

Учёному секретарю диссертационного
совета Д 212.079.02 В.А. Алтунину

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д.10

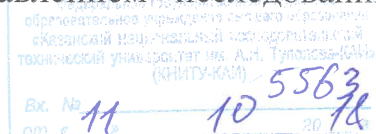
ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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»

Поиск новых способов управления распределением внутренних характеристик тлеющего разряда представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес в различных областях современной науки, техники и технологии. Это обусловлено, как попытками разобраться в деталях физики процессов самоорганизации газовых разрядов, так и необходимостью в расширении областей применения газоразрядной плазмы в практических целях. Несмотря на большой объем экспериментальных и теоретических исследований поведения газоразрядной плазмы, уже достаточно продолжительное время не предлагаются принципиально новые и оригинальные методы управления процессами в разрядах.

В этой связи представленная диссертационная работа Залялиева Б.Р., посвященная исследованию способов управления характеристиками тлеющего разряда путем организации поперечного сверхзвукового потока газа в ограниченной области межэлектродного пространства, является, безусловно, актуальной. Научная новизна, методы исследования в диссертационной работе, практические результаты и защищаемые положения полностью соответствуют специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. **Во введении** показана актуальность темы диссертационной работы, приведены цель, задачи, научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту. **В первой главе** изложен литературный обзор, охватывающий современные исследования по поиску способов управления распределением внутренних характеристик тлеющего разряда их практического применения. Показано, что разработка механизмов управления распределением внутренних параметров тлеющего разряда с целью устранения его неустойчивостей, а также использования в условиях, когда самоорганизация разряда затруднена или не может быть осуществлена вовсе, является актуальным и современным направлением исследований



тлеющего разряда. Наиболее изученным способом влияния на структуру тлеющего разряда для выполнения условия самоподдержания разряда при низких давлениях, является применение магнетронных устройств. Выявлены преимущества и ограничения использования магнетронных разрядов в установках по нанесению покрытий. Отмечается, что решения, направленные на снижение рабочего давления в магнетронных разрядах связаны с усложнением конфигурации магнитного поля, а для работы при сверхнизких давлениях вводится дополнительный источник ионизации, а магнетронный разряд уже перестает быть тлеющим. Для решения проблемы выполнения условия самоподдержания тлеющего разряда предлагается в пространстве между двумя электродами создать область с регулируемой концентрацией частиц газа. В качестве инструмента для создания в разрядном промежутке области с регулируемым давлением предложена сверхзвуковая прокачка газа в выделенной области разряда.

Проведённый автором обзор исследований тлеющего разряда в потоках газа показал, что наибольшее количество работ посвящено случаю, когда поток организован во всём межэлектродном промежутке. Сделан вывод о том, что в настоящее время отсутствуют исследования тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа, организованном в ограниченной области межэлектродного пространства.

В конце главы сформулированы цель работы и задачи, требующие своего решения.

Во второй главе содержится описание разрядного устройства экспериментальной установки для изучения тлеющего разряда в сверхзвуковом сопле с центральным телом, а также приведена методика проведения экспериментов и электрические характеристики разряда в сверхзвуковом сопле с центральным телом в потоке воздуха. Показано, что при малых токах ВАХ разряда описывается убывающей функцией, что объясняется локализацией разряда вблизи торцевой части центрального тела. С увеличением тока катодное пятно и весь разряд смещаются в направлении к критическому сечению (в область высоких давлений). Этим объясняется, что с увеличением силы тока ВАХ разряда становится горизонтальной. Установлено, что тлеющий разряд в сверхзвуковом потоке газа может существовать неограниченное количество времени, так как вся теплота, которая выделяется в разряде, уносится потоком. Сделан вывод, что в таком разряде ионизационно-перегревная неустойчивость не возникает, а следовательно, разряд в сверхзвуковом потоке газа допускает увеличение энергозатрат по сравнению с разрядом в потоке газа с дозвуковыми скоростями.

В третьей главе приведено описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов, а также результаты экспериментальных исследований тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа, организованном в ограниченной области межэлектродного пространства. Отмечается, что экспериментальное исследование влияния сверхзвуковой прокачки газа в ограниченной области тлеющего разряда на вольт-амперные характеристики

разряда и картины свечения было проведено для различных расходов газа, типов сопел, давлений газа в вакуумной камере. Показано, что организацией сверхзвукового потока можно добиться как повышения, так уменьшения концентрации нейтральных частиц в прокачиваемой области, и, тем самым, повлиять на величину приведенной напряженности электрического поля. Приведены вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в покоящемся воздухе и в сверхзвуковом потоке воздуха в прикатодной области. Вольт-амперные характеристики в обоих случаях описываются убывающими функциями, т.е. при сверхзвуковой прокачке газа в прикатодной области режим горения разряда существенно не изменятся. Тот факт, что напряжение разряда в случае организации сверхзвукового потока выше, чем без потока, объясняется повышением концентрации нейтральных частиц в области потока. Установлено, что уменьшение концентрации нейтральных частиц в ограниченной части прикатодной области тлеющего разряда приводит к ослаблению свечения сверхзвукового потока вследствие увеличения приведенной напряженности электрического поля в прокачиваемой области.

Сделан вывод о том, что в результате проведенных экспериментов по изменению концентрации нейтральных частиц в прикатодных областях тлеющего разряда установлено, что независимо от локализации сверхзвукового потока в прикатодных областях и сверхзвукового сопла, путем использования сверхзвуковой прокачки газа можно повлиять на самоорганизацию тлеющего разряда как целого, а также на формирование приэлектродных зон.

Изложены результаты проведенных экспериментов по уменьшению концентрации нейтральных частиц в ограниченной области положительного столба. Показано, что явление образования в положительном столбе несветящегося участка плазмы вдоль линии распространения сверхзвукового потока воздуха сохраняется и при повышении расхода газа через сверхзвуковое сопло и не зависит от режима горения тлеющего разряда (ограниченного стенками камеры или в диффузном режиме). При этом вольт-амперные характеристики, также, соответствуют нормальному тлеющему разряду. Сказано, что во всех экспериментах по уменьшению концентрации нейтральных частиц в области положительного столба, прокачиваемая потоком область демонстрировала отсутствие излучения в видимом диапазоне. Сделан вывод о том, что в области пересечения сверхзвукового потока с положительным столбом происходит ионизация нейтральных частиц.

В четвертой главе предложена одномерная гибридная модель тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации частиц газа в межэлектродном пространстве, представляющая собой систему уравнений неразрывности для концентраций электронов, положительных и отрицательных ионов, уравнения теплового баланса для электронов, уравнения Пуассона для электрического поля. Получены распределения в межэлектродном промежутке концентраций электронов, положительных ионов, отрицательных ионов, а также потенциала и напряженности электрического поля.

Показано, что результаты моделирования распределения концентраций заряженных частиц и электрического поля для тлеющего разряда с неоднородным распределением концентрации частиц газа качественно согласуются с картинами свечения тлеющего разряда со сверхзвуковым потоком газа, полученных экспериментально.

На основании численных экспериментов установлено, что повышение концентрации нейтральных частиц в ограниченной области межэлектродного пространства существенно сказывается на ионизационных процессах и излучательных характеристиках частиц газа в данной области.

В заключении представлены основные выводы по работе.

Несмотря на достаточно грамотное проведение исследования по тематике диссертационной работы, автору не удалось избежать некоторых недостатков. В связи с этим возникли следующие **замечания**:

1. В первой главе не отражен способ управления внутренними характеристиками тлеющего разряда, заключающийся в организации акустических течений в межэлектродном пространстве. Здесь уместно упомянуть классические исследования Галечян Г.А. с соавторами (А. Р. Арамян, Г. А. Галечян, УФН 177, 1207 (2007)) и недавние работы Фадеева С.А. и Сайфутдинова А.И. (Сайфутдинов А.И., Фадеев С.А., Сайфутдинова А.А., Кашапов Н.Ф. Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. № 9-10. С. 726-731.; Фадеев С.А., Сайфутдинов А.И. Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 11. С. 919-928.).

2. В параграфе 3.6 (стр. 60) говорится, что использование сопла Лавала позволяет полностью перевести энергию хаотического теплового движения атомов газа в их поступательное перемещение в сверхзвуковом потоке, однако в параграфе 3.7 написано, что температура газа в этом потоке принимается равным 200 К. Какое же из этих двух утверждений является верным? Какая доля тепловой энергии атомов газа в сопле Лавала (КПД сопла) переходит в энергию поступательного движения частиц?

3. В параграфе 1.17 отмечается следующее: "использование магнетронных установок, является эффективным решением проблемы в ограниченном диапазоне давлений". При каких диапазонах давлений можно применять метод, предложенный в диссертации? До каких пределов этот метод позволяет расширить диапазон рабочих давлений процесса нанесения покрытий путем катодного распыления мишени.

4. На сколько предложенный метод энерго- и ресурсо- эффективен? Каков расход плазмообразующего газа, какая доля от общих энергозатрат приходится на работу вакуумного насоса?

Указанные замечания не снижают общей научной ценности выполненной работы. Она обладает новизной и представляет, как фундаментальную, так и практическую ценность в исследованиях в области механики жидкости, газа и плазмы.

Стоит отметить, что диссертационная работа достаточно полно отражена в публикациях и прошла широкую апробацию на всероссийских и

международных конференциях. Автореферат полностью отражает основные положения, результаты и выводы диссертации.

По степени актуальности, научной новизне и практической ценности, работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и является завершенным научным исследованием, а ее автор, Залялиев Булат Ринатович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Старший научный сотрудник
лаборатории №1.2.1.2 – диагностики
пылевой плазмы ОИВТ РАН, к.т.н.,

Файрушин Ильназ
Изаилович
21.09.2018г.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, +7 (495) 484-23-55,
fairushin_ilmaz@mail.ru

Подпись Файрушина И.И. заверяю
Ученый секретарь ОИВТ РАН д.ф.м.н.



Амиров Р.Х.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе 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»

Фамилия, Имя Отчество	Ученая степень, ученое звание	Сведения о работе	
		Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения
2	3	4	5
Файрушин Ильназ Изаилович	к.т.н.	Объединенный институт высоких температур Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, телефон: (495) 484-23-55 Адрес электронной почты: fairushin_ilmaz@mail.ru	Старший научный сотрудник лаборатории №1.2.1.2 – диагностики пылевой плазмы

Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)

- 1) А.И. Сайфутдинов, И.И. Файрушин, Н.Ф. Кашапов, Исследование различных сценариев поведения вольт-амперных характеристик микрозарядов постоянного тока атмосферного давления // Письма в ЖЭТФ, 2016. – Том. 104, - № 3, С. 178-183.
- 2) И.И. Файрушин, И.Г. Даутов, Н.Ф. Кашапов, Расчет экзоэлектронной эмиссии из микрочастиц конденсированного вещества в равновесной

пылевой плазме // Известия высших учебных заведений. Физика. Том 57, 2014 № 3/2 С. 236-238

3) И.И. Файрушин, Г.Ю. Даутов, Н.Ф. Кашапов, Е.А. Егорова, Характеристики потенциальной ямы для невырожденного электронного газа в равновесной пылевой плазме // Известия высших учебных заведений. Физика. Том 57 2014 № 3/2 С. 97-100

4) И.И. Файрушин, И.Г. Даутов, Н.Ф. Кашапов, А.Р. Шамсутдинов, Аналитический расчет распределений электронной плотности и концентрации ионов примеси в термической пылевой плазме с применением модели "желе" для конденсированных частиц // Письма в журнал технической физики. 2016, том 42, вып. 23. С. 42-50

5) I.I. Fairushin, I. G. Dautov, N.F. Kashapov, Distribution of the potential and concentration of electrons in low-temperature plasma with hollow microparticles // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2017, V. 14, Issue 12, p. 2555-2560

6) A.I. Saifutdinov, S. A. Fadeev, I.I. Fairushin, Some numerical simulation results of the dynamic temperature distribution in dc plasma torch «Thermoplasma 50-01» // Journal of Physics: Conference Series 927 (2017) 012047

Сведения подтверждаю:

И.И. Файрушин / Файрушин И.И.

(подпись, печать)

