхности изделий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- *экспериментальные результаты* получены на поверенном сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования при различных значениях параметров режима поддержания разряда;
- *теория* построена на основе уравнений сохранения массы, импульса и энергии, положений статистической физики, законов электромагнитного поля Максвелла, фундаментальных физических закономерностях газодинамики потоков неравновесной плазмы и согласуется с экспериментальными данными;
- *идея базируется* на анализе проблем повышения надежности, долговечности изделий из материалов органической и неорганической природы, на правильном сочетании теоретического анализа, математического моделирования, экспериментальных исследований и практического внедрения;
- *использованы* результаты, полученные с применением поверенного диагностического оборудования и данных, взятых из литературы для валидации результатов математического моделирования, выполнено тестирование численных методов и программ на решениях модельных задач;
- *установлено* удовлетворительное согласование полученных результатов математического моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований струйного ВЧИ-разряда пониженного давления;

- *использованы* современные литературные данные, обоснованные методики диагностики ВЧ-разрядов в условиях пониженного давления, методы статистической обработки результатов измерений, апробированные современные численные методы решения краевых задач вычислительной гидродинамики.

Личный вклад соискателя 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 вычислительного и натурного экспериментов с участием соавторов. Вклад автора является решающим на всех стадиях работы.

Автором самостоятельно построена физическая и математическая модели струйного ВЧИ-разряда, учитывающие образование и эволюцию слоя положительного заряда в приповерхностной зоне взаимодействия плазмы с твёрдым телом, выполнено создание алгоритмов численного решения сопряжённой системы уравнений для описания процессов в плазменной струе и у поверхности; проведена разработка гибридного вычислительного метода, сочетающего континуальный и кинетический подходы.

Шемахин А.Ю. самостоятельно разработал и реализовал программный комплекс для расчёта параметров плазмы и полей в трёхмерной области ВЧИ-разряда, обеспечивший возможность варьирования геометрических и энергетических характеристик. Им проведены расчёты режимов функционирования плазменных систем и их валидация по результатам экспериментальных измерений.

Соискателем проведён параметрический анализ влияния конструктивных и энергетических факторов на пространственное распределение плотности плазмы и потенциала, выполнена оценка роли приповерхностного слоя положительного заряда в формировании характеристик взаимодействия плазменной струи с твёрдой поверхностью.

Автором проведены экспериментальные исследования в модельных установках ВЧИ-разряда пониженного давления, разработаны методы диагностики параметров плазмы и предложена методика согласования расчётных и экспериментальных данных.

Автором сформулированы выводы, разработаны практические рекомендации по управлению режимами плазменной обработки материалов, проведено внедрение, подготовлены публикации по результатам исследований.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, непротиворечивой методологической платформы, основной идейной линии, концептуальности и взаимосвязи выводов. По своему содержанию **диссертация отвечает паспорту специальности 1.1.9.** Механика жидкости, газа и плазмы в части следующих пунктов: п. 5. Течения сжимаемых сред и ударные волны, п. 6. Динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика, п. 13. Струйные течения и кавитация, п. 16. Тепломассоперенос в газах и жидкостях, п. 17. Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы, п. 19. Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред.

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования. Рекомендуется дальнейшее развитие научного направления, посвященного разработкам и совершенствованию математических моделей ВЧИ-разрядов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Московском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном университете, Томском политехническом университете, Институте нефтехимического синтеза РАН (г. Москва), Институте металлургии РАН и других научных и образовательных организациях, занимающихся исследованиями и разработками в области применения плазменных методов

модификации характеристик материалов, а также в ООО НПФ «ХЭЛП», ООО ПТО «Медтехника», ООО «Плазма-ВСТ», ПАО «Сибур холдинг», Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», других предприятиях машиностроительного, медико-инструментального, авиастроительного и других профилей при внедрении и отработке технологических процессов с использованием высокочастотной плазменно-струйной обработки изделий и создании установок для реализации этих технологических процессов.

В ходе защиты диссертации критических замечаний по научной новизне и значимости работы для науки и практики высказано не было. Соискатель Шемахин Александр Юрьевич подробно ответил на замечания, а также задаваемые вопросы в ходе заседания. С рядом высказанных замечаний соискатель согласился.

Диссертационным советом сделан вывод, что рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в действующей редакции.

На заседании 17.10.2025 г. диссертационный совет 24.2.312.11 принял решение за новые научно обоснованные технологические решения в области воздействия потоков плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления на поверхности твердых тел для модификации их функциональных и эксплуатационных показателей, внедрение которых вносит значительный вклад в научно-технологическое развитие страны, присудить Шемахину Александру Юрьевичу ученую степень доктора технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости,

газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 11 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 11, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
Ученый секретарь
диссертационного совета



Сергей Иванович
Поникаров
Тимур Наилевич
Мустафин

17.10.25