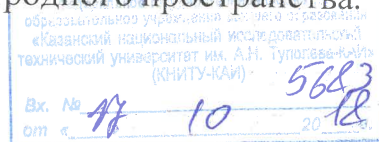


ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Залялиева Булата Ринатовича «Управление внутренними характеристиками тлеющего разряда путем организации сверхзвукового потока газа», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Представленная диссертационная работа посвящена разработке механизмов управления распределением внутренних характеристик тлеющего разряда, необходимых, в частности, для решения актуальной и важной научно-технической проблемы – выполнения условия самоподдержания тлеющего разряда при низких давлениях. Тлеющий разряд давно является хорошо зарекомендовавшим инструментом для осуществления нанесения покрытий способом катодного распыления, генерации непрерывного излучения в газодинамических лазерах и др. При этом его применение при низких давлениях, что необходимо, например, для осуществления нанесения сверхчистых покрытий, ограничено условием самоподдержания разряда. Магнетронные устройства, призванные поддерживать тлеющий разряд в самостоятельной форме при низких давлениях, наряду с преимуществами, имеют ряд ограничений. Они дополнительно усложняют конструкции, требуют интенсивного охлаждения, не позволяют равномерно использовать материал мишени. Для преодоления данных ограничений в данных устройствах ведется работа над усложнением конфигурации магнитного поля, позволяющим удерживать все заряженные частицы в рабочей области, а также над введением дополнительного источника ионизации. Разработанный в диссертационной работе механизм управления распределением внутренних характеристик тлеющего разряда основан на создании в межэлектродном пространстве области с регулируемой концентрацией нейтральных частиц. Это достигается за счет прокачки газа со сверхзвуковой скоростью в ограниченной области межэлектродного пространства. Данный подход позволяет управлять длиной свободного пробега электрона в межэлектродном пространстве, что, в свою очередь, оказывает влияние на формирование слоистой структуры тлеющего разряда. Исходя из всего вышеизложенного, тема данной диссертационной работы является, безусловно, актуальной.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые получены экспериментальные данные о механизме электрического разряда с ограниченной областью, в которой концентрация нейтральных частиц газа отлична от концентрации нейтральных частиц газа во всем межэлектродном пространстве. Впервые экспериментально исследованы картины свечения и электрические характеристики тлеющего разряда со сверхзвуковым потоком газа, организованном в ограниченной области межэлектродного пространства, а не во всем межэлектродном промежутке. Впервые предложена одномерная гибридная модель тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации нейтральных частиц газа вдоль межэлектродного пространства.



Впервые представлены результаты численного моделирования распределения концентраций носителей заряда, потенциала и напряженности электрического поля для тлеющего разряда с областью, в которой увеличена концентрация нейтральных частиц.

Практическую ценность представляют результаты экспериментальных исследований по организации тлеющего разряда с областью в межэлектродном пространстве с регулируемой концентрацией нейтральных частиц, гибридная модель тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации нейтральных частиц вдоль разрядного промежутка, учитывающая нелокальность процессов ионизации в прикатодных областях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением методов, широко используемых для исследования электрических характеристик разряда, использованием приборов, прошедших метрологическую поверку, а также расчётом погрешности измерений и совпадением полученных результатов с известными опытными и теоретическими данными.

Диссертация объёмом 133 страницы состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников информации, приложения. Работа содержит 54 рисунка и 1 таблицу. Список использованных источников информации включает 114 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель и задачи исследований, обобщены новизна, теоретическая и практическая значимость работы, использованные в работе методы исследований, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается общий обзор состояния рассматриваемых в работе вопросов. Рассмотрены особенности тлеющих разрядов в потоках газа: в дозвуковых, сверхзвуковых, миниатюрных потоках газа. Приведены преимущества и ограничения в использовании магнетронных устройств для выполнения условия самоподдержания тлеющего разряда при низких давлениях. На основе проведенного обзора и анализа поставлены задачи для исследования и намечены пути их решения.

Во второй главе представлено описание экспериментальной установки, приведена методика проведения экспериментов для исследования тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа, организованного в осесимметричном, профилированном сопле Лавалья с центральным телом при низких давлениях. Разряд в данном случае зажигается между катодом - центральным телом и анодом - поверхностью сопла. Выявлены условия для организации тлеющего разряда с непрерывной сверхзвуковой прокачкой межэлектродного пространства. Изучена вольт-амперная характеристика такого разряда, определены режимы для существования нормального тлеющего разряда в условиях непрерывной смены рабочего газа в пространстве между электродами.

Третья глава начинается с обсуждения возможностей разрядных устройств, в которых существует область с концентрацией нейтральных частиц отличающейся от концентрации нейтральных частиц во всем

межэлектродном пространстве. Подобное разделение межэлектродного пространства на зоны с разной концентрацией нейтральных частиц, в частности, позволяет решить проблему выполнения условия самоподдержания тлеющего разряда при низких давлениях, не прибегая к использованию магнетронных устройств. В качестве инструмента для создания на разрядном промежутке отдельной области с регулируемой концентрацией нейтральных частиц, выбрана непрерывная прокачка отдельного участка межэлектродного пространства потоком газа со сверхзвуковой скоростью, что, определённо, является новизной данных исследований. Далее в главе приводится подробное описание экспериментальной установки, основными элементами которой являются: система электропитания, система вакуумирования, разрядное устройство с возможностью сверхзвуковой прокачки ограниченной области межэлектродного пространства.

Глава продолжается описанием методики определения концентраций нейтральных частиц в прокачиваемой области, основанной на уравнении непрерывности сверхзвукового потока газа, а также методики оценки значения приведённой напряженности электрического поля в области тлеющего разряда со сверхзвуковым потоком газа. Далее в главе приведена методика снятия картин свечения тлеющего разряда и вольт-амперных характеристик тлеющего разряда, как в покоящейся газе, так и в сверхзвуковом потоке газа, организованного в границах определённой области межэлектродного пространства. После этого в главе приведена оценка погрешностей измерений.

Заканчивается глава изложением результатов экспериментов по влиянию на слоистую структуру тлеющего разряда с помощью изменения концентраций нейтральных частиц в ограниченной области межэлектродного пространства. Сначала приводятся картины свечения, вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха организованном в различных областях прикатодных зона тлеющего разряда. В случае повышения концентрации нейтральных частиц в ограниченной области межэлектродного пространства изначально не излучающей в видимом диапазоне, после подачи сверхзвукового потока воздуха начинают происходить процессы возбуждения нейтральных частиц, что проявляется в свечении сверхзвукового потока в прокачиваемой области. На основании проведенных оценок значения приведенной напряженности электрического поля в прокачиваемой области получено, что светящаяся, в видимом диапазоне, область имеет значение приведенной напряженности электрического поля, характерное для положительного столба.

Далее приводятся картины свечения и вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, организованном в ограниченной области положительного столба. В этом случае, в результате взаимодействия сверхзвукового потока воздуха с плазмой тлеющего разряда, ограниченная область межэлектродного пространства, прокачиваемая потоком воздуха, перестает излучать в видимом диапазоне. Оценка значения приведенной напряженности электрического поля для области тлеющего

разряда, существующей в сверхзвуковом потоке воздуха, даёт значения, характерные для осуществления процессов ионизации нейтральных частиц. На основании анализа вольт-амперных характеристик тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха в ограниченной области межэлектродного пространства сделан вывод, что разряд такого типа относится к нормальному тлеющему разряду.

Четвертая глава посвящена численному моделированию тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации нейтральных частиц газа в межэлектродном пространстве. Глава начинается с описания одномерной гибридной модели тлеющего разряда при низких давлениях. Известно, что по мере уменьшения давления, в слоистой структуре тлеющего разряда начинают расти размеры прикатодных областей, а для формирования положительного столба в межэлектродном пространстве не остается места. Поэтому выбранная модель должна отражать нелокальную зависимость параметров разряда от напряженности электрического поля. Данная модель состоит из уравнений непрерывности для электронов, положительных и отрицательных ионов, уравнения теплового баланса для электронов и уравнения Пуассона для электрического поля. Расчеты проводились для воздуха, при вычислении в работе использовался набор реакций, состоящий из 32-х реакций и 11 сортов частиц. При этом константы реакций с участием электронов являются функциями, зависящими от температуры электронов, определяемой уравнением теплового баланса для электронов, что отражает нелокальную зависимость параметров плазмы от напряженности электрического поля.

Результаты численного моделирования тлеющего разряда в работе представлены в виде распределений вдоль межэлектродного пространства концентраций носителей заряда, напряженности и потенциала электрического поля. При этом изучены следующие случаи: тлеющий разряд с однородным распределением концентрации нейтральных частиц и с увеличенной в 10 раз концентрацией нейтральных частиц в выделенной области межэлектродного пространства, но при том же давлении, что и в первом случае. Результаты моделирования продольной структуры тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации нейтральных частиц отражают сокращение прикатодных областей разряда, концентрирование области фарадеева темного пространства и отрицательного свечения в области с повышенной концентрацией нейтральных частиц, а также возникновение положительного столба по сравнению с распределением параметров плазмы с однородным распределением концентрации нейтральных частиц. Вместе с тем в работе показано, что при увеличении концентрации нейтральных частиц в ограниченной области для случая, тлеющий разряд находится на левой ветви кривой Пашена, слоистая структура тлеющего разряда содержит все необходимые зоны, для его поддержания в самостоятельной форме.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты, полученные в работе, изложены в 12 научных работах, из них: 4 – статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, 4 – статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы «Scopus» и «Web of Science».

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По диссертации имеются следующие **замечания и рекомендации**.

1. В работе подробно исследованы разрядные камеры, в которых поток организован с помощью осесимметричных сопел Лаваля. В то же время совершенно не исследован случай создания потока с помощью плоских сопел.

2. В теоретической модели разряда в сверхзвуковом потоке газа используется давление 0,15 тор, хотя все эксперименты проведены при давлении от 2 до 7 тор.

3. В работе нет оценки числа Маха для потока, выходящего из сопла Лаваля. Это число показательно для сверхзвукового потока газа. Все данные для оценки числа Маха в диссертации есть.

Перечисленные замечания не носят принципиального характера и не снижают положительной оценки диссертации Залялиева Булата Ринатовича. В целом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи по управлению распределением микроскопических параметров тлеющего разряда вдоль межэлектродного пространства, имеющей существенное значение для создания высокоэффективных плазменных технологий, и отвечает п.9 «Положения ВАК», применяемому к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Автор диссертации Залялиев Булат Ринатович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Профессор, д.т.н,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет».

420015, Казань, ул. К. Маркса, 68.

Кафедра "Плазмохимических и нанотехнологий
высокомолекулярных материалов".

Шаехов
Марс
Фаритович

Телефон: 8 (843) 231-41-40.

Адрес электронной почты:

shaechov@kstu.ru.

Подпись

Шаехов

удостоверяю

Начальник ОК ИД ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

О.А. Перелькина

« 19 » 10 20 18 г.



СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Залялиева Булата Ринатовича «Управление внутренними характеристиками тлеющего разряда путем организации сверхзвукового потока газа», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

№	<p style="text-align: center;">Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты</p>	<p style="text-align: center;">Фамилия, Имя, Отчество, учёная степень, ученое звание официального оппонента, должность с указанием структурного подразделения</p>	<p style="text-align: center;">Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)</p>
1	<p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).</p> <p>Адрес: 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68.</p> <p>Электронная почта отдела канцелярии и делопроизводства: office@kstu.ru.</p> <p>Internet адрес: http://www.kstu.ru</p> <p>Телефон отдела канцелярии и делопроизводства: +7 (843) 231-42-16</p>	<p>Шаехов Марс Фаритович, доктор технических наук, нет, профессор кафедры «Плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов».</p>	<p>1. Modification of carbon fabrics by radio-frequency capacitive discharge at low pressure to regulate mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics based on it / Garifullin A.R, Krasina I.V, Skidchenko E.A, Shaekhov M.F, Tikhonova N.V // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Volume 789, conference 1, P. 012014.</p> <p>2. Effects of low pressure radio frequency discharge on the physical and mechanical characteristics and chemical composition of diffusion coating on a surface of complex configuration details / Ladianov V.I, Gilmutdinov F.Z, Nikonova R.M, Kashapov N.F, Shaekhov M.F, Khristoliubova V.I // Journal of Physics: Conference Series, 2017; Volume 789, conference 1, P. 012031.</p> <p>3. Gas and plasma dynamics of RF discharge jet of low pressure in a vacuum chamber with flat electrodes and inside tube, influence of RF discharge on the steel surface parameters / Khristoliubova V.I, Kashapov N.F, Shaekhov M.F // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016,</p>

		<p>Volume 134, conference 1, P. 012017.</p> <p>4. The effects of low-temperature plasma treatment on the capillary properties of inorganic fibers / Garifullin A.R, Abdullin I.Sh, Skidchenko E.A, Krasina I.V, Shaekhov M.F // Journal of Physics: Conference Series, 2016, Volume 669, conference 1, P. 012054.</p> <p>5. Investigation of Inonotus obliquus (Pers.) Pil. Extracts and Melanins after RF-plasma Treatment of Raw Material / Kuznetsova O.Yu., Abdullin I.Sh., Shaekhov M.F., Ziyatdinova G.K., Budnikov H.C. // Uchenye zapiski kazanskogo universiteta-seriya estestvennye nauki, 2016, Volume 158, №1, pp. 23-33.</p> <p>6. Optimizing Pretreatment of Medicinal Raw Materials by RFC Plasma before Extraction / Kuznetsova O.Yu., Abdullin I.Sh., Shaekhov M.F., Ziyatdinova G.K., Budnikov H.C. // Uchenye zapiski kazanskogo universiteta-seriya estestvennye nauki, 2016, Volume 158, Number 2, 2016, pp. 197-206.</p>
--	--	--

сведения подтверждено

Шаехов

Шаехов М.Ф.



Шаехов М.Ф.

достоверяется.

научный сотрудник ФГБОУ ВО «КНИТУ»

Шаехов
О.А. Перельгина

10

2018.