

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий

На правах рукописи

Аунг Чжо У

**Электростатическая зарядка проводящих и диэлектрических мишеней
в электронно-пучковой плазме**

Специальность: 01.04.08 – «Физика плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Долгопрудный – 2021 г.

Работа прошла апробацию на кафедре логистических систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Васильев Михаил Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
Заведующий кафедрой логистических
систем и технологий МФТИ

Ведущая организация:

Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша"

Защита состоится «16» декабря 2021 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.04.08.004 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского Физико-Технического Института (национального исследовательского университета): <https://mipt.ru/education/postgraduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Работа представлена «3» сентября 2021 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национального исследовательского университета)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Введение

Актуальность работы.

Электростатика является одной из основных проблем при эксплуатации оборудования, работающего в космосе. В настоящее время наиболее изученными являются процессы, которые приводят к возникновению электростатического заряда космического летательного аппарата (КЛА) под влиянием факторов космического полета и прежде всего, из-за облучения аппарата высокоскоэнергетичными электронами солнечного ветра. Этой проблеме посвящено много работ. Непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, падающий на поверхность (КЛА), вызывает появление и накопление статических зарядов внешними элементами конструкции, а также дифференциальную зарядку КЛА с высокой разностью потенциалов между различными зонами, вызывающую электрические разряды по его поверхности. Перечисленные явления очень хорошо изучены как экспериментально, так и теоретически. Найдены способы нейтрализации статического заряда космического аппарата как интегрально, так и локально.

Значительно меньшее внимание уделялось изучению внутренних электрофизических процессов бортовых систем, в которых наблюдается влияние потока заряженных частиц на жидкости, в первую очередь – на свободные струи и капли. Примером такой системы является капельный холодильник-излучатель энергоустановок, предназначенных для длительных космических полетов.

В пучково-плазменных системах технологического назначения также имеет место взаимодействие электронных пучков и/или возбуждаемой ими неравновесной плазмы с поверхностью твердого тела или частицами конденсированной дисперсной фазы. Такое взаимодействие характерно для плазмохимических реакторов, используемых для производства материалов, поверхностной обработки изделий, переработки природного органического сырья и различных производственных отходов в виде порошков и растворов.

Применительно к пучково-плазменным плазмохимическим реакторам физическая задача ставится следующим образом: электронный пучок инжектируется в плазмообразующую среду, находящуюся внутри некоторого контейнера, возбуждая неравновесную химически активную плазму. В качестве плазмообразующей среды могут использоваться чистые газы, газовые и парогазовые смеси, а также аэрозоли, содержащие диспергированные по плазменному объему частицы порошков или жидких капелек. Взаимодействие электронно-пучковой плазмы (или, как ее часто

называют в англоязычной литературе, Electron-Beam-Generated Plasma) со стенками контейнера, макроскопическими объектами, расположенными внутри него, а также с мелкодисперсными твердыми и жидкими частицами является многофакторным и сопровождается самыми разнообразными физическими и химическими процессами. В числе этих процессов заметную роль играет электростатическая зарядка: стенки контейнера, и объекты, которые в нем находятся, могут накапливать электростатический заряд. Электростатическая зарядка может существенно повлиять на рабочие процессы в плазмохимических реакторах, на устойчивость реакционного объема, а также вызвать повреждение реактора или материалов при их обработке. Таким образом, накопление электростатического заряда объектами, контактирующими с электронно-пучковой плазмой, во многом определяет функционирование пучково-плазменных систем в целом. Экспериментальному исследованию процессов и явлений, связанных с электростатической зарядкой элементов конструкции пучково-плазменных реакторов и обрабатываемых в них материалов, посвящена настоящая работа.

Цель исследования

Цели настоящей работы состоят в следующем:

- Накопить экспериментальные данные о генерации электронно-пучковой плазмы многофазных и многокомпонентных плазмообразующих сред в плазмохимических реакторах, в реакционных объемах которых имеются диэлектрические элементы (элементы конструкции, твердые или жидкие диспергированные компоненты плазмообразующей среды, подложки, образцы обрабатываемых материалов и др.).
- Дать физическое объяснение явлений, обусловленных электростатической зарядкой, которые наблюдаются в таких реакторах, и выявить диапазоны условий генерации плазмы, когда электростатическая зарядка играет существенную роль.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. В пучково-плазменных реакторах с реакционными камерами различной геометрии необходимо исследовать электростатическую зарядку элементов конструкции самих реакционных камер и мишеней, размещенных внутри них, в следующих режимах работы реактора:
 - неподвижная однокомпонентная (газовая) плазмообразующая среда:

- поток плазмообразующего газа или смеси газов;
 - неподвижный плазмообразующий газ с распыленными в нем диэлектрическими жидкостями или диэлектрическими порошками;
 - потоки газа (смеси газов) с впрыском в них диэлектрической жидкости;
 - непрерывная и импульсно-периодическая инжекция электронного пучка.
2. Экспериментально изучить возможности формирования проводящих и диэлектрических покрытий на элементах конструкции диэлектрических реакционных камер при испарении диэлектрических и изолированных от «земли» электропроводных мишеней.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в том, что при исследовании электростатической зарядки элементов конструкции реакционной камеры и макроскопических тел, контактирующих с электронно-пучковой плазмой (неподвижной или движущейся), получены новые экспериментальные данные;

- о влиянии условий генерации плазмы на процессы зарядки/разрядки металлических и диэлектрических элементов конструкции реакционной камеры, а также мишеней простой геометрии, различным образом размещаемых в металлических и диэлектрических реакционных камерах пучково-плазменных плазмохимических реакторов;
- о процессах зарядки/разрядки металлических и диэлектрических элементов реакционных камер различных конфигураций в импульсно-периодических режимах генерации электронно-пучковой плазмы;
- о процессах электростатической зарядки твердых мишеней, когда они помещены в газожидкостную среду, возбуждаемую электронным пучком;
- о процессах зарядки/разрядки жидких диэлектриков, помещенных в электронно-пучковую плазму.

Предложена и обоснована физическая модель, объясняющая наблюдавшуюся в экспериментах анизотропию электростатического разлета частиц мелкодисперсного аэрозоля, в который инжектируется непрерывный электронный пучок.

Обнаружен не наблюдавшийся ранее в экспериментах с электронно-пучковой плазмой форвакуумного давления эффект разрушения капель жидких диэлектриков под действием концентрированного электронного пучка.

Практическая значимость

Практическая ценность результатов диссертации заключается в том, что изученные в диссертационной работе процессы и явления имеют место в реальных пучково-плазменных установках. Более того, они могут оказаться критически значимыми для надежного функционирования этих установок. В случае плазмохимических реакторов производственного назначения электростатическая зарядка реакционной камеры и обрабатываемого материала могут существенно повлиять на эффективность реактора и характеристики получаемых продуктов.

Применительно к пучково-плазменным реакторам, в которых реакционный объем представляет собой аэрозоль с твердыми или жидкими частицами конденсированной дисперсной фазы, автору удалось выработать рекомендации по предотвращению нежелательных эффектов, обусловленных электростатической зарядкой частиц КДФ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследования электростатической зарядки металлических и диэлектрических конструктивных элементов реакционной камеры, а также электропроводных и диэлектрических мишеней, помещенных в газофазный реакционный объем, применительно к задачам проектирования электронно-пучковых плазмохимических реакторов проточного типа, работающих в непрерывном и импульсно-периодическом режимах.
2. Зависимости, характеризующие влияние условий генерации электронно-пучковой плазмы на значения потенциала металлических и диэлектрических мишеней, помещенных в диэлектрическую реакционную камеру коаксиальной и планарной геометрии.
3. Экспериментальные результаты, характеризующие устойчивость двухфазного реакционного объема в пучково-плазменных реакторах, предназначенных для обработки электропроводных и диэлектрических порошков. Физическая модель, объясняющая наблюдающуюся в экспериментах анизотропию электростатического разлета частиц мелкодисперсного аэрозоля, в который инжектируется электронный пучок.

4. Результаты исследования процессов электростатической зарядки мишеней в газожидкостной среде, возбуждаемой электронным пучком, применительно к различным схемным решениям пучково-плазменного реактора.
5. Не наблюдавшийся ранее в экспериментах с электронно-пучковой плазмой форвакуумного давления эффект разрушения капель жидких диэлектриков под действием концентрированного электронного пучка.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях, симпозиумах и научных семинарах:

1. VIII Международный симпозиум “Теоретическая и прикладная плазмохимия”, г. Иваново, Россия, 2018.
2. 61-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2018.
3. 14-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», г. Москва, 2019.
4. Ежегодного саммита молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки», Университет СИРИУС (Сочи), 2019.
5. 62-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2019.
6. 63-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2020.
7. 27-ая научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (ТОК «Судак», Республика Крым, 2020).
8. 15-ая Международная выставка вакуумного и криогенного оборудования, Москва, Россия, 2020.

Публикации автора по теме диссертации.

По теме диссертационного опубликовано 10 печатных научных работ, из них 4 – статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из них 1 – статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных (SCOPUS), из них 5 – тезисы докладов российских и международных конференций.

Личный вклад соискателя.

Работа автора имела решающее значение при подготовке и проведении экспериментов по изучению электростатической зарядки конструктивных элементов реакционных камер различных конфигураций, а также мишеней, размещенных внутри камеры. Физические модели процессов, происходящих в реакционных камерах, автором предложены самостоятельно; также самостоятельно выполнены и количественные оценки, необходимые для интерпретации полученных данных. Диссертация написана автором лично, положения, выносимые на защиту, сформулированы автором самостоятельно. Написание статей и тезисов докладов на конференциях осуществлялось совместно с соавторами при решающем вкладе автора диссертации в наиболее значимые разделы публикаций, относящиеся к проблематике диссертационного исследования.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 113 странице, содержит 33 рисунков и 4 таблиц. Список литературы включает 135 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении кратко описаны техника генерации электронно-пучковой плазмы и ее основные свойства. Отражены особенности генерации электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности диэлектриков, а также генерации электронно-пучковой плазмы двухфазных и многофазных средах. Сформулирована общая направленность диссертационного исследования и обоснована его актуальность. Охарактеризована структура диссертации.

Первая глава содержит краткий обзор наиболее значимых работ, относящихся к тематике диссертационного исследования. Рассмотрено современное состояние задачи электростатической зарядки тел, помещенных в неподвижное облако или поток облако электронно-пучковой плазмы. Дан обзор литературных данных по генерации электронно-пучковой плазмы в газожидкостных системах и в средах, содержащих конденсированную дисперсную фазу.

В главе 2 на основе анализа информации, имеющейся в доступных литературных источниках и в Интернете, сделан вывод, что применительно к реальным условиям работы пучково-плазменных реакторов технологического назначения электростатическая зарядка элементов

конструкции реактора и находящихся в ней объектов является сложным многофакторным эффектом. Этот эффект в настоящее время экспериментально исследован недостаточно, что определяет цели и задачи настоящего диссертационного исследования, сформулированные и конкретизированные в этой главе.

В главе 3 описана экспериментальная установка, предназначенная для проведения экспериментов с пучково-плазменными реакторами, оснащенными реакционными камерами различной конструкции. Описаны методики проведения экспериментов по исследованию электростатической зарядки различных объектов для различных условий генерации плазмы.

- Генератор электронно-пучковой плазмы;
- Система управления;
- Диагностический комплекс;
- Вспомогательные системы (вакуумная система и система охлаждения).

Детальное описание этих подсистем для различных компоновок реактора дается в специальных разделах данной главы.

Рис. 1 иллюстрирует принципиальную схему наиболее универсального варианта экспериментальной установки, в котором поддерживались перечисленные следующие функции:

- Генерация неподвижных облаков электронно-пучковой плазмы
 - чистых газов и газовых смесей,
 - парогазовых смесей,
 - над границей раздела фаз в газожидкостных системах,
 - в аэрозольных средах, содержащих распыленные порошки или капли жидкости;
- Генерация потоков электронно-пучковой плазмы, перечисленных выше плазмообразующих сред;
- Регулировка всех параметров, характеризующих условия генерации плазмы, а именно:
 - энергии и силы тока инжектируемого электронного пучка,
 - полного давления плазмообразующей смеси и парциальных давлений ее компонентов;
 - скорости потока плазмы в плазгодинамических экспериментах,
 - геометрии жидких слоев в газожидкостных пучково-плазменных системах,
 - интенсивности инъекции частиц конденсированной дисперсной фазы (порошков и капель), концентрации частиц в аэрозольном облаке;

- Размещение в облаке или потоке электронно-пучковой плазмы мишеней различной геометрии;
- Измерение электрических потенциалов мишеней;
- Визуальные наблюдения и видеозапись динамики частиц конденсированной дисперсной фазы в облаке или потоке электронно-пучковой плазмы.

Этот вариант был отработан для экспериментов в коаксиальной конфигурации реакционного объема, когда электронный пучок инжестрировался вдоль цилиндрической реакционной камеры. В такой камере можно формировать неподвижные газовые и парогазовые пучково-плазменные образования, а также плазменные потоки; в нее можно инжестрировать жидкости и порошки, а также размещать в ней макроскопические мишени.

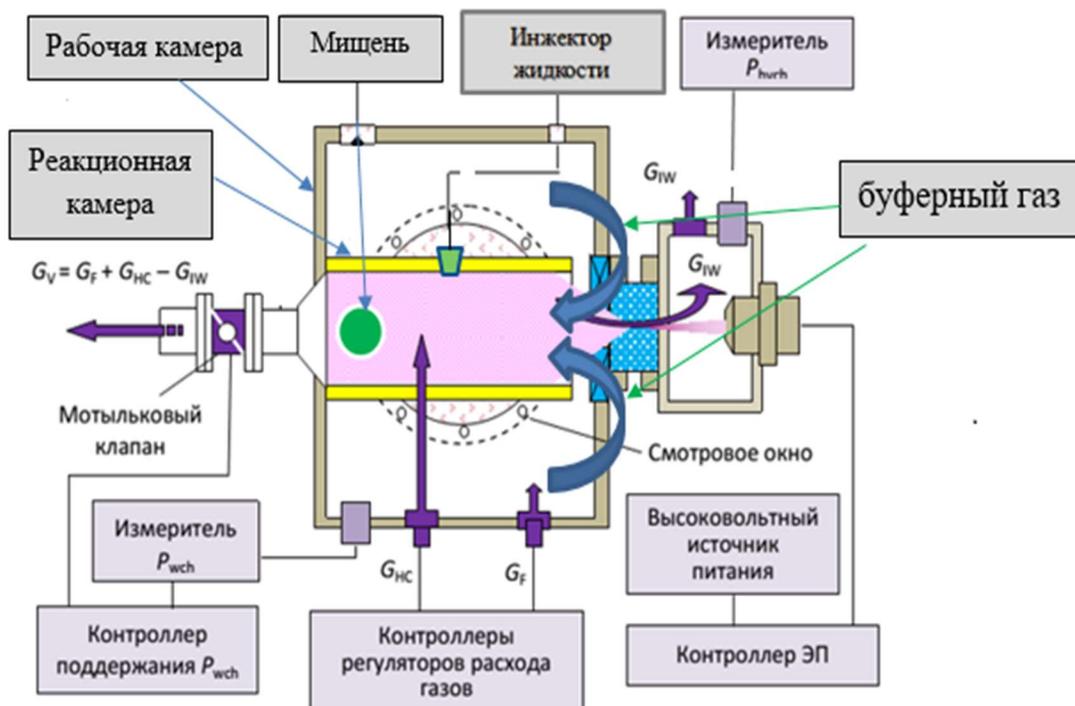


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (вариант с диэлектрической реакционной камерой (коаксиальная конфигурация)).

В данном варианте реакционные камеры в виде отрезков кварцевой трубки внутренним диаметром $D = 18-25$ мм устанавливались внутри металлической рабочей камеры объемом $0,1 \text{ м}^3$. Рабочая камера была заземлена. Один конец кварцевой трубки был герметично соединен с

откачной магистралью, а второй торец камеры оставался открытым. Буферный газ с расходом G_F подавался рабочую камеру, а дополнительный газ с расходом G_{HC} вдувался непосредственно в реакционную камеру. Была предусмотрена возможность подачи обоих газов в рабочую камеру для их предварительного смешения и подготовки плазмообразующей смеси.

С точностью до небольшой по величине утечки газа через выводное окно G_{TW} для поддержания стационарного значения давления газа (газовой смеси) необходимо, чтобы $G_F + G_{HC} = G_V$, где G_V – производительность вакуумной откачки. Подбирая величины G_F , G_{HC} и G_V можно управлять скоростью потока газа w вдоль реакционной камеры. Если объемный расход газа задан или измерен, то $w = 4G_V/\pi D^2$. В реакционную камеру можно поместить мишень достаточно большого размера. В этом случае для вычисления скорости обтекания мишени газовым потоком необходимо учесть частичное перекрытие сечения цилиндрического канала мишенью, т.е. изменение проходного сечения реакционной камеры.

В общем случае для выбранной плазмообразующей смеси свойства и геометрия реакционного объема определяются:

- параметрами первичного пучка (начальной энергией электронов E_b и током пучка I_b),
- полным давлением P_m в реакционной камере и парциальными давлениями компонентов плазмообразующей смеси P_i ,
- скоростью потока плазмы в реакционной камере w ,
- концентрацией и размерами частиц конденсированной дисперсной фазы,
- геометрией реакционного объема, в том числе размерами реакционной камеры, расположением точки инъекции жидкости или порошка, размерами мишени и др.

Процессы электростатической зарядки элементов конструкции реакционной камеры, размещаемых в ней мишеней и частиц конденсированной дисперсной фазы, диспергированных по объему камеры, определяются всеми перечисленными параметрами. При этом для многих режимов работы реактора критическое значение имеет материал мишени и вещество конденсированной дисперсной фазы.

Контроллер электронного пучка поддерживает работу электронной пушки триодного типа и источника высокого напряжения, который питает пушку, вырабатывая ускоряющее напряжение (именно оно определяет E_b) и напряжение смещения на управляющем электроде пушки (для регулировки

I_b). Он также поддерживает импульсно-периодические режимы генерации электронного пучка с переменной длительностью импульса и регулируемой скважностью.

Основным элементом системы подачи плазмообразующего газа (или нескольких газов, если исследуется пучковой плазмы газовой смеси) является многоканальный контроллер, который управляет клапанами различных типов на вакуумных и подающих трубопроводах. Он сохраняет и отображает на своем дисплее расходы буферного газа G_F и дополнительного плазмообразующего газа $G_{НС}$. По другим каналам контроллера отображаются полное давление газа (или газовой смеси) в рабочей камере $P_{wch} = P_m$ (измеряется баратроном 626AX12TDE) и состояние мотылькового клапана. В ряде экспериментов величина P_m измерялась комбинированным вакуумным датчиком VSM77DL, сигнал с которого выводился на многоканальный аналого-цифровой преобразователь ЛА-20USB. На этот же АЦП выводились сигналы с коллекторов, которые использовались для измерения потенциалов мишеней и различных конструктивных элементов реакционных камер. Этим экспериментам посвящена **глава 4**.

Специальные разделы **главы 3** посвящены формированию газожидкостных плазмообразующих смесей с помощью различных инжекторов. Для этого с помощью различных форсунок осуществлялся впрыск жидкости в реакционную камеру. Методика создания запыленной плазмообразующей среды описана в соответствующем разделе **главы 4**.

В главе 4 рассмотрены экспериментальные результаты исследования электростатической зарядки структурных элементов реакционной камеры и макроскопических тел, помещенных в реакционный объем. Эксперименты проводились с различными плазмообразующими средами (неподвижными пучково-плазменными образованиями и плазменными потоками) для различных конфигураций реакционного объема.

Методика экспериментов применительно к реакторам коаксиальной конфигурации была следующей. Дно реакционной камеры, изготовленной из отрезка кварцевой трубы внутренним диаметром 22 мм, служил цилиндр Фарадея, потенциал U которого измерялся относительно заземленных стенок рабочей камеры. Камера могла заполняться различными газами, давление P_m которых варьировалось в диапазоне 0,1-5,0 Торр. Из экспериментально найденных зависимостей, представленных на рис. 2 видно, что при малых P_m потенциал дна реакционной камеры отрицателен и может достигать нескольких сотен вольт. С ростом давления плазмообразующего газа этот

потенциал сначала быстро падает по абсолютной величине, а затем при P_m в диапазоне 0,5-2,0 Торр (в зависимости от того, какой газ используется) это падение замедляется. После этого потенциал U становится равным плавающему потенциалу плазмы и не превышает нескольких вольт.

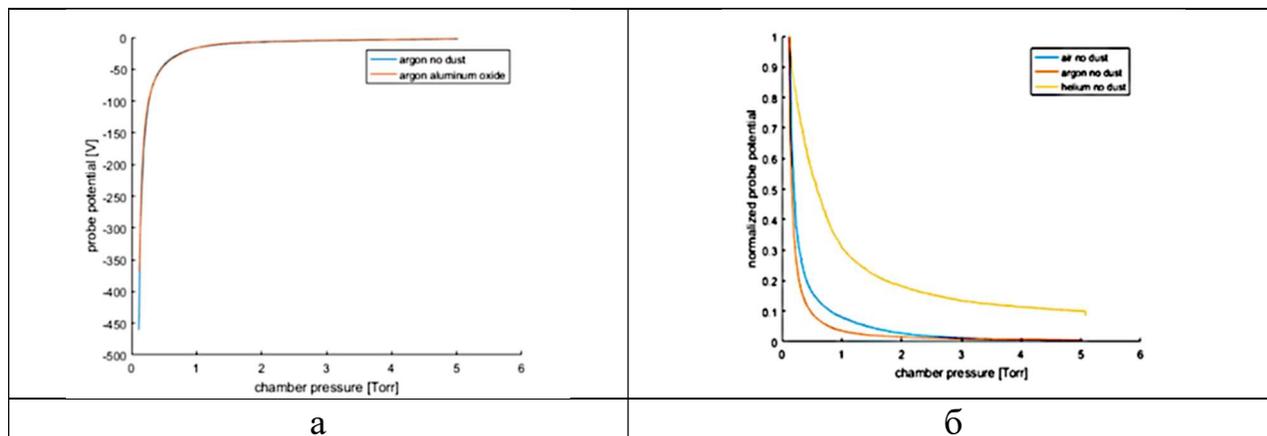


Рис. 2. Электростатическая зарядка дна реакционной камеры, заполненной неподвижной электронно-пучковой плазмой различных газов, как функция давления плазмообразующего газа (P_m):

а) потенциал U (В) дна реакционной камеры, заполненной электронно-пучковой плазмой аргона,

б) относительные величины потенциала дна реакционной камеры, заполненной электронно-пучковой плазмой аргона (красная линия), воздуха (синяя линия) и гелия (желтая линия), U/U_{max} .

Отметим, что потенциалы мишеней и коллекторов электронов любой конструкции, выше (по абсолютной величине), чем ≈ 500 В, получить в экспериментах не удалось: по поверхности диэлектрических держателей этих элементов начинались электрические пробои, которые были хорошо видны невооруженным глазом и регистрировались на осциллограммах сигналов, снимаемых с мишеней. Примеры таких осциллограмм будут приведены ниже. Аналогичные эксперименты были проведены с коллекторами электронов, расположенных внутри реакционной камеры (но не на ее дне!). Были использованы коллекторы двух геометрических форм: диски и сферы.

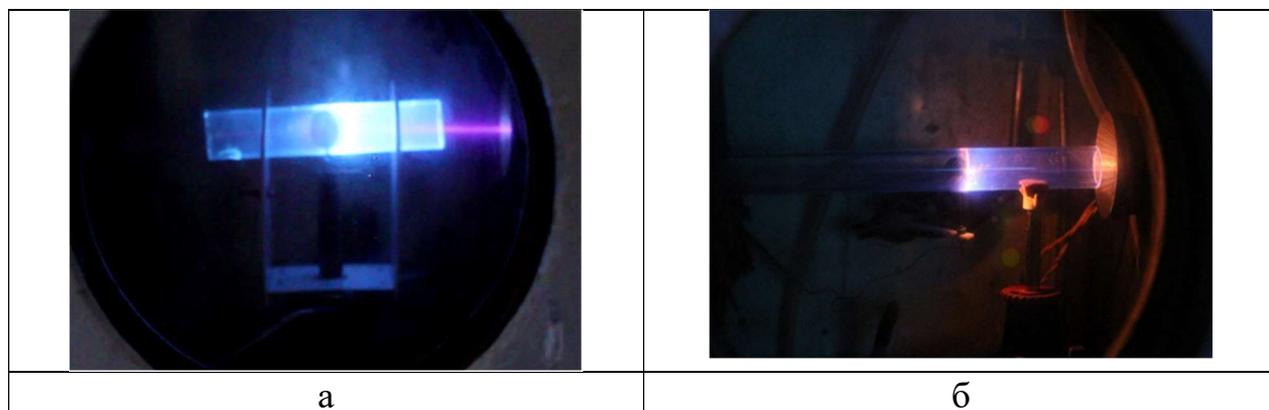


Рис. 3. Генерация электронно-пучковой плазмы внутри кварцевой трубки внутренним диаметром $D = 22$ мм:

а) с установленным внутри нее диском диаметром $d = 18$ мм,

б) со сферическим телом диаметром $d = 9$ мм, установленным на ее оси.

Рис. 3а иллюстрирует эксперименты с коллектором в виде диска, установленного в некотором поперечном сечении кварцевой трубы. Диск мог поворачиваться вокруг его центральной хорды, при этом угол падения φ электронного пучка на плоскость диска изменялся от нуля до $\pi/2$. Диск приводился в прерывистое вращение с помощью шагового электродвигателя. Некоторые результаты этой серии экспериментов сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Максимальные и минимальные значения потенциала медного диска, вращающегося в электронно-пучковой плазме воздуха и кислорода при давлениях $P_m = 1$ Торр и $P_m = 3,0$ Торр; ток пучка $I_b = 1$ мА.

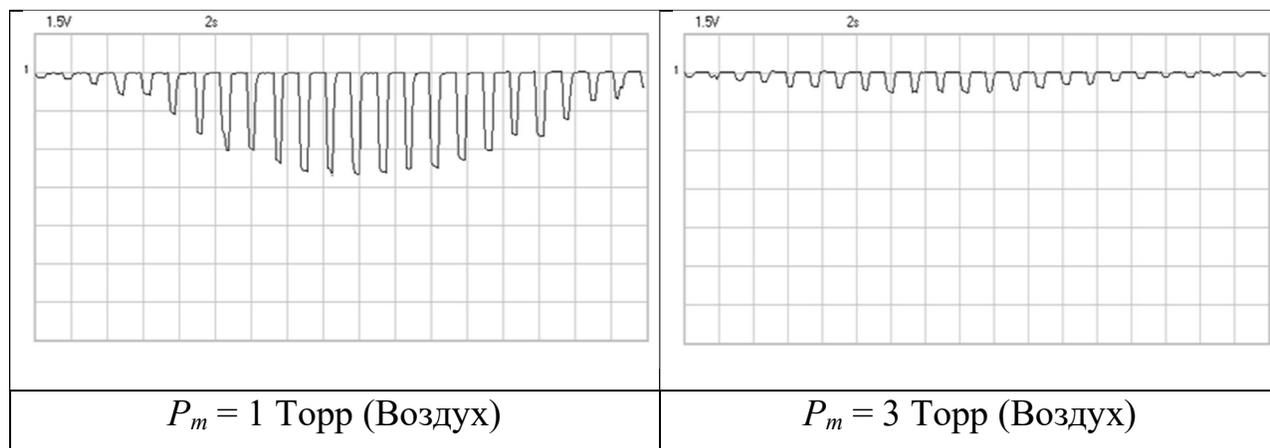
	U_{max} (В) при $\varphi = 90^\circ$		U_{min} (В) при $\varphi = 0^\circ$	
	$P_m = 1,0$ Торр	$P_m = 3,0$ Торр	$P_m = 1,0$ Торр	$P_m = 3,0$ Торр
Воздух	4,2	0,7	0,2	0,2
Кислород	3,1	0,6	0,3	0,1

Таблица 2. Зависимость потенциала мишени (медный диск диаметром 18 мм) от угла ее поворота для электронно-пучковой плазмы воздуха: $I_b = 1$ мА, $P_m = 1$ Торр и $P_m = 3,0$ Торр.

φ , град	0	15	30	45	60	75	90
U_{max} , В	4,7	4,5	3,4	2,5	1,2	0,6	0,3
U/U_{max}	1,0	0,95	0,75	0,53	0,25	0,12	0,06

Данные таблиц 1 и 2 показывают, что величина потенциала, накапливаемого мишенью зависит от угла между осью инъекции пучка и плоскостью мишени φ . Когда $\varphi = 90^\circ$ величина потенциала максимальна (U_{\max}). При уменьшении φ потенциал мишени немонотонно уменьшается, достигая своего минимального значения (U_{\min}), когда $\varphi = 0^\circ$. Тот факт, что в последнем случае этот потенциал не равен нулю, объясняется зарядкой мишени электронами, которые падают на нее под углом, не равном нулю. Такими электронами являются электроны, отраженные стенкой канала и электроны, рассеянные в столкновениях с молекулами плазмообразующего газа. Максимальная (при $\varphi = 90^\circ$) и минимальная (при $\varphi = 0^\circ$) величина потенциала зависят от химического состава плазмообразующего газа и его давления.

Эксперименты с вращающимся диском были повторены в импульсно-периодическом режиме работы реактора. Периодичность следования импульсов электронного пучка задавалась блоком управления электронной пушкой и составляла 1,8 с. За это время шаговый двигатель поворачивал диск на один шаг по углу, а именно – на 7,5 градусов. За время 18 с диск делал поворот на 180° за 24 шага. На рис. 4 представлены осциллограммы, полученные в экспериментах с вращающимся медным диском, а их обработка – на рис. 5.



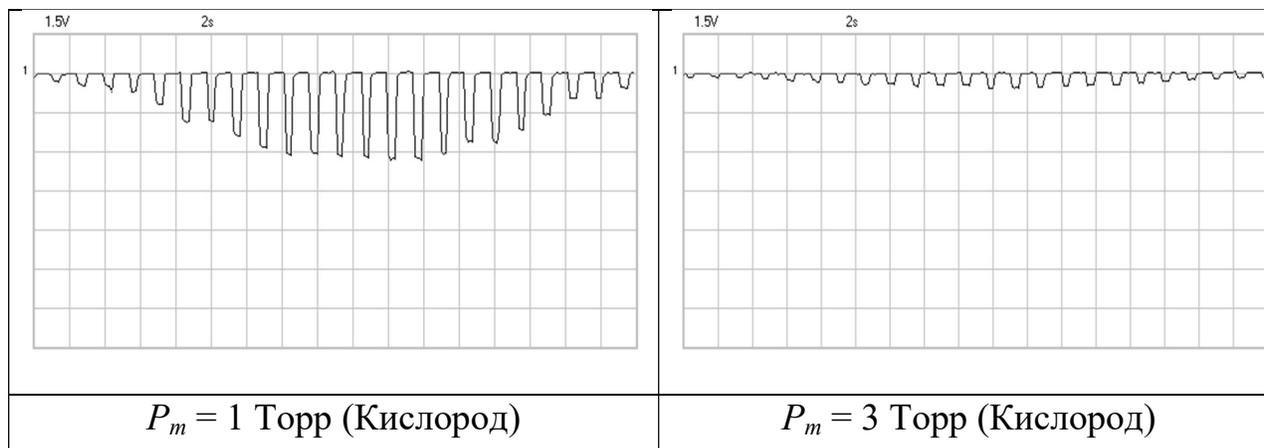


Рис. 4. Осциллограммы записи потенциала вращающегося диска, который находится в плазме, возбуждаемой импульсно-периодическим пучком электронов с амплитудной величиной тока $I_b = 1$ мА в кварцевой трубе при различных давлениях плазмообразующего газа.

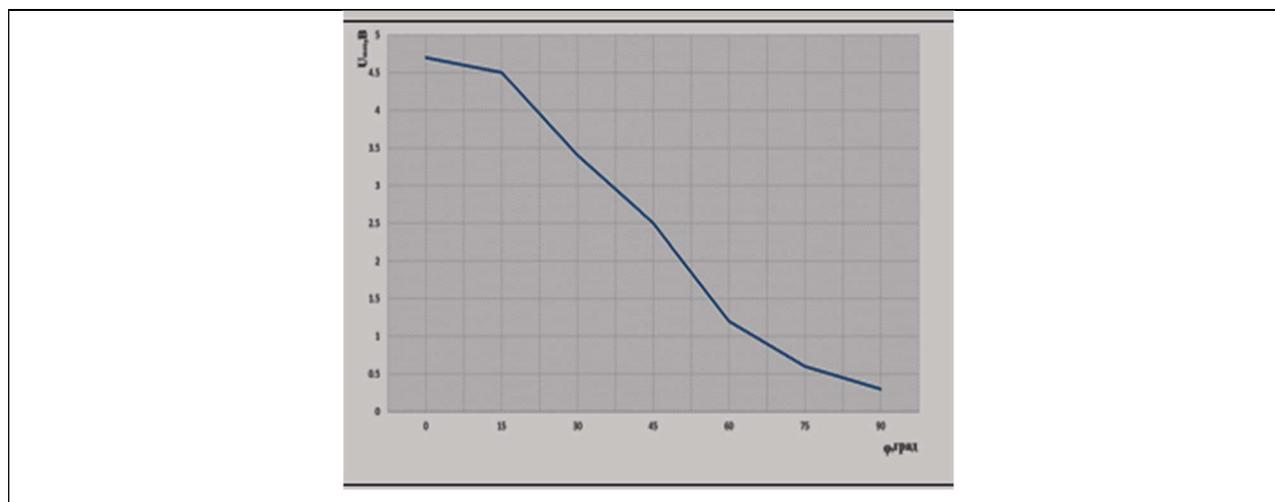


Рис. 5. Потенциал вращающегося диска, который находится в электронно-пучковой воздушной плазме при давлении $P_m = 1$ Торр, возбуждаемой импульсно-периодическим пучком электронов в кварцевой трубе, как функция угла поворота диска. Амплитудная величина тока пучка $I_b = 1$ мА.

Влияние нагрева мишени на величину потенциала U исследовалось в экспериментах со сферическими мишенями и мишенями в форме диска, причем эти эксперименты проводились как в свободной пучковой плазме, так и в плазме, возбуждаемой внутри диэлектрического контейнера. Если мощность пучка и давление в рабочей камере таковы, что возможен существенный (до нескольких сотен градусов) нагрев мишени, то по мере разогрева мишени потенциал мишени плавно растет выше U^* (U^* –

потенциал холодной мишени), достигая, в конце концов, некоторого нового стационарного значения U_{max} .

Эксперименты в потоках пучковой плазмы проводились с металлическими сферами, установленными на оси кварцевой трубы, вдоль которой продувался воздух как показано на рис. 1. Ток пучка варьировался в диапазоне 0,5-1,5 мА, а давление газа в канале поддерживалось постоянным $P_m = 1,6$ Торр. Из данных, приведенных в таблице 3 для расхода газа через канал $G = 2$ л/мин ($w \approx 10$ м/с), следует, что в потоке плазмы потенциал сферической мишени существенно ниже, чем ее потенциал в неподвижном плазменном облаке. На больших токах I_b влияние обдува проявляется сильнее. Обнаруженный эффект требует более детального исследования и объяснения, поскольку он может оказаться весьма важным при проектировании плазмотехнических систем проточного типа.

Таблица 3. Влияние обдува сферы ($d = 9$ мм) потоком электронно-пучковой плазмы воздуха на ее электростатическую зарядку в канале $D = 22$ мм, $P_m = 1,6$ Торр.

w , м/с	I_b , мА	U , В
0	0,5	14
0	1,5	32
10	0,5	8
10	1,5	14

Эксперименты по одновременному измерению потенциалов различных частей реакционной камеры проводились с помощью устройства, размещаемого в рабочей камере установки, схема которого представлена на рис. 6а. Устройство представляет собой цилиндр, составленный из двух отрезков трубок внутренним диаметром 22 мм: металлической (тантал) и диэлектрической (кварцевое стекло). На внешнюю поверхность кварцевой трубы плотно надевался кольцевой электрод, который использовался для исследования процессов зарядки/разрядки диэлектрической части реакционной камеры. Пример записи сигналов, снимаемых с металлической и диэлектрической частей реакционной камеры, а также с установленной в ней мишени, представлен на рис. 6б. Запись велась с помощью АЦП ЛА-20USB; на один из каналов АЦП был выведен сигнал, снимаемый с вакуумметра VSM77DL, работавшего в паре с баратроном 626AX12TDE (см. рис. 1).

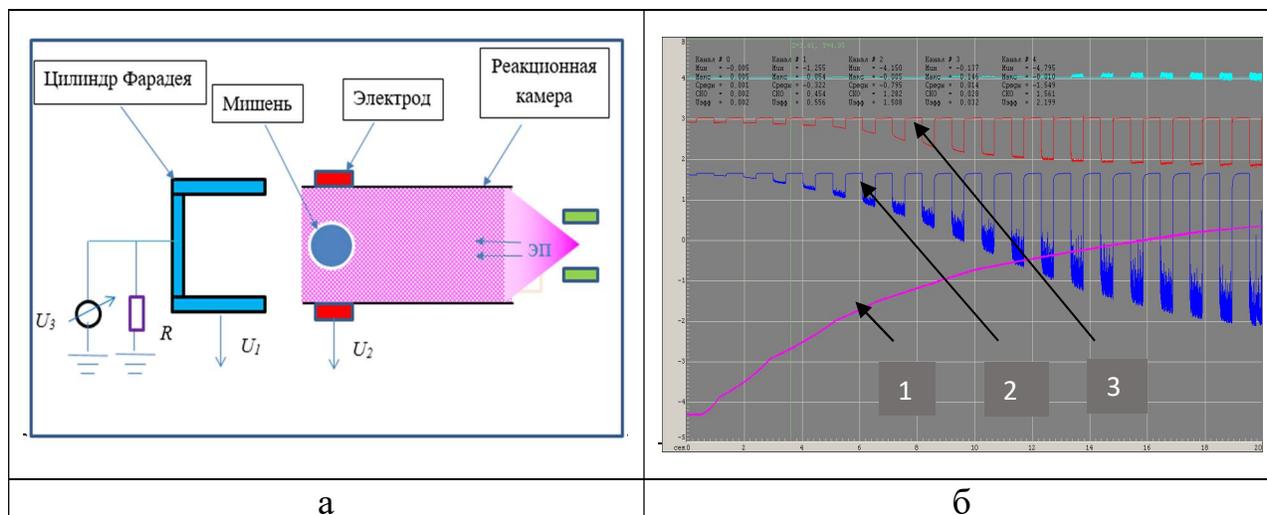


Рис. 6. Измерение электрического потенциала мишеней и элементов конструкции реакционной камеры.

а) схема эксперимента: U_1 , U_2 – сигналы, снимаемые с металлической и диэлектрической частей реакционной камеры соответственно; сигнал U_3 – сигнал с кольцевого электрода, расположенного на внешней стороне диэлектрической части реакционной камеры.

б) графическая запись сигналов АЦП, снимаемых с вакуумметра (канал 1), с мишени (канал 2) и с кольцевого электрода, (канал 3).

Методика проведения экспериментов с электронно-пучковой плазмой, содержащей твердые микрочастицы, иллюстрируется рисунком 7. На пути распространения пучка 2 с помощью вибрирующего сита 4 формируется слой частиц порошка 3, падающих с высоты y_1 . Толщина слоя порошка d задается размерами сита, а концентрация твердых частиц n_d в зоне генерации запыленной плазмы 6 – частотой и интенсивностью вибраций сита. Время пребывания частиц порошка в зоне 6 определяется высотой y_2 . Падающие частицы, в конце концов, попадают на дно рабочей камеры 5, где может находиться специальный экран, на котором можно увидеть картину разлета порошка из зоны генерации запыленной электронно-пучковой плазмы.

На рис. 8 представлены полученные нами фотографии реакционного объема, содержащего частицы порошка Al_2O_3 ; буферный газ – воздух. Оксид алюминия ярко люминесцирует под воздействием электронно-пучковой плазмы и поэтому очень удобен для экспериментов. При достаточно высоких давлениях ($P_m = 5$ Торр) разлета порошка из зоны воздействия ЭП практически нет, но уже при $P_m = 0,5$ Торр начинается изотропный разлет порошка в направлениях z и r . При дальнейшем понижении давления разлет

становится неизотропным: появляется преимущественное направление движения пылевых частиц – от выводного окна.

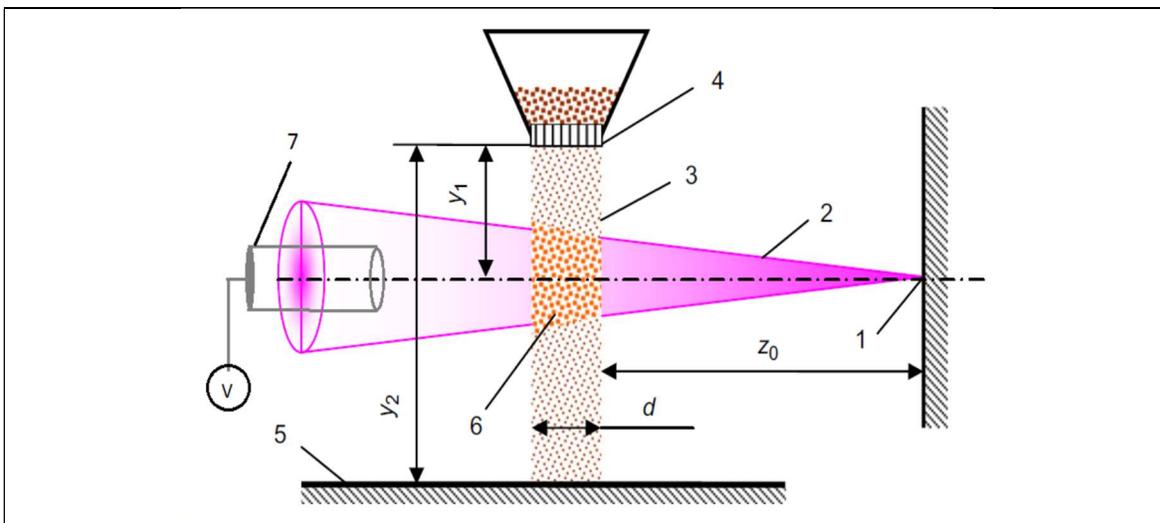


Рис. 7. Постановка экспериментов с запыленной электронно-пучковой плазмой. 1 – плоскость инъекции ЭП, 2 – рассеянный ЭП, 3 – слой порошка, 4 – вибрирующее сито, 5 – дно рабочей/реакционной камеры, 6 – зона генерации запыленной электронно-пучковой плазмы, 7 – коллектор электронного пука или мишень.



а

б

в

Рис. 8. Различные режимы формирования запыленного реакционного объема: порошок – диоксид алюминия, буферный газ – воздух.

а) $P_m = 5$ Торр, б) $P_m = 0,5$ Торр, в) $P_m = 0,1$ Торр.

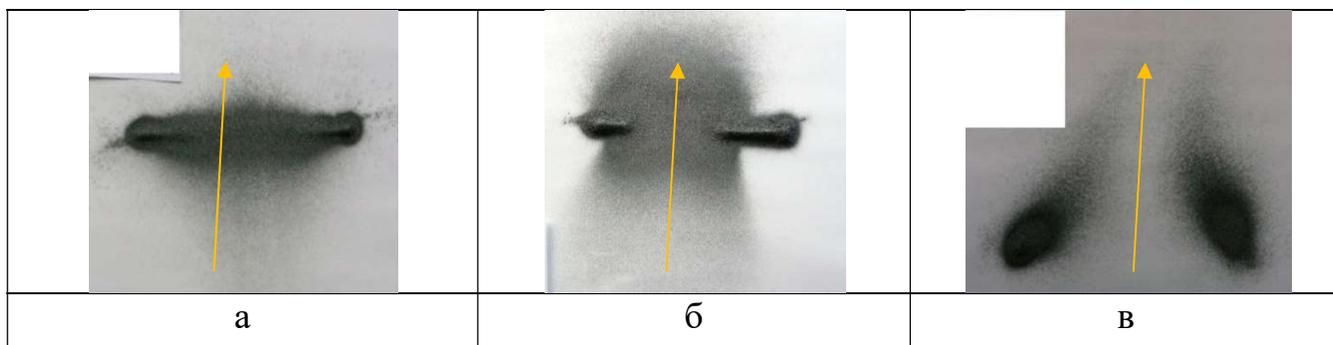


Рис. 9. Анизотропия разлета частиц порошка углерода в различных условиях генерации запыленной электронно-пучковой плазмы аргона:

а) $P_m = 5,0$ Торр, $I_b = 5$ мА; б) $P_m = 5,0$ Торр, $I_b = 10$ мА; в) $P_m = 1,0$ Торр, $I_b = 10$ мА

Если увеличивать силу тока ЭП, анизотропия разлета порошка усиливается. Кроме того на анизотропию разлета пылевых частиц существенно влияют геометрические характеристики, особенно z_0 и y_1 , при уменьшении расстояния z_0 и/или высоты y_1 анизотропия усиливается. На рис. 9 представлены картины следов, которые оставили частицы углерода, осевшие на дно рабочей камеры (позиция 5 на рис. 7). Эксперименты проводились в плазме различных газов в диапазоне варьирования $0,1 < P_m < 10,0$ Торр, $1,0 < I_b < 20,0$ мА. Эти эксперименты дали качественно одинаковые результаты. Обработка фотографий, которые были получены в экспериментах, проведенных при более низких давлениях ($P_m \sim 0,1$ Торр), выводит на результат: характерное время накопления заряда, достаточного для эффективного электростатического взаимодействия частиц порошка, имеет порядок величины 10^{-3} с.

В разделе (4.2) анализируется возможное влияние электронной эмиссии с поверхности частиц порошка на величину потенциала при их электростатической зарядке в зоне генерации запыленной электронно-пучковой плазмы. Оцениваются эффекты, обусловленные:

- истинно-вторичной эмиссией,
- термоэлектронной эмиссией,
- упругим и неупругим отражением быстрых электронов пучка.

Отмечается, что учитывать эмиссионные процессы необходимо при анализе результатов практически всех экспериментов, проводившихся в рамках диссертационной работы, а не только экспериментов по исследованию запыленной электронно-пучковой плазмы.

В экспериментах с двухфазными потоками электронно-пучковой плазмы измерялись потенциалы элементов конструкции цилиндрической реакционной камеры и мишеней, установленных на ее оси. В качестве

реакционной камеры использовалась кварцевая трубка внутренним диаметром 18 мм, а в качестве мишени – стальная сфера диаметром 9 мм. На наружной поверхности реакционной камеры в сечении, где была установлена мишень, находился кольцевой электрод шириной 9 мм, т.е. электрод охватывал мишень. Вдоль реакционной камеры организовывалась продувка воздуха, и в импульсно-периодическом режиме инжектировался электронный пучок. В момент времени $t = 0$ в сечении, расположенном на расстоянии 20 мм вверх по потоку, поперек реакционной камеры впрыскивался бензин в виде тонкой (диаметром 0,5 мм) струйки. В газовом потоке перед мишенью происходило пневматическое распыливание бензина, так что мишень оказывалась в газожидкостном потоке, активированном электронным пучком.

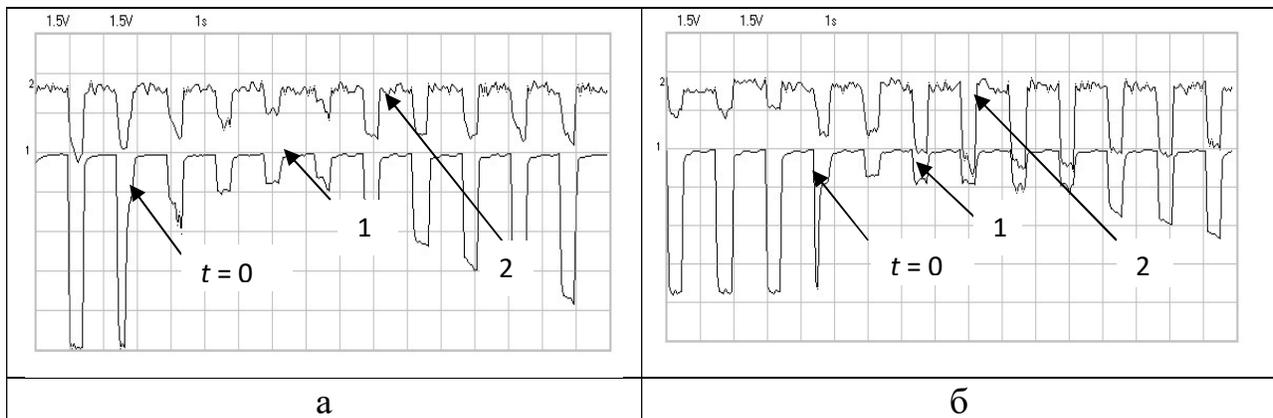


Рис. 10. Эффект кратковременного впрыска бензина поток электронно-пучковой плазмы воздуха, протекающей вдоль диэлектрической реакционной камеры диаметром $D = 18$ мм. На оси камеры установлена металлическая сфера (мишень) диаметром $d = 9$ мм. $E_b = 27,5$ кэВ, $I_b = 5$ мА, $P_m = 1$ Торр. Канал 1 – сигнал со сферической мишени; канал 2 – сигнал с кольцевого электрода.

а) скорость потока на входе в реакционную камеру $w = 5$ м/с, ;

б) скорость потока на входе в реакционную камеру $w = 8,5$ м/с.

Результаты этих экспериментов иллюстрируются рисунком 10, на котором приведены осциллограммы потенциалов мишени (канал 1) и кольцевого электрода (канал 2). Видно, что в момент впрыска бензина (момент времени $t = 0$) происходит изменение амплитуды обоих сигналов, но спустя некоторое время амплитуды сигналов восстанавливаются. Обращают на себя внимания два факта:

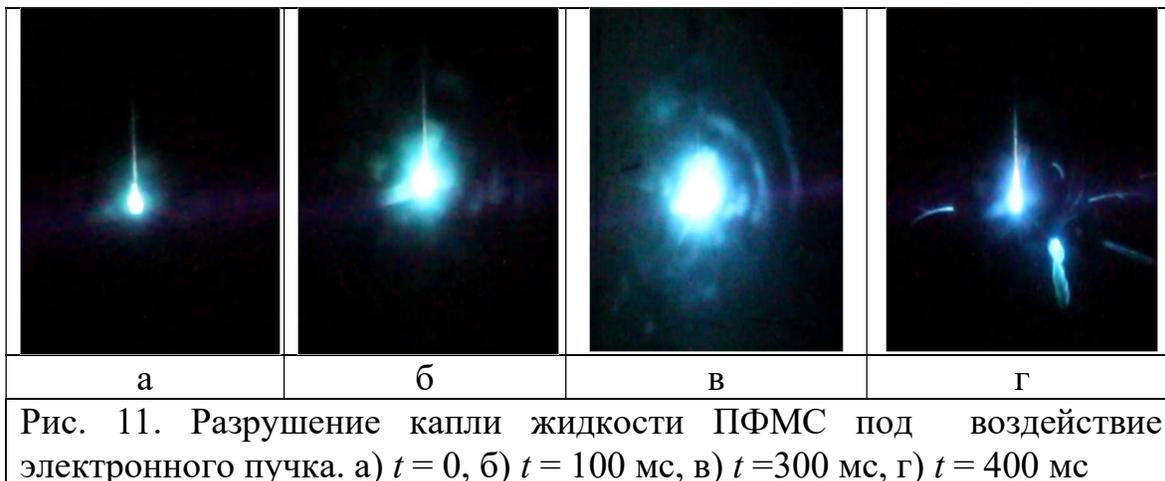
- В газожидкостном потоке потенциал мишени оказывается всегда ниже, чем в потоке воздушной электронно-пучковой плазмы;

- При небольших скоростях газового потока ($w = 5$ м/с) потенциал кольцевого электрода также падает при впрыске бензина. Однако, даже небольшое увеличение скорости потока (до $w = 8,5$ м/с) способно сделать эффект противоположным: с началом впрыска бензина потенциал кольцевого электрода возрастает и возвращается к исходному значению значительно медленнее, чем при $w = 5$ м/с.

В предварительных экспериментах по отработке методики формирования газожидкостных потоков электронно-пучковой плазмы было обнаружено явление взрывного разрушения каплей диэлектрической жидкости при их непосредственном облучении быстрыми электронами. Это явление наблюдалось, когда:

- Давление буферного газа было достаточно низким ($P_m < 0,1$ Торр);
- плазмообразующий газ был неподвижен ($w = 0$), и в потоке газа происходило обычное пневматическое распыливание каплей;
- капля имела размеры ~ 1 мм и более;
- ток пучка был достаточно велик ($I_b > 5$ мА);
- воздействие пучка на каплю было достаточно продолжительным, не меньше 10 мс.

На рис. 11 представлены стоп-кадры видеозаписи процесса взрывного разрушения капли жидкости ПФМС в остаточной атмосфере воздуха ($P_m = 0,08$ Торр) при облучении ее электронным пучком энергией $E_b = 27,5$ кэВ и током $I_b = 6$ мА. Видно, как вокруг капли формируется облако приповерхностной плазмы, которое быстро увеличивается в размерах. Внутри этого облака происходит разрушение капли на несколько фрагментов. При этом облако приповерхностной плазмы исчезает. Это дает основания полагать, что разрушение капли происходит за счет электрофизических процессов.



На рис. 12 приведены фотографии пелены центробежной форсунки, инжектирующей воду в неподвижное облако электронно-пучковой плазмы воздуха и в плазменный поток. Главные выводы из этой серии экспериментов:

- Формирование газожидкостного реакционного объема в пучково-плазменных плазмохимических реакторах принципиально возможно.
- Газожидкостной реакционный объем может быть сформирован как в неподвижном пучково-плазменном облаке, так и в потоке пучковой плазмы.
- При любых токах пучка и скоростях газового потока имеет место электрофизическое взаимодействие электронно-пучковой плазмы с пеленой жидкости, сопровождающееся образованием приповерхностной плазмы, но специфические эффекты, обусловленные с электростатической зарядкой пелены, не выявлены.
- При повышении силы тока пучка и скорости газового потока газодинамическое и тепловое воздействие потока пучковой плазмы на жидкую пленку усиливается; при достаточно интенсивном электронно-лучевом воздействии наблюдается разрушение пелены еще до ее самопроизвольного распада, обусловленного гидродинамическими процессами.

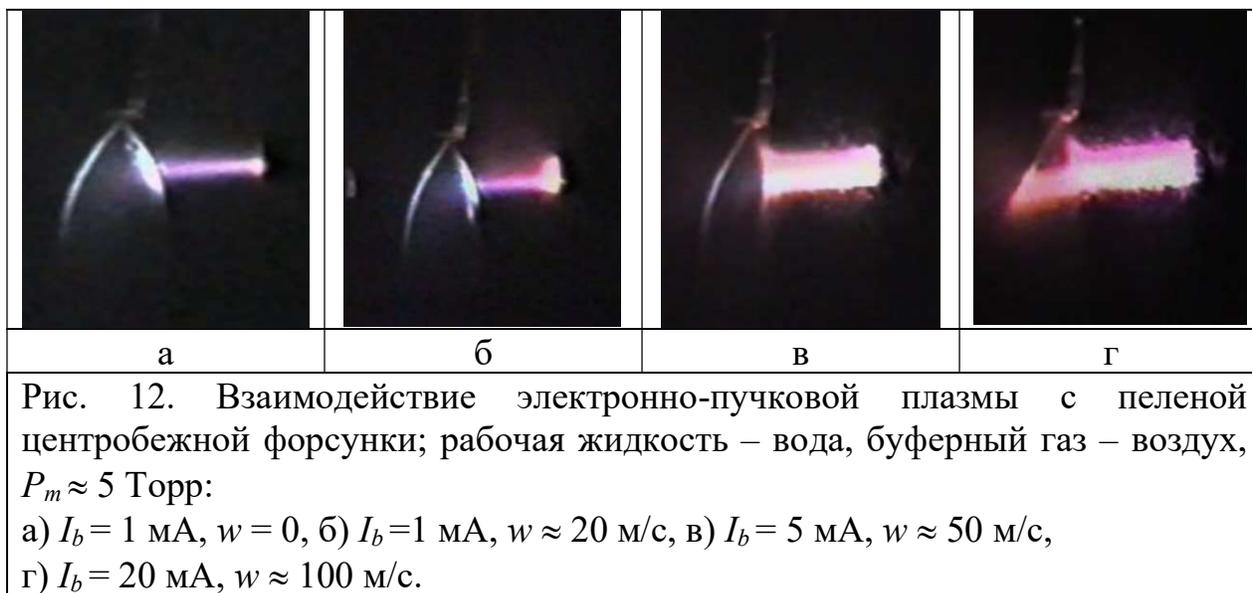


Рис. 13 иллюстрирует результаты экспериментов по нанесению покрытий испарением мишеней из аморфного углерода в электронно-пучковой плазме форвакуумного давления. Покрытия наносились на металлические и диэлектрические части реакционной камеры (см. рис. 6а).

На фотографиях хорошо видны и градиентный характер покрытия на диэлектрической поверхности, и граница локализации толстого аморфного слоя осажденного покрытия на металлической подложке конической формы, установленной на входе в диэлектрическую часть реакционной камеры.



Выводы

1. Исследована электростатическая зарядка элементов конструкции реакционной камеры и макроскопических тел, помещенных в газофазный реакционный объем применительно к задачам конструирования электронно-пучковых плазмохимических реакторов проточного типа. При этом получены зависимости, характеризующие влияние условий непрерывной генерации электронно-пучковой плазмы на величину потенциала этих объектов в реакционных камерах различной геометрии.
2. В импульсно-периодических режимах работы генератора электронно-пучковой плазмы исследованы процессы накопления электростатического заряда элементами конструкции реакционной камеры. Установлены зависимости, характеризующие влияние условий генерации электронно-пучковой плазмы на величину потенциала металлических и диэлектрических элементов на характерные времена их зарядки/разрядки.
3. Исследована анизотропия электростатического разлета частиц мелкодисперсного аэрозоля, в который инжектируется непрерывный

электронный пучок. При этом дано физическое объяснение неизотопного разлета аэрозоля, наблюдающегося в определенных режимах генерации запыленной электронно-пучковой плазмы.

4. Исследованы процессы электростатической зарядки мишеней электронным пучком, когда мишень помещена в газожидкостную среду, для следующих вариантов реакционного объема плазмохимического реактора:
 - неподвижный аэрозоль и поток аэрозоля,
 - жидкая пелена в неподвижном или движущемся газе,
 - жидкая пленка на металлической поверхности (планарная конфигурация реакционной камеры),
 - отдельные капли жидкости.
5. Обнаружен эффект разрушения отдельных капель диэлектрической жидкости при их облучении электронным пучком и дано его физическое объяснение.
6. На металлических и диэлектрических элементах конструкции реакционных камер были получены проводящие и диэлектрических покрытия испарением диэлектрических и электропроводных мишеней в условиях форвакуума.

Материалы диссертации опубликованы автором в следующих работах:

1. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев М.Н.* Экспериментальное исследование электрофизических свойств приповерхностной электронно-пучковой плазмы // ТРУДЫ МФТИ. 2019. Том 11, № 2. С. 156-160.
2. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Аунг Чжо У, Йе Хлаинг Тун, Васильев М.Н.* Генерация электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности проводящих и диэлектрических дисков // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 1. С. 5-11.
3. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, М.Н.Васильев.* Генерация электронно-пучковой плазмы внутри диэлектрического контейнера // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 2. С. 126-130.
4. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Хтет Ко Ко Зау, Васильева Т.М., Аунг Чжо У, Йе Хлаинг Тун, Васильев М.Н., Виноградов М.И., Макаров И.С.* Комбинированная плазма в процессах обработки волокон // НАНОИНДУСТРИЯ, 2021, Том 14, №S6, С. 251-264.

5. **[Индексируется базой данных RSCI]:** *Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Зин Мин Маунг, Яр Зар Аунг, М.Н.Васильев.* Управление электростатической зарядкой твердых тел в каналах, заполненных электронно-пучковой плазмой // ТРУДЫ МФТИ. 2021. Том 13, № 1. С. 65-70.
6. **[Индексируется базой данных Scopus]:** *Хтет Ко Ко Зау, Т.М.Васильева, Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Т.Г.Шикова.* Сравнение химического состава и гидрофильных свойств поверхности органических полимеров, обработанных в различных видах низкотемпературной плазмы // ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2021, Том 55, № 4, С. 303-09.

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика

в типографии "Переплетофф"

Адрес: г. Долгопрудный, ул. Циолковского, 4.

Тел: 8(903) 511 76 03. www.perepletoff.ru

Формат 148 x 210 мм. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Тираж 20 экз.

Твердый (мягкий) переплет.

Заказ № _____. 04.10.21 г.