

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ
«ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИМ. А.В. ТОПЧИЕВА РАН
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Всероссийская (с международным участием) конференция

Казань, 1-5 июня 2026 г.

СБОРНИК СТАТЕЙ

**КАЗАНЬ
2026**

УДК 533.9
ББК 22.333
Ф503

Рецензенты:

Петров О.Ф., академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор,
председатель Научного совета РАН по комплексной проблеме
«Физика низкотемпературной плазмы», директор Объединённого
института высоких температур РАН (Москва)

Губайдуллин Д.А., член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук,
руководитель Института механики и машиностроения
ФИЦ КазНЦ РАН (Казань)

Ф503 Физика низкотемпературной плазмы. Сб. статей Все-
российской (с международным участием) конференции
(Казань, 1-5 июня 2026 г.). – Казань: Издательство АН
РТ, 2026. – 448 с.

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-9690-1458-9

В сборнике представлены материалы Всероссийской (с международ-
ным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы»
ФНТП-2026, где отражены новые направления развития физики низко-
температурной плазмы и смежных областей. Представляет интерес для
специалистов, инженеров, молодых ученых и студентов, работающих и
ведущих исследования в области физики низкотемпературной плазмы.

УДК 533.9
ББК 22.333

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-9690-1458-9

© Коллектив авторов, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

И.Ш. Абдуллин, М.З. Гараев, В.С. Желтухин, А.Д. Кудрявый. Изучение изменений физических и механических характеристик аморфной двуокиси кремния тканевой и волокнистой структур под воздействием потока низкоэнергетических ионов	10
А.А. Аганин, И.А. Аганин, А.И. Давлетшин. Динамика газовых пузырьков в кластерах различной формы	15
Н.Л. Александров. Кинетика заряженных частиц в неравновесной плазме паров воды и H_2O -содержащих газовых смесей	21
Г.И. Андреев, В.Л. Бычков. Ионизационные процессы в ионосфере под действием космических лучей	25
А.С. Байдин, А.Г. Мозговой, А.В. Огинов, И.Н. Тиликин. Возбуждение замкнутых токовых витков в плазме при линейных разрядах	30
А.А. Байрамгулов, А.Д. Захарова, Г.Р. Мухаметзянов, Б.А. Тимеркаев. Электродуговой синтез наноалмазов в аргоно-углеродной среде с кремниевой добавкой	35
П.К. Батраков, М.А. Медведев, И.С. Байдин, А.А. Родионов, Я.К. Болотов, Ф. К. Гасратов, П.А. Старовойтова, А.В. Огинов. Двухракурсная двухдлинноволновая интерферометрическая диагностика плазменных каналов импульсных высоковольтных разрядов	40
Т.С. Батукаев, И.В. Билера, Г.В. Крашевская, Ю.А. Лебедев, В.К. Шумилов Разложение CO_2 при пропускании его через микроволновый разряд в жидком метаноле	44
А.С. Белёв, Н.А. Шарапов. Динамика формирования высокочастотного импульсного разряда в воздухе атмосферного давления	50
А.С. Белёв, Н.А. Шарапов. Влияние атмосферной низкотемпературной плазмы на смачиваемость контактных площадок печатных плат	56
Н.П. Бобырь, А.В. Спицын, В.А. Жильцов, А.С. Анциферова, С.В. Коробцев. Развитие стендовой базы для исследований в области безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД)	62
В.К. Болдышева, М.Ф. Галиханов, Ю.М. Хантимерова, А.И. Хасанов, Л.К. Каримова. Влияние наполнителя и условий по-	69

лучения на электретные свойства полиэтиленовых пластинок, обработанных в плазме постоянного коронного разряда	
В.К. Болдышева, М.Ф. Галиханов, Ж.В. Кадолич, И.Б. Одарченко, И.Н. Прусенко. Электретные свойства фильтроматериалов с TPMS-структурой, полученных по FDM/FFF- технологии и обработанных в плазме постоянного коронного разряда	77
Я.К. Болотов, А. Г. Мозговой, А.А. Родионов. Проект элетро- ракетного двигателя мегаваттного класса	83
А.Н. Бочаров, И.А. Моралев, И.В. Селивонин, Е.А. Филимонова. Влияние параметров высокочастотного коронного разряда на эволюцию пропано-воздушной смеси	89
Н.А. Булычев. Получение функциональных наноразмерных частиц на основе оксидов металлов в плазменном разряде под действием ультразвука	95
М.М. Васильев, Р.А. Сыроватка, Е.А. Кононов, Р.В. Сеношенко, О.Ф. Петров. Активные броуновские моторы в газоразрядной плазме	100
В.А. Васильева, С.А. Яковлева. Расчеты атомных данных о неупругих процессах при столкновениях ионов циркония с водородом	104
А.С. Владимиров, Б. А. Тимеркаев, Г. Р. Фархутдинова, А.Н. Галиев Плазмохимическое получение водорода и углеродных наноматериалов при электродуговом разложении керосина	109
Я.В. Воронов, С.А. Яковлева, А.К. Беляев. Оценка величин констант скорости процессов взаимной нейтрализации при столкновениях произвольных катионов и анионов в рамках упрощённой модели	114
М.Х. Гаджиев, М.В. Ильичев, Д.И. Юсупов, В.П. Петровский, А.С. Тюфтяев. Экспериментальный генератор низкотемпературной гомогенной и гетерогенной плазмы	120
М.Ф. Галиханов, И.Б. Одарченко, И.Н. Прусенко, Ж.В. Кадолич. Электреты из гофрированного листа полилактида: 3D-печать и обработка в плазме коронного разряда	124
Ф.К. Гасратов, И.С. Байдин, П.К. Батраков, А.В. Огинов. Моделирование стримерной фазы разряда с фотоионизацией по методу Монте-Карло	130

М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, М.И. Яландин. Влияние прикатодной плазмы на условия убегания электронов в газовом диоде с коническим катодом	134
Д.А. Горьковская, Р.А. Картавцов, Д.А. Шпанов, Н.Н. Коваль, Е.А. Петрикова, М.Е. Рыгина, М.С. Петюкевич, М.С. Воробьёв. Применение метода импульсного электронного испарения твердой мишени для нанесения покрытий из карбида бора	138
И.К. Данильченко, Д. А. Томилин. Численное исследование взаимодействия электронов с азимутальными волнами в разрядном канале холловского двигателя.	143
С.А. Двинин, К.Н. Корнев, З.А. Кодирзода, Д.К. Солихзода, Д.В. Чупров. Волны и пространственное распределение электромагнитного поля в магнитоактивной плазме СВЧ разряда	146
А.В. Демура, Д.С. Леонтьев, В.С. Лисица, А.А. Маврин. Моделирование квазиконтинуума вольфрама в пристеночной области плазмы токамака	151
В.О. Дряхлов, И.Г. Шайхиев, М.Ф. Галиханов. Применение плазмы коронного разряда при обработке полимерных мембран для разделения нефтяных эмульсий	156
В.С. Желтухин, И.Ш. Абдуллин, А.В. Чинилкин Объемная модификация пористых диэлектриков в ВЧ-Разряде пониженного давления	161
Ю.А. Земсков, И.В. Уйманов Методика времяразрешающего анализа потоков ионов из вакуумной дуги при помощи спектрометра томсона с затвором	167
С.В. Зотов, М.А. Коваленко, В.Ю. Гарбарук, В.А. Гольдаде, М.Ф. Галиханов. Электретное состояние в волокнистых материалах на основе полифениленсульфида	173
Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, М.И. Яландин. Динамические условия убегания электронов в газовом диоде с резко неоднородным распределением электрического поля	181
Н.М. Зубарев, Л.Н. Лобанов, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин. Структура областей эмиссии убегających электронов: влияние давления газа	185
С.Н. Иванов. Самостоятельный субнаносекундный разряд в сильно перенапряженных газовых промежутках и его применения	189

С.Н. Иванов, В.В. Лисенков Энергетические характеристики самостоятельного субнаносекундного разряда в водороде и азоте	194
А.А. Иванова, И.В. Мурсенкова. Пространственно-временная структура свечения импульсного объемного разряда в сверхзвуковом потоке	199
Т.А. Ишков, Е.А. Бунин, К.Л. Губский, В.А. Жильцов. Оценка чувствительности и области применения волоконного двухцветного интерферометра для исследования параметров плазмы на макете безэлектродного плазменного ракетного двигателя	204
Д.И. Кавыршин, С.Д. Федорович, В.П. Будаев, М.В. Лукашевский, К.В. Чан, Д.М. Соин, Я.А. Голов, Е.А. Кириллова, А.Т. Гогинашвили, К.А. Rogozin. Создание и исследование стационарных плазменных потоков в установке ПЛМ-М	207
Р.Р. Каюмов, И.И. Гайсин, И.Ш. Абдуллин, А.Ф. Гайсин. Разработка и исследование плазменных струйных систем ВЧ-разряда для обработки металлических поверхностей при пониженных давлениях	213
А.А. Козлов, В.Е. Завалова, А.В. Козлов, В.П. Полищук, Ю.В. Карпушин, А.Н. Гусев, М.В. Протасов. Влияние энергии разряда на параметры сгустка водородной плазмы во внешнем магнитном поле	220
Кузенов В.В., Рыжков С.В. Моделирование импульсных радиационно-магнитогазодинамических систем	227
С.В. Кузнецов. Электронные и ионный токи ионно-звуковых солитонов	230
Р.А. Курамшин, А.П. Торбин, П.А. Михеев, М.В. Загидуллин. Кинетическая модель Ag/Ne активной среды лазера на метастабильных атомах инертных газов с двухчастотной оптической накачкой	234
В.М. Лелевкин. Математическое моделирование плазмы электрических разрядов	239
Е.А. Ливерко, В.А. Шахатов, В.Д. Кобцев. Оптическая спектроскопия электрического разряда в потоке воздуха при вводе в междуэлектродную область смеси этилена и кислорода	247
В.В. Мазаева, С.А. Яковлева. Исследование неупругих процессов при столкновениях ионов кадмия с водородом	253
Д.А. Майстренко. Разработка усовершенствованной системы	258

зондовой диагностики для исследования параметров струй плазмы электроракетных двигателей	
К.И. Максимова, И.И. Латфуллин, Г.Р. Рахматуллина. Применение модифицированных наполнителей для получения высококачественного меха	261
Ю.И. Мамонтов. Расчет кинетических коэффициентов для электронов в азоте в сильном электрическом поле	268
А.А. Мамонтова, С.А. Яковлева. Исследование неупругих процессов при столкновениях $Be^{2+} + H^-$ и $Be^+ + H$	274
М.А. Мелкомуков, В.Е. Мисников, О.Л. Шутьев, Е.П. Хренова, А.Д. Шумков. Исследование влияния покрытий с различной архитектурой, осаждённых вакуумно-дуговым методом, на износ фрез	279
Ю.А. Меньшакова, А.И. Меньшаков. Влияние параметров дугового разряда на степень диссоциации $N_2 + O_2$ для синтеза покрытий TiON анодным испарением титана.	285
М.А. Мокеев, Д.А. Горьковская, П.В. Москвин, М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, Р.А. Картавцов. Исследование относительной неоднородности электронного пучка в многодуговом источнике с плазменным катодом	291
И.А. Моралев, И.В. Селивонин, В.О. Галкин. Гидродинамика высокочастотного коронного разряда	297
И.Л. Музюкин, П.С. Михайлов, Д.Л. Шмелев. Временная зависимость состава потока ионов слаботочной вакуумной дуги	303
И.Н. Мустафин, А.А. Аганин. Эффект временной задержки при коллапсе симметрично расположенных парогазовых пузырьков	309
Н.Д. Нагманов, Р.А. Демидова, А.Р. Ибатуллина, И.В. Красина. Исследование эксплуатационных свойств медицинского материала на нетканой основе до и после плазменной модификации	315
И.К. Наумова, В.А. Титов, И.Н. Субботкина, Ю.С. Доброва. Плазмохимическая деполимеризация хитозана в растворе под действием диафрагменного разряда	320
П.И. Петренко, Н.С. Чемоданов, А.В. Переславцев, А.В. Артемов, С.А. Воцинин. Численное моделирование нагрева плазменного конвертера	326

О.Ф. Петров. Активные броуновские моторы и микро- и нанороботы в плазме и жидкостях	332
Е.И. Преображенский, А.В. Водопьянов, А.В. Нежданов. Плазмохимическая модификация водородом углеродных наноматериалов в индукционном Ar/H ₂ разряде	337
Е.И. Преображенский, А.В. Водопьянов, Д.А. Мансфельд, Н.В. Чекмарев. Анализ состава продуктов плазмохимического разложения углекислого газа в СВЧ разряде по оптическим спектрам с применением машинного обучения	341
Ю.И. Пушкарёв, В.Ю. Чебакова. Моделирование взаимодействия газо-жидкостных потоков в безмембранных проточных накопителях	345
З.Г. Рагимханова, Г.Б. Рагимханов, Е.В. Воронова, Е.А. Образцова, Н.Н. Скворцова, А.В. Богач, Н.Г. Гусейн-заде. Изменение свойств нанопорошков и керамических материалов на основе перовскитов (феррита висмута, BiFeO ₃) под воздействием мощного СВЧ-излучения	351
Р.В. Сеношенко, Ф.М. Трухачев, Е.А. Кононов, М.М. Васильев, О.Ф. Петров. Эволюция волновых процессов в системе синтезированных броуновских частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока	358
Н.С. Сергеев. Исследование эрозии вольфрама под действием пучковой плазмы в установке BPD-PSI	361
Н.Н. Скворцова, Н.С. Ахмадуллина, В.П. Логвиненко, Е.В. Воронова, Т.Э. Гаянова, А.С. Соколов, В.Д. Степахин, О.Н. Шишилов. Метод нанесения наночастиц никеля на микро-частицы керамических материалов посредством плазмохимического процесса, инициируемого излучением мощного гиротрона.	367
И.Н. Субботкина, И.К. Наумова, А.Р. Лебедева, А.А. Шилиманова, К.В. Наумова. Деструкция нитрофураля в воде под действием диафрагменного разряда	373
Г.Х. Тазмеев, Х.К. Тазмеев. Автоколебания напряжения в микроразряде постоянного тока в аргоне при атмосферном давлении	379
Д.С. Тарасов, В.С. Желтухин, А.Ю. Савин, А.Ю. Шемахин, Г.Б. Киселёв. Влияние геометрии плазменной антенны с тлеющим разрядом в парах ртути на КСВ	385

В.А. Титов, А.М. Давыдов, В.В. Гудкова, К.В. Артемьев, И.К. Наумова, Н.Г. Гусейн-заде. Деполимеризация хитозана в водных суспензиях под действием импульсного микроволнового разряда	391
В.Н. Тихонов, И.А. Иванов, А.В. Тихонов. Источники нетермальной плазмы для биологии и медицины	397
А.А. Хубатхузин, А.Р. Акберова, И.Г. Шайхиев, В.К. Болдышева, М.Ф. Галиханов. Использование плазмообработанной коры сосны обыкновенной (<i>pinus sylvestris</i>) в качестве нефтесорбента для удаления разливов нефти с водной поверхности	404
Н.В. Чекмарев, Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, Е.И. Преображенский. Рециркуляционный метод закалки для повышения конверсии углекислого газа в СВЧ разрядах	409
М.Б. Шавелкина, П.П. Иванов. Формирование водородных доменов в графене при плазмохимическом синтезе: морфология и термодинамический анализ	413
Д.О. Шуровский, Н.Н. Нагель, С.В. Коробцев, Е.Ю. Брагин, В.Ю. Плаксин, С.А. Данько, С.С. Гусев, И.А. Костриченко, Д.С. Кутузов. Определение коэффициента ионизации рабочего газа в макете безэлектродного плазменного ракетного двигателя	417
Е.П. Шустова, К.П. Шустова, В.Ю. Чебакова, Д.К. Минабудинов. Определение гранулометрического состава сферического порошка	423
А.А. Юсупова, С.С. Виноградова. Влияние обработки неравновесной низкотемпературной плазмой на микроструктуру и физико-химические свойства сталей 20Х13 и 40Х13	430
М.Ю. Яковлев, А.К. Беляев. Проблема переноса электрона и метод перепроецирования	437
С.А. Яковлева. Исследование неупругих процессов при столкновениях ионов европия с водородом	443

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АМОРФНОЙ ДВУОКИСИ КРЕМНИЯ ТКАНЕВОЙ И ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУР ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ

И.Ш. Абдуллин¹, М.З. Гараев¹, В.С. Желтухин²,
А.Д. Кудрявый^{2,*}

¹ООО «Плазма-ВСТ»

420081, г. Казань, Курская 27

²Казанский (Приволжский) Федеральный Университет

420008, г. Казань, Кремлевская 18

e-mail: ADKudryavyu@kpfu.ru

Исследование посвящено повышению прочности стеклоткани путем плазменной модификации ткани из аморфного диоксида кремния (АДКТ) в среде Ar/воздух (70/30) при пониженном давлении. Экспериментально установлен оптимальный режим обработки ($W_p=1,45$ кВт, $t=6$ мин), увеличивающий разрывную нагрузку F_{max} на 28% (до 1650 Н) и относительное удлинение материала.

Ключевые слова: плазменная модификация, высокочастотный емкостной разряд, ВЧЕ-разряд, полимерные композиционные материалы.

Введение

В настоящее время 90% производимых композитов с волокнистым армирующим наполнителем изготавливаются на основе аморфной двуокиси кремния тканевой (АДКТ). Одним из методов повышения качества полимерных композиционных материалов (ПКМ) является воздействие потока низкоэнергетических

ионов (ПНЭИ) на армирующее из АДКТ. Плазменная модификация позволяет добиться качественного изменения физических и механических характеристик АДКТ и, как следствие, композитных материалов с армированием данным наполнителем.

Целью данного исследования являлось повышение прочности на разрыв композитов за счет применения плазменной обработки армирующего наполнителя.

Установки, использовавшиеся для плазменной модификации, описаны в работе [1]. Плазмообразующей средой служила смесь аргона и воздуха в соотношении 70/30. Воздействие ПНЭИ регулировали W_p , P , G и t , в качестве базовых режимов использовали $W_p = 1,6 - 2,3$ кВт, $t = 1 - 5$ мин., $G = 0,04$ г/с, $P = 26,6$ Па. Выбор этих режимов основывался на исследованиях, изложенных в работах [2, 3, 4]. Для измерения разрывной нагрузки использовалось оборудование – Shimadzu.

Результаты исследования

На рис. 1 представлена зависимость F от t при двух значениях W_p .

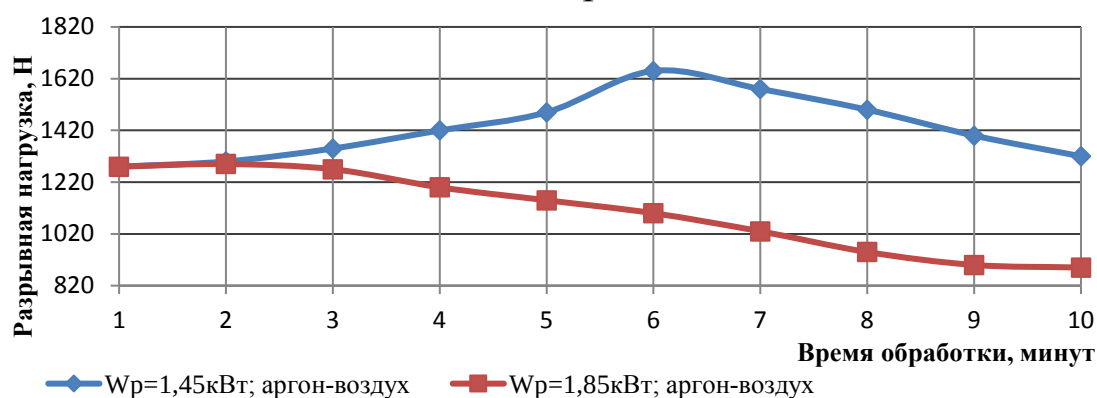


Рисунок 1 – Зависимость F от t для АДКТ (ВЧЕ-разряд пониженного давления)

Как видно из рис. 1, наилучший режим, при котором $F_{\max}$ на 27% больше, чем F без воздействия ПНЭИ – это $W_p = 1,45$ кВт, $t = 6$ мин, $P = 26,6$ Па, $G_{\text{Ар} + \text{воздух}} = 0,04$ г/с (70% Ар; 30% воздух). Дальнейшее увеличение мощности разряда приводит к деструктивным изменениям в АДКТ, при этом $F_{\max}$ резко падает. В таб-

лице 1 представлены данные по $F_{\max}$ и ε_p при варьировании W_p и t . Где $F_{\max}$ – наивысшее усилие растяжения; ε_p – относительное удлинение.

Таблица 1 – $F_{\max}$ и ε_p АДКТ при варьировании W_p и t

Режим	$F_{\max}$, Н*	ε_p , %*
Контрольный	1280	2,9
$W_p = 1,45$ кВт, $t=1$ мин.	1280	3,0
$W_p = 1,45$ кВт, $t=3$ мин.	1350	3,0
$W_p = 1,45$ кВт, $t=6$ мин.	1650	3,7
$W_p = 1,45$ кВт, $t=8$ мин.	1500	2,8
$W_p = 1,45$ кВт, $t=10$ мин.	1320	2,3
$W_p = 1,85$ кВт, $t=1$ мин.	1280	2,6
$W_p = 1,85$ кВт, $t=3$ мин.	1270	2,9
$W_p = 1,85$ кВт, $t=6$ мин.	1100	2,7
$W_p = 1,85$ кВт, $t=8$ мин.	950	2,5
$W_p = 1,85$ кВт, $t=10$ мин.	890	2,8

В наилучшем режиме воздействия ПНЭИ $F_{\max} = 1650$ Н, $\varepsilon_p = 3,7$ %, без воздействия ПНЭИ $F_{\max} = 1280$ Н, $\varepsilon_p = 2,9$ %.

Проведенное исследование подтвердило эффективность плазменной обработки ткани из аморфного диоксида кремния (АДКТ) в среде смеси аргона и воздуха (70/30) при пониженном давлении для повышения физико-механических свойств композитов. Экспериментально установлено, что оптимальный режим обработки ($W_p = 1,45$ кВт, $t = 6$ мин) позволяет увеличить разрывную нагрузку материала на 28% (с 1280 Н до 1650 Н) и относительное удлинение с 2,9% до 3,7%. Дальнейшее увеличение мощности разряда ведет к деструктивным изменениям и резкому падению прочности, что подтверждает необходимость точного подбора параметров модификации.

Литература

1. И.Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, Н. Ф. Кашапов. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. – Казань: Изд-во Казанского ун-та. 2000. 348 с.
2. Ершов, И.П. Увеличение гидрофильности стекловолокна путем обработки его в высоочастотном индукционном разряде / И.П. Ершов, Л.А. Зенитова, Е.А. Сергеева. – Текст: непосредственный // Сборник материалов Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы – ФНТП - 2014». – Казань: Издательство КНИТУ, 2014. – С. 184-185.
3. Ершов, И.П. Гидрофилизация стекловолокна путем обработки его в высоочастотном емкостном разряде / И.П. Ершов, Л.А. Зенитова, Е.А. Сергеева. - Текст: непосредственный // Сборник статей IX Международной научно-практической конференции «Новые технологии и материалы легкой промышленности». – Казань: Издательство КНИТУ, 2013. - С. 279-281.
4. Ершов, И.П. Модификация синтетических волокон и нитей. Обзор / И.П. Ершов, Е.А. Сергеева, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин. - Текст: непосредственный // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т.15, № 18. – С. 136-143.

STUDY OF CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AMORPHOUS SILICON DIOXIDE OF FABRIC AND FIBROUS STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF A LOW-ENERGY ION FLUX

I. SH. Abdullin¹, M. Z. Garaev¹, V. S. Zheltukhin², A. D. Kudryavyy^{2,*}

¹*Plasma-VST LLC*

27 Kurskaya St., Kazan, 420081

²*Kazan (Volga Region) Federal University*

18 Kremlyovskaya St., Kazan, 420008

**ADKudryavyy@kpfu.ru*

The study is devoted to increasing the strength of fiberglass fabric by plasma modification of amorphous silicon dioxide fabric (ASDF) in an Ar/air (70/30) environment at reduced pressure. An optimal processing mode ($W_p = 1.45$ kW, $t = 6$ min) was experimentally established, increasing the breaking load F_{max} by 28% (up to 1650 N) and the relative elongation of the material.

Keywords: plasma modification, radio-frequency capacitive discharge, RFCD discharge, polymer composite materials.

ДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В КЛАСТЕРАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

А.А. Аганин, И.А. Аганин*, А.И. Давлетшин

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН

420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

** aganel@gmail.com*

Изучается влияние несферичности кластера на степень сжатия его пузырьков при гармоническом колебании давления жидкости. Исследование проводится до начала разрушения части пузырьков. Влияние несферичности кластера оценивается сравнением результатов для сферического кластера с соответствующими результатами для кубического, а также цилиндрического кластера с торцевыми накладками в виде прямоугольного параллелепипеда. Показано, что при тех амплитудах возбуждения, при которых ни один из пузырьков кластеров еще не начал разрушаться, примерно одинаковые величины максимального давления в пузырьках несферических кластеров оказываются до 50% меньше, чем сферического.

Ключевые слова: динамика пузырьков, кластер пузырьков, сферический кластер, кубический кластер, цилиндрический кластер, дискретная модель

Введение

Изучение особенностей динамики пузырьков в кластерах представляет значительный интерес для приложений, поскольку на практике пузырьки обычно встречаются в виде разнообразных агломераций. Важной характеристикой динамики пузырьков является степень их сильного сжатия, поскольку сильное сжатие может приводить к высоким давлениям и температурам в пузырьках и их окрестности. Сильное сжатие пузырьков может вы-

зывать появление в жидкости радиально расходящихся от пузырьков ударно-волновых импульсов, обладающих большим разрушительным потенциалом. Известно, что наиболее высоких степеней сжатия пузырьков можно добиться в кластерах сферической формы [1].

В настоящей работе изучается влияние несферичности кластера на величину достигаемых в его пузырьках максимальных давлений в том случае, когда давление жидкости изменяется по гармоническому закону. Для оценки влияния несферичности кластера результаты, полученные для сферического кластера, сравниваются с соответствующими результатами для кубического кластера и цилиндрического кластера с торцевыми накладками в виде прямоугольного параллелепипеда.

Постановка задачи. Математическая модель

Рассматривается динамика газовых (воздушных) пузырьков в кластерах в жидкости (воде) при гармоническом возбуждении

$$p_L = p_0 - p_a \sin \omega t,$$

где $p_L = p_L(t)$ – текущее давление жидкости, t – время, p_0 – статическое давление жидкости, p_a – амплитуда, ω – частота. Давление p_k внутри k -го пузырька кластера ($1 \leq k \leq K$, K – число пузырьков в кластере) изменяется следующим образом: $p_k = p_{g0} (R_0 / R_k)^{3\gamma}$, где $R_k = R_k(t)$ – текущий радиус этого пузырька, R_0 – начальный радиус всех пузырьков, $p_v = \text{const}$ – давление насыщенного пара жидкости, γ – показатель адиабаты газа, $p_{g0} = p_{b0} - p_v$ – начальное давление газа во всех пузырьках, $p_{b0} = p_0 + (2\sigma / R_0)$ – начальное давление внутри всех пузырьков, σ – поверхностное натяжение.

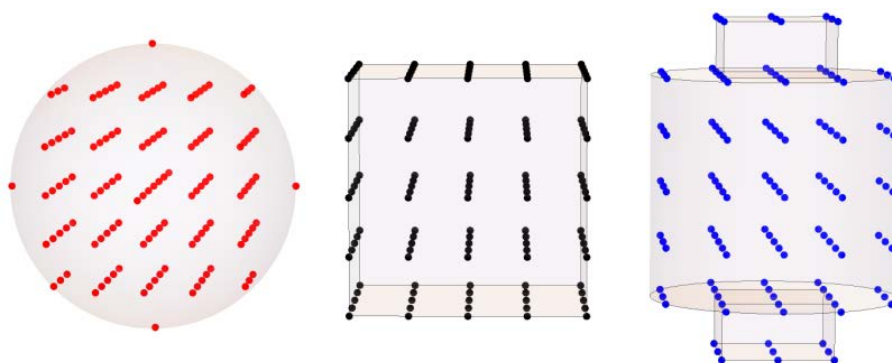


Рисунок 1 – Сферический, кубический и цилиндрический (с торцевыми параллелепипедными накладками) кластеры пузырьков.

При $t = 0$ пузырьки и жидкость покоятся. Кластеры состоят из одинаковых по размеру сферических пузырьков, центры которых расположены в узлах кубической сетки, один из узлов находится в центре кластеров. Рассматриваются три равновеликих по объему кластера (рис. 1): сферический ($K = 123$), кубический ($K = 125$) и цилиндрический ($K = 123$) с торцевыми накладками (для коррекции числа пузырьков K) в виде прямого параллелепипеда. Поверхность кластеров образуется центрами пузырьков, наиболее удаленных от центра кластера.

Изучается влияние несферичности кластера на величину максимальных степеней сжатия пузырьков в условиях, близких к условиям SBSL [2]. Принимается, что статическое давление жидкости $p_0 = 1$ бар, температура жидкости $T = 20^\circ\text{C}$, динамическая вязкость жидкости $\mu = 0.007$ кг/(м·с), поверхностное натяжение $\sigma = 0.0725$ Н/м, давление пара $p_v = 0.023$ бар, частота возбуждения $\omega/2\pi = 20$ кГц. Исследования выполняются при начальном радиусе пузырьков $R_0 = 5$ мкм, начальном расстоянии между центрами соседних пузырьков $d_0 = 100$ мкм в случае сферического и $d_0 \approx 120$ мкм в случае кубического и цилиндрического кластеров, амплитуда возбуждения p_a в диапазоне от 0.95 до 1.2 бар.

В качестве математической модели используется модель работы [3]. Поверхность k -го пузырька в ней представляется в виде

$$r_k = R_k(t) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=-2}^n a_{nk}^m(t) Y_n^m(\theta_k, \varphi_k)$$

Здесь r_k, θ_k, φ_k – сферическая система координат с началом в центре пузырька, $Y_n^m(\theta_k, \varphi_k) = P_n^{|m|}(\cos \theta_k) e^{im\varphi_k}$ – сферические гармоники, i – мнимая единица, $P_n^{|m|}$ – присоединенные полиномы Лежандра степени n порядка $|m|$, a_{nk}^m – амплитуда отклонения формы пузырька от сферической в виде $Y_n^m(\theta_k, \varphi_k)$. Степень несферичности в виде гармоники $Y_n^m(\theta_k, \varphi_k)$ характеризуется величиной параметра ε_{nk} , определяемого следующими выражениями

$$\varepsilon_{nk} = \varepsilon_{nk \max}, \text{ если } \varepsilon_{nk \max} + \varepsilon_{nk \min} \geq 0, \varepsilon_{nk} = \varepsilon_{nk \min}, \text{ если } \varepsilon_{nk \max} + \varepsilon_{nk \min} < 0$$

$$\varepsilon_{nk \max} = \max_{\theta_k, \varphi_k} \varepsilon_{nk}^*(\theta_k, \varphi_k), \varepsilon_{nk \min} = \min_{\theta_k, \varphi_k} \varepsilon_{nk}^*(\theta_k, \varphi_k),$$

$$\varepsilon_{nk}^*(\theta_k, \varphi_k) = \sum_{m=-n}^n \varepsilon_{nk}^m(t) Y_n^m(\theta_k, \varphi_k), \varepsilon_{nk}^m = a_{nk}^m / R_k.$$

Полагается, что $\varepsilon_{nk}^2 \ll 1$ при любых n и k . Исследования проводятся до начала разрушения каких-либо пузырьков. Считается, что разрушения нет, если $\varepsilon_{\max} = \max_k \varepsilon_k < 1$. Совместная динамика пузырьков описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями относительно радиусов пузырьков R_k , координат их центров и амплитуд их несферичности a_{nk}^m [3].

Результаты

Рис. 2 иллюстрирует влияние формы кластера на максимальную степень сжатия его пузырьков в зависимости от амплитуды возбуждения. Максимальная степень сжатия пузырьков характеризуется максимальным давлением $p_{\max}$, достигаемым в пузырьках кластера до момента начала разрушения какого-либо из его пузырьков t_{dsn}

$$p_{\max} = \max_{k, 0 < t \leq t_{dsn}} p_k(t).$$

На рис. 2 видно, что при тех амплитудах возбуждения, при которых ни один из пузырьков кластеров еще не начал разрушаться, примерно одинаковые величины $p_{\max}$ у несферических кластеров оказываются до 50% меньше, чем у сферического. При этом значения $p_{\max}$ у несферических и сферического кластеров превышают значение $p_{\max}$ у одиночного пузырька не более чем в 500 раз.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00567, <https://rscf.ru/project/25-21-00567/>.

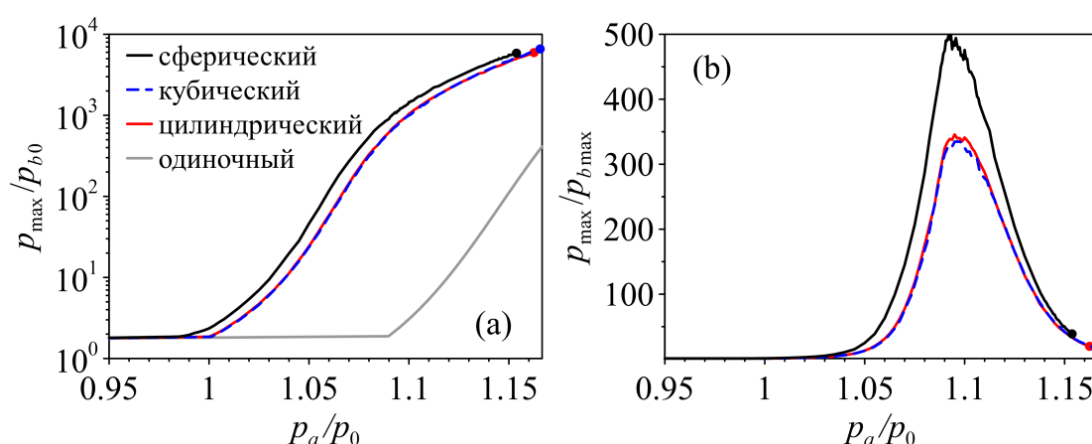


Рисунок 2. – Зависимости максимального давления в пузырьках сферического, кубического и цилиндрического кластеров, отнесенного к начальному давлению в пузырьках (а) и к максимальному давлению в одиночном пузырьке (б), от амплитуды возбуждения, отнесенной к статическому давлению. На (а) приведена также соответствующая зависимость для одиночного пузырька. Точки на концах кривых соответствуют началу разрушения каких-либо пузырьков кластера.

Литература

1. Wang Y.-C., Brennen C.E. Numerical Computation of Shock Waves in a Spherical Cloud of Cavitation Bubbles // J. Fluids Eng. 1999. V. 121. No. 4. P. 872–880.
2. Löfstedt R., Barber B.P., Putterman S.J. Toward a hydrodynamic theory of sonoluminescence // Phys. Fluids A. 1993. V. 5. P. 2911–2928.
3. Aganin I.A., Davletshin A.I. Effect of bubble-bubble interaction in spherical clusters under ultrasonic forcing // Lobachevskii J. Math. 2026. V. 47. No. 6 (in press).

DYNAMICS OF GAS BUBBLES IN CLUSTERS OF DIFFERENT SHAPE

Aganin A.A, Aganin I.A.*, Davletshin A.I.

*Institute of Mechanics and Engineering FRC KazSC RAS
2/31, Lobachevsky str., Kazan 420111 Russia
* aganel@gmail.com*

The cluster nonsphericity effect on the degree of bubble compression under harmonic oscillations of the liquid pressure is studied. The cluster nonsphericity effect is assessed by comparing the results for a spherical cluster with those for a cubic cluster and a cylindrical cluster with rectangular parallelepiped-like end caps. It is shown that, at the excitation amplitudes at which none of the cluster bubbles have yet begun to disintegrate, approximately equal maximum bubble pressures reached in the nonspherical clusters are up to 50% lower than those in the spherical cluster.

Key words: bubble dynamics, bubble cluster, spherical cluster, cubic cluster, cylindrical cluster, particle model

КИНЕТИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ ПАРОВ ВОДЫ И H₂O-СОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Н.Л. Александров

*Московский физико-технический институт
141700 Долгопрудный, Московская область, Институтский переулок 9,
Россия
aleksandrov.nl@mipt.ru*

Кинетические свойства заряженных частиц в плазме с парами воды необходимы при проведении фундаментальных исследований и во многих приложениях низкотемпературной плазмы. В докладе приведены современные представления о характеристиках взаимодействия электронов и ионов с молекулами H₂O. Влияние этих молекул на скорости элементарных процессов в плазме рассмотрено в широком диапазоне параметров, включая давление, температуру газа и электрическое поле. Важность данных процессов иллюстрируется на примерах моделирования стримерного разряда в длинных воздушных промежутках при различной влажности и распада плазмы в смесях H₂:O₂, возбуждаемых импульсно-периодическим наносекундным разрядом.

Ключевые слова: плазма паров воды, электронные сечения рассеяния, электронные транспортные коэффициенты, прилипание электронов к молекулам, электрон-ионная рекомбинация, стримерный разряд во влажном воздухе, импульсно-периодический наносекундный разряд.

Слабоионизованная неравновесная газоразрядная плазма, создаваемая во влажном воздухе, около поверхности воды, в пузырьках или пене, встречается как в природных явлениях, так и в современных технологиях. Например, плазма смесей воздуха с

парами воды важна для плазменной медицины, стимулированного плазмой воспламенения и горения, плазменной аэродинамики, плазменной очистки газов и жидкостей, плазменных методов в сельском хозяйстве и задач газовой изоляции. Поэтому в настоящее время уделяется большое внимание моделированию свойств неравновесной газоразрядной плазмы в воздухе и других газовых смесях с парами воды, для чего необходимы данные по коэффициентам переноса электронов и константам скорости электронных процессов в таких средах.

Большой дипольный момент молекул H_2O приводит к аномально большому сечению упругого и неупругого (с возбуждением вращательных и колебательных состояний) рассеяния электронов на этих молекулах. Все это влияет на энергетическое распределение электронов и их интегральные характеристики в смесях с большим содержанием паров воды в слабых и умеренных электрических полях. Причем при моделировании электронных свойств в электрических полях может оказаться необходимым учитывать анизотропное рассеяние электронов на молекулах H_2O . С увеличением электрического поля влияние дипольного момента на электронные сечения ослабевает, в результате чего наблюдается резкий рост электронных коэффициентов переноса и средней энергии электронов в этой области полей.

Прилипание электронов к молекулам в слабых электрических полях чаще всего является трехчастичным, а в сильных полях ему на смену приходят парные процессы диссоциативного прилипания. В случае молекул H_2O трехчастичного прилипания нет, но зато при появлении паров воды в O_2 и смесях с O_2 резко возрастает скорость трехчастичного прилипания электронов к O_2 , где в роли третьего тела выступают молекулы H_2O . Это связано с тем, что эти полярные молекулы в столкновениях эффективно снимают колебательное возбуждение нестабильных ионов O_2^- , через который идет трехчастичное прилипание электронов. Диссоциативное прилипание электронов к H_2O , в отличие от прилипания к

O_2 , идет по трем каналам – с образованием ионов H^- , O^- и OH^- . Расчеты показывают, что наиболее эффективный именно первый канал. Константа скорости по этому каналу больше и константы скорости прилипания к O_2 при наличии этих молекул в смесях с H_2O . Важно, что в таких смесях может иметь место аномально быстрое отлипание от ионов H^- и O^- , которое приводит к частичной компенсации гибели электронов в процессах диссоциативного прилипания.

Наличие большого дипольного момента у молекул H_2O приводит к тому, что в смесях с парами воды положительные и отрицательные ионы становятся гидратированными и, в отличие от других кластерных ионов, содержат много молекул H_2O . Это сказывается на кинетике заряженных частиц. В случае положительных ионов ускоряется диссоциативная электрон-ионная рекомбинация, а в случае отрицательных ионов затрудняется отлипание электронов от них. При этом скорость гидратации ионов зависит от давления и температуры газа сложным образом, что необходимо учитывать при численном моделировании плазмы. Также сложной является зависимость от давления и скорость электрон-ионной рекомбинации при давлениях порядка атмосферного и выше в газовых смесях с большим содержанием паров воды.

Для иллюстрации возможного использования данных по кинетическим характеристикам заряженных частиц в смесях с парами воды приводятся два примера моделирования разрядов в таких смесях. Это, во-первых, развитие длинного стримера во влажном воздухе, а во-вторых – распад плазмы в импульсно-периодическом наносекундном разряде, зажигаемом в газовых смесях $H_2:O_2$, где вначале паров воды нет, но они образуются в смеси в результате окислительных процессов. Результаты моделирования сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

KINETICS OF CHARGED SPECIES IN NON-EQUILIBRIUM PLASMA IN WATER VAPOR AND H₂O-CONTAINING GASEOUS MIXTURES

N.L. Aleksandrov

*Moscow Institute of Physics and Technology
141700 Dolgoprudny, Moscow region, Institutskii lane 9, Russia
aleksandrov.nl@mipt.ru*

Kinetic properties of charged species in H₂O-containing plasmas are required for fundamental studies and in many low-temperature plasma applications. In this presentation, the present state of the art for the characteristics of electron and ion interaction with H₂O molecules. The influence of these molecules on the rates of collisional processes in plasma is considered in a wide range of parameters, including pressure, gas temperature, and electric field. The importance of these processes is illustrated with examples of simulating the streamer discharge in long air gaps with different humidities and plasma decay in H₂:O₂ mixtures excited by the repetitively pulsed nanosecond discharge.

Key words: water vapor plasma, electron cross sections, electron transport coefficients, electron attachment to molecules, electron-ion recombination, streamer discharge in humid air, repetitively pulsed nanosecond discharge.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Г.И. Андреев*, В.Л. Бычков

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический Факультет
119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, дом 1,
строение 2

*andreev.gi18@physics.msu.ru

В работе рассматриваются физические механизмы ионизации ионосферы и верхней атмосферы Земли космическими лучами. Выведено выражение для сечения ионизации через удельные потери энергии и средний ионизационный потенциал. Получены выражения для константы скорости ионизации атомов и молекул ионосферы и концентрации частиц космических лучей. Приведены расчеты зависимости концентрации космических частиц и константы скорости ионизации молекулярного азота протонами и альфа-частицами от геомагнитной широты.

Ключевые слова: космические лучи, ионизация атмосферы, низкотемпературная плазма, ионосфера.

Введение

Ионосфера — это верхняя часть атмосферы Земли, где под действием космических лучей происходит интенсивная ионизация нейтральных газов. В данной работе рассматриваются основные закономерности ионизации, вызываемой космическими лучами, с использованием формулы Бете–Блоха и статистических характеристик первичного спектра.

Сечение ионизации

Рассмотрим прохождение заряженной частицы через вещество. Пусть частица имеет заряд z , скорость v и массу M . На ма-

лом пути dx она теряет энергию dE . Средние потери энергии на единицу длины описываются формулой Бете-Блоха [1]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n_e z^2 e^4}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \delta \right],$$

где n_e – концентрация электронов в среде, m_e – масса электрона, I – средний ионизационный потенциал, $\beta = v/c$, c – скорость света. δ – поправка, учитывающая эффект плотности [2].

Каждый акт ионизации в среднем требует энергии I , поэтому потери энергии на ионизацию составляют $dE = IdN$. Пусть частица, пролетая сквозь среду с концентрацией атомов n , совершает dN актов ионизации за время dt или, что то же самое, на пути $dx = v dt$. Сечение ионизации определяется как

$$\sigma = \frac{1}{nv} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{n} \frac{dN}{dx} = \frac{1}{nI} \frac{dE}{dx}$$

Подставляя выражение для dE/dx из формулы Бете–Блоха, получаем:

$$\sigma = \frac{1}{nI} \frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{I m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \delta \right]$$

Характеристики космического излучения

Первичные космические лучи вне атмосферы имеют распределение по энергии, близкое к степенному [3]

$$J(E) = A_0 E^{-\gamma}$$

где $J(E)$ – дифференциальная плотность потока частиц. Показатель γ не остаётся постоянным во всём диапазоне энергий. При энергии $E = 3 \cdot 10^{15}$ эВ показатель меняется с $\gamma = 2.7$ до $\gamma = 3.1$, при энергии $E = 3 \cdot 10^{18}$ эВ показатель возвращается к $\gamma = 2.7$.

Из-за взаимодействия космических лучей с магнитным полем Земли существует минимальный импульс, при которой космические лучи могут достичь высоты h от поверхности [4]. Мини-

мальный импульс зависит от геомагнитной широты λ , которая почти совпадает с географической.

$$p = p_0(h) \frac{\cos^4 \lambda}{(\sqrt{1 - \cos w \cos^3 \lambda} + 1)^2},$$

где w – угол между геомагнитной параллелью и направлением траектории, причем положительным будем считать направление, совпадающее с направлением с запада на восток. В области высоких широт при $\lambda > 55^\circ$ происходит обрезание спектра, т.е. полная интенсивность космических частиц остается постоянной и перестает зависеть от широты.

В области энергий от $2.5 \cdot 10^9$ эВ космические лучи примерно на 92,4% состоят из протонов, на 8,6% – из альфа-частиц, доля более тяжёлых элементов не превышает 0.1%. Для упрощения расчётов ионизации обычно учитывают только протоны и альфа-частицы, пренебрегая остальными компонентами.

Константа скорости

Для описания суммарного эффекта ионизации вводят константу скорости k

$$\begin{aligned} k &= \int_0^\infty f(E) v \sigma dE = \frac{2\pi(\cos w + 1) J/v}{2\pi(\cos w + 1) \int_0^\infty J(E)/v dE} \\ &= \frac{2\pi(\cos w + 1) J}{n_{cr} v}, \end{aligned}$$

где n_{cr} концентрация частиц космического излучения

$$n_{cr} = \pi \int_0^\infty J(E)/v dE.$$

Тогда константа скорости ионизации ионосферы космическими лучами

$$k = \frac{1}{n_{cr}} \int_0^\infty J(E) \sigma(E) dE.$$

Таблица 1. Зависимость концентрации космических частиц и константы скорости ионизации молекулярного азота космическими лучами от геомагнитной широты, и высоты над уровнем моря

λ , градус	h , км	p_0 , ГэВ/с	n , см ⁻³	k , см ³ /с
0	200	55.7	$2.14 \cdot 10^{-4}$	$2.43 \cdot 10^{-11}$
20	200	55.7	$2.18 \cdot 10^{-4}$	$2.41 \cdot 10^{-11}$
60	200	55.7	$2.22 \cdot 10^{-4}$	$2.71 \cdot 10^{-11}$
0	0	59.3	$1.92 \cdot 10^{-4}$	$2.72 \cdot 10^{-11}$
20	0	59.3	$1.96 \cdot 10^{-4}$	$2.70 \cdot 10^{-11}$
60	0	59.3	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$3.04 \cdot 10^{-11}$

В качестве примера расчета приведем зависимость концентрации космических частиц и константы скорости ионизации молекулярного азота N_2 протонами и альфа-частицами от геомагнитной широты, и высоты над уровнем моря.

Выводы

В работе исследована ионизация атомов и молекул ионосферы космическими лучами. В качестве примера расчета приведена зависимость концентрации космических частиц и константы скорости ионизации молекулярного азота протонами и альфа-частицами от геомагнитной широты.

Литература

1. Н. Bethe, J. Ashkin. Experimental Nuclear Physics. NY: John Wiley, 1953. 253 pp.
2. В.С. Мурзин, Л.И. Сарычева. Множественные процессы при высоких энергиях. М.: Атомиздат, 1974. 368 с.
3. В.С. Мурзин. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов. М.: Университетская книга: Логос, 2007. 488 с.
4. Л. Яносси. Космические лучи. М.: Издательство иностранной литературы, 1949. 463 с.

IONIZATION PROCESSES IN THE IONOSPHERE BY COSMIC RAYS

G.I. Andreev^{*}, V.L. Bychkov

MSU, Faculty of Physics

Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-2 Leninskiye Gory

^{}andreev.gi18@physics.msu.ru*

The paper considers the physical mechanisms of ionization of the ionosphere and the upper atmosphere of the Earth by cosmic rays. An expression is derived for the ionization cross section in terms of specific energy losses and average ionization potential. Expressions are obtained for the ionization rate constants of atoms and molecules of the ionosphere and the concentration of cosmic ray particles. The dependence of the concentration of cosmic particles and the rate constant of ionization of molecular nitrogen by protons and alpha particles on the geomagnetic latitude is calculated.

Key words: cosmic rays, atmospheric ionization, low-temperature plasma, ionosphere.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ТОКОВЫХ ВИТКОВ В ПЛАЗМЕ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ РАЗРЯДАХ

А. С. Байдин, А. Г. Мозговой*, А. В. Огинов, И. Н. Тиликин

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
199991, Москва, Ленинский проспект 53, Россия
mozgovoja@lebedev.ru

Замкнутые токовые витки в плазме (компактные тор или Field Reversed Configuration) могут рассматриваться как современное продолжение тематики тета-пинчей, исследование которых начались еще в 50 годах в США и в СССР. Такие торы можно ускорять, сжимать внешними магнитными полями, что используют как в термоядерных экспериментах, так и для создания тяги в электроракетных двигателях. В экспериментах по взрывам проволочек и по пробоях по поверхности диэлектрика были обнаружены такие замкнутые витки как в вакууме, так и при атмосферном давлении. Ускорение низкотемпературной плазмы в виде компактного тора и последующего лобового столкновения с другим ведет к резкому росту температуры в месте встречи вплоть до термоядерной.

Ключевые слова: замкнутые токовые витки в плазме, компактные тор, Field Reversed Configuration, линейный разряд, пробой по поверхности диэлектрика, страты в разрядах.

Введение

В настоящее время происходит всплеск интереса к компактным торам (КТ или FRC). В Лос Аламосе строится новая экспериментальная платформа по их генерации. Эти исследования проводятся и частными компаниями американскими-Helion Energy, Tri Alpha Energy, MSNW, китайскими-HNMAX-Energy, NovaFusionX, Xeonova, японской- японской Nihon (U./LINEA). В

ТРИНИТИ планируется эксперимент со столкновением двух плазменных потоков, ускоренных друг навстречу друга, моделирование этих процессов ведется в о ВНИИТФ. Helion Energy даже анонсировала запуск нового термоядерного коллайдера POLARIS таких FRC (инвестировано с 2021г. более \$ 1 млрд) и объявлено о заключении контрактов с Майкрософт на поставку первого реактора в 2028 г. и на \$ 35 млн с крупнейшей сталелитейной компании США Nucor Co. Tri Alpha Energy также освоено более \$ 1.2 млрд., из них 50 млн. от Роснано.

Эксперименты

В ранее проведенных исследований в ФИАН по взрыву проволок на установке ГВП 1 (Генераторе Взрывающих Проволочек с напряжением 20 кВ, ток до 10 кА $T=3$ мксек) было показано возбуждение замкнутых токовых витков в плазме вокруг взорванной проволоки [1].

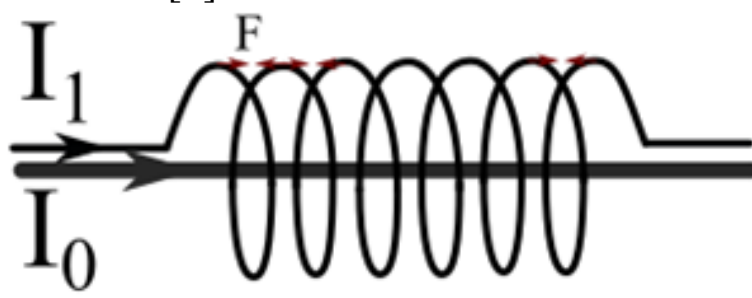


Рис.1. Характерные токовые каналы в случае протекания тока прямолинейно (I_0) и винтообразно (I_1). F — направление силы, возникающей между витками тока.

Взрыв 8-12 проволок симметрично расположенных на поверхности кольцевого (диаметром 20 и 30 см) диэлектрика (односторонний фольгированный гетинакс, фторопласт, полиэтилен) также выявил образование кольцевого тока в образующейся плазме, но уже большего диаметра и его ускорение от поверхности.

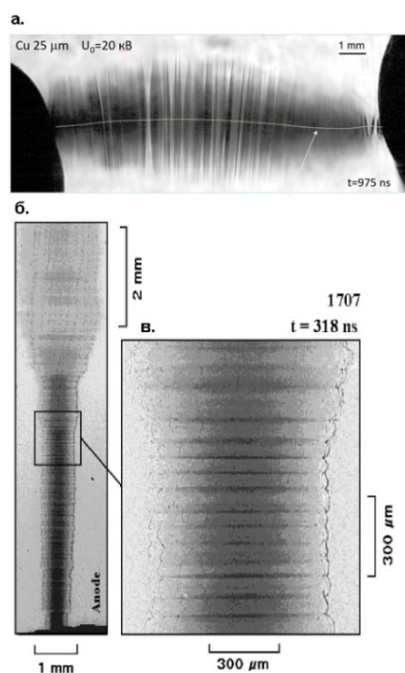


Рис.2. Теневое изображение (а) взрыва медной проволоочки диаметром 25 мкм и тенеграмма (б) и ее увеличенный фрагмент (в) взрыва серебряной проволоочки диаметром 25 мкм в рентгеновском излучение Х-пинча.

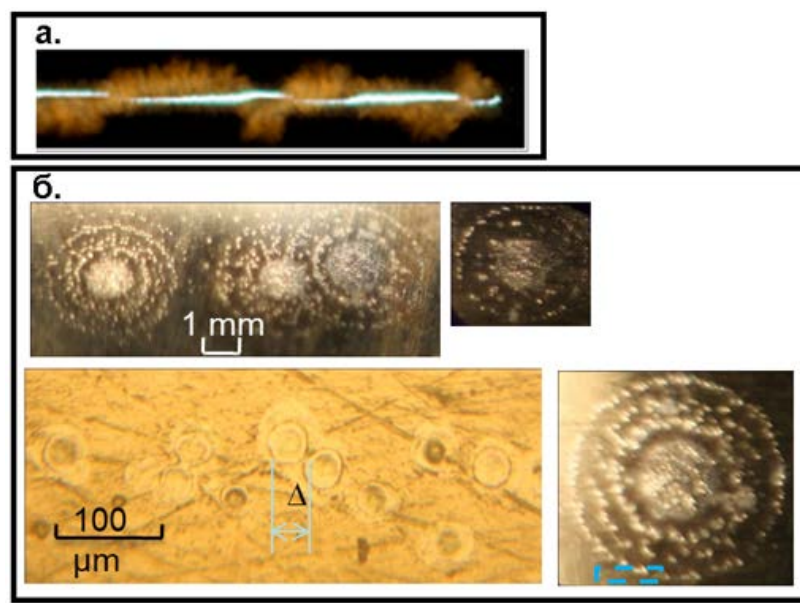


Рис.3 Интегральная фотография взрыва медной проволоочки диаметром 130 мкм длиной 700 мм на воздухе в зазоре сильноточного генератора ЭРГ (а) и поверхность анода-шара ($D = 90$ мм) из нержавеющей стали после нескольких разрядов в воздухе (1 МВ, ~ 14 кА, ~ 50 см), полученные с помощью фотоаппарата с макрообъективом, а также микроскопа (б).

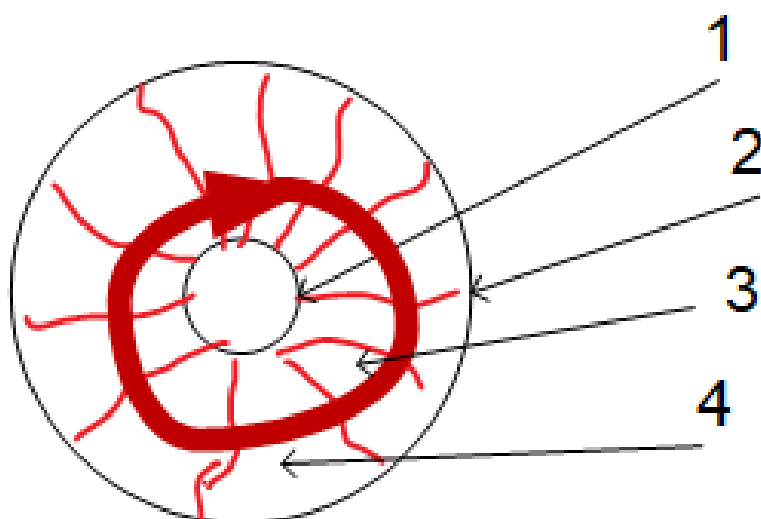


Рис. 4 1- Высоковольтные ввода в центре камеры, 2-земляные электроды на наружном диаметре диэлектрика, 3-разряды в плазме по поверхности диэлектрика, 4 – возникающий в плазме замкнутый токовый виток



Рис. 5 Фото полиэтиленового кольца с нанесенным графитовым покрытием после нескольких «выстрелов» на воздухе , диаметром 30 см

Замена проволочек тонким слабо проводящим слоем графита поверхности диэлектрика картины не меняет, что значительно упрощает проведение экспериментов. Это требует увеличение энергетики до нескольких кДж. Таким образом можно возбуждать FRC более простым способом, чем испытанный и запатентованный.

ванный нами ранее способ генерации FRC в индуктивных накопителях энергии. Такой способ позволит перейти на частотный режим работы, что необходимо как для коллайдеров, так и для электроракетных двигателей [2].

Литература

1. А.Г.Мозговой, А.В.Огинов, И.Н.Тиликин, К.В.Шпаков, Структура тока при электрическом взрыве тонких проводников, КСФ, №12, стр. 91, 2024, DOI: 10.3103/S1068335624601912
2. А.Г. Мозговой, И.Н. Тиликин, Реакторы на природном уране с внешним источником быстрых нейтронов - это будущее энергетики и космонавтики, Сборник материалов XVII Международной конференции Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, 2025, стр. 244

EXITATION OF CLOSED CURRENT LOOPS IN PLASMA DURING A LINEAR DISCHARGE

I.S. Baydin, A.G. Mozgovoy, A.V. Oginov, I.N. Tilikin

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
199991, Moscow, Leninsky prospect 53, Russia
e-mail: mozgovojag@lebedev.ru

Closed current loops in plasma (compact tori or Field Reversed Configuration) can be considered a modern extension of the theta pinch theory, research on which began in the 1950s in the USA and the USSR. Such tori can be accelerated and compressed by external magnetic fields, which is used both in thermonuclear experiments and to generate thrust in electric rocket engines. Experiments involving wire explosions and dielectric surface breakdowns have detected such closed loops in both vacuum and atmospheric pressure. Acceleration of low-temperature plasma in the form of a compact torus and subsequent collision with another torus leads to a sharp increase in temperature at the collision site, reaching thermonuclear levels.

Key words: closed current loops in plasma, compact torus, Field Reversed Configuration, linear discharge, breakdown on the dielectric surface, striations in discharges.

ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ НАНОАЛМАЗОВ В АРГОНО-УГЛЕРОДНОЙ СРЕДЕ С КРЕМНИЕВОЙ ДОБАВКОЙ

**А.А. Байрамгулов*, А.Д. Захарова, Г.Р. Мухаметзянов,
Б.А.Тимеркаев**

Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н. Туполева-КАИ,

420015, Казань, ул. К Маркса, 10.

**pezzoef@mail.ru*

Рассмотрен синтез углеродных наноструктур в электродуговом разряде в атмосфере аргона при введении кремний-углеродной добавки. Проанализировано влияние параметров разряда и состава среды на процессы формирования конденсированной фазы. Установлено, что в различных зонах разряда формируются структуры разного типа, включая дисперсные наночастицы и протяжённые углеродные образования. Показано влияние кремнийсодержащей добавки на процессы нуклеации и морфологию образующихся наноструктур

Ключевые слова: электродуговой разряд, электродуговой синтез, наноалмазы, углеродные наноструктуры, плазма, плазмохимический синтез, аргоновая атмосфера, кремний, кремний-углеродная добавка, нуклеация, конденсация, наночастицы, углеродные нанотрубки.

Введение

Углеродные наноматериалы, в частности наноалмазы, представляют интерес благодаря своим уникальным свойствам. Перспективен их синтез в электродуговой плазме, где формируется пересыщенный углеродный пар. Морфология структур определяется параметрами разряда и составом среды, включая влияние кремнийсодержащих добавок. [1 – 4] Цель работы – исследование

формирования углеродных наноструктур при наличии кремний-углеродной добавки.

Методика эксперимента

Эксперимент проводился в аргоновой дуге при давлении 350 Торр с графитовыми электродами диаметром 11 мм. В аноде была сформирована лунка, в которую была помещена смесь порошков кремния и углерода массой 2 г в соотношении 1:3.

Эксперимент включал серию разрядов при токах 50–120 А с длительностью от 5 до 13 с. С увеличением силы тока время разряда уменьшалось для предотвращения термического разрушения формирующихся структур. Между циклами выдерживалась пауза около 2 минут для охлаждения электродов и реализации последовательных стадий испарения и конденсации.

В ходе экспериментов на поверхностях катода и периферийной области анода наблюдались твердые отложения. После завершения эксперимента эти отложения были изучены на оптическом и электронном микроскопах. Морфология образцов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и обсуждение

На поверхности катода (Рис. 1) наблюдаются дисперсные кристаллические частицы размером 20–50 нм, формирующие плотные агломераты. Частицы имеют выраженные грани, что свидетельствует об их кристаллической природе и позволяет предположить их принадлежность к нанокристаллическому алмазу.

Также на катоде фиксируются отдельные углеродные нанотрубки диаметром около 5 нм и длиной до 1–2 мкм. Их количество невелико, что указывает на преимущественное формирование в данных условиях дисперсных частиц.

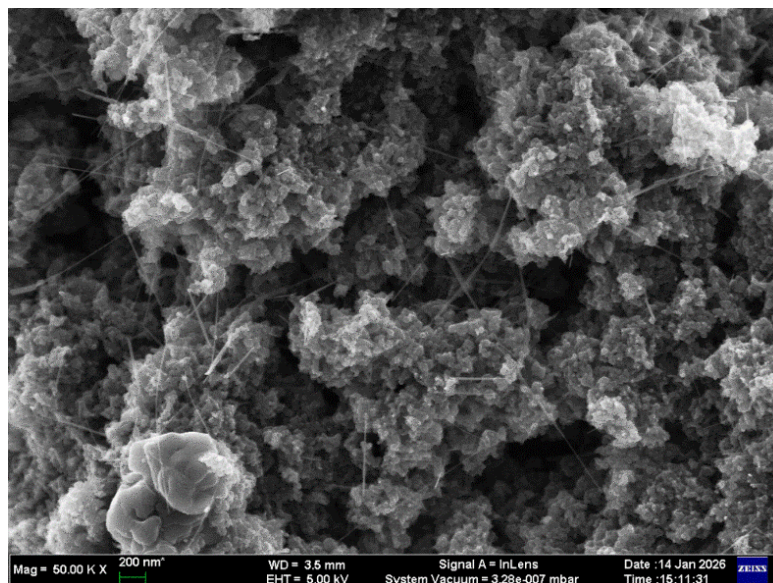


Рис. 1. Фото с электронного микроскопа образца, извлеченного с катода при увеличении в 50 000 раз

В анодной области формируется более сложная морфология (Рис.2, Рис.3). Наблюдаются графеноподобные слоистые структуры, возникающие при более высоких температурах и меньших скоростях охлаждения. Также фиксируется развитая сеть углеродных нанотрубок длиной от сотен нанометров до нескольких микрометров, образующих переплетённые структуры.

Сравнение катодной и анодной областей показывает, что в условиях интенсивного охлаждения формируются преимущественно наночастицы, тогда как при более высоких температурах реализуется рост протяжённых структур.

Существенную роль играет присутствие кремния, влияющего на процессы кластерообразования и фазовые переходы углерода.

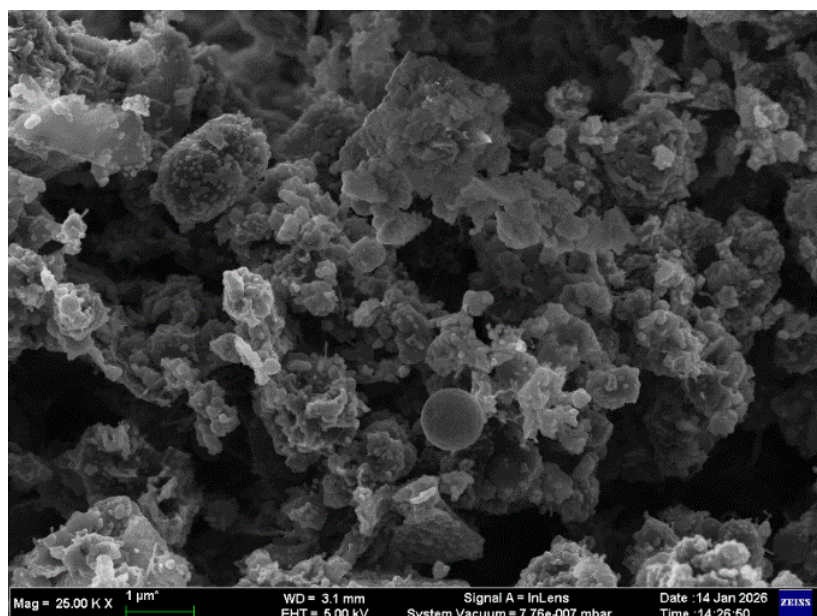


Рис. 2. Фото с электронного микроскопа образца, извлеченного с поверхности анода, при увеличении в 25 000 раз

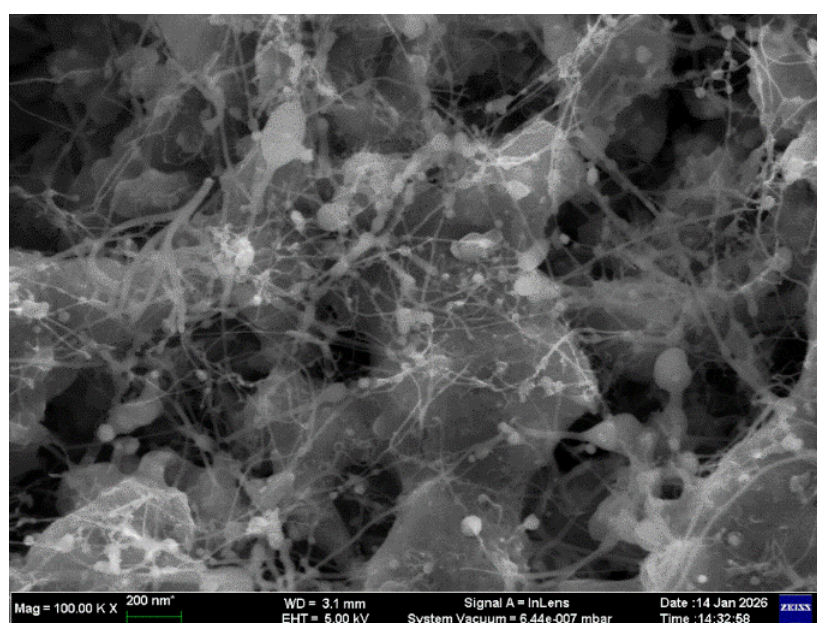


Рис. 3. Фото с электронного микроскопа образца, извлеченного с поверхности анода, при увеличении в 100 000 раз

Литература

1. Bilal M. Bio-applications and Biotechnological Applications of Nanodiamonds / M. Bilal, H. Cheng, R.B. Gonzalez Gonzalez et al. // Journal of Materials Research and Technology. — 2021. — № 15. — P. 6175-6189.

2. Puzyr A.P. Modification and Comparative Study of Commercial Nanodiamonds / A.P. Puzyr, A.E. Burov, V.S. Bondar // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. — 2015. — № 23. — P. 93-97.
3. Исмаилов О. Ю. и др. Повышение эффективности процесса конденсации углеводородных паров //Uzbek Chemical Journal/O'zbekiston Kimyo Jurnal. — 2023. — №. 3.
4. Timerkaev B. A. et al. Plasma-chemical synthesis of nanodiamonds on the surface of a microarc discharge cathode //Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Т. 95. – №. 5. – С. 1201-1206.

ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF NANO-DIAMONDS IN AN ARGON-CARBON ENVIRONMENT WITH A SILICON ADDITIVE

**A.A. Bayramgulov*, A.D. Zakharova, G.R. Mukhametzyanov,
B.A.Timerkaev¹**

¹ *Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan*

*pezzoef@mail.ru

The synthesis of carbon nanostructures in an arc discharge in an argon atmosphere with the introduction of a silicon–carbon additive is considered. The influence of discharge parameters and medium composition on the formation of the condensed phase is analyzed. It is established that different types of structures, including dispersed nanoparticles and extended carbon formations, are formed in different discharge regions. The effect of the silicon-containing additive on nucleation processes and the morphology of the resulting nanostructures is shown.

Keywords: electric arc discharge, electric arc synthesis, nanodiamonds, carbon nanostructures, plasma, plasma chemical synthesis, argon atmosphere, silicon, silicon-carbon additive, nucleation, condensation, nanoparticles, carbon nanotubes.

ДВУХРАКУРСНАЯ ДВУХДЛИННОВОЛНОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ ИМПУЛЬСНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ

П.К. Батраков^{1,*}, М.А. Медведев^{1,2}, И.С. Байдин¹,
А.А. Родионов¹, Я.К. Болотов¹, Ф. К. Гасратов¹,
П.А. Старовойтова¹, А.В. Огинов¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Ленин-
ский проспект, д. 53, 119991

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Москва

*p.batrakov@lebedev.ru

В работе представлена двухканальная оптическая диагностика плазменных каналов высоковольтных разрядов. Предложенный подход позволяет получать взаимодополняющие проекции показателя преломления плазмы и восстанавливать пространственное распределение электронной плотности. Использование двух направлений зондирования повышает достоверность результатов и даёт возможность оценить аксиальную симметрию канала. Разработанная методика расширяет диагностические возможности и применима для исследования структуры и динамики импульсных разрядов.

Ключевые слова: двухволновая интерферометрия газового разряда, плазменный разряд, сегментация и морфологическая обработка, алгоритмы компьютерного зрения.

Исследование процессов возникновения и эволюции атмосферных электрических разрядов в контролируемых лабораторных условиях представляет собой одну из ключевых задач современной физики плазмы. Проведение таких экспериментов позволяет детально изучать механизмы формирования и развития разрядных каналов, особенности перераспределения электрического

поля, а также процессы накопления и движения пространственного заряда. При этом определяющее значение имеет знание пространственного распределения электронной плотности, поскольку именно этот параметр задаёт проводящие свойства плазмы и во многом определяет динамику развития разряда [1-6].

В диагностике плазменных каналов широкое применение находят оптические методы, среди которых интерферометрия является одним из ключевых подходов. Данный метод основан на регистрации фазовых сдвигов зондирующего излучения при его распространении через плазменную среду. Вместе с тем, традиционные одноканальные интерферометрические схемы обеспечивают получение информации, интегрированной вдоль направления распространения оптического луча, что существенно ограничивает возможности восстановления локальной пространственной структуры разряда [7,8].

В этой связи перспективным является применение двухканального зондирования, при котором регистрация интерферометрических данных осуществляется с различных направлений наблюдения. Такой подход позволяет формировать набор взаимодополняющих проекций исследуемого объекта и, как следствие, повышать точность реконструкции распределения параметров плазмы. Дополнительные сложности обусловлены высокой временной нестационарностью процессов в разряде, а также сложной структурой интерференционных картин, что предъявляет повышенные требования к устойчивости методов регистрации и к выбору специализированных алгоритмов обработки экспериментальных данных.

Последующая обработка интерферограмм предполагает извлечение фазовых искажений, индуцированных плазменной средой, а также восстановление радиального распределения электронной концентрации с применением обратного преобразования Абеля для каждой из полученных проекций [9]. Сопоставление результатов, полученных при зондировании с двух взаимно неза-

висимых направлений, обеспечивает повышение надёжности конструкции и позволяет выявлять возможные отклонения от предположения об осевой симметрии структуры разряда.

Таким образом, реализация двухканальной схемы регистрации расширяет функциональные возможности интерферометрической диагностики и обеспечивает получение более детализированной информации о пространственной структуре плазменных каналов в импульсных высоковольтных атмосферных разрядах.

Данная работа финансировалась за счет средств Российского научного фонда (грант № 23-19-00524).

Литература

1. Petersen D., Bailey M., Beasley W. H., Hallett J. A brief review of the problem of lightning initiation and a hypothesis of initial lightning leader formation. *Journal of Geophysical Research* 2008; 113: D24202. DOI: 10.1029/2007JD009036.
2. Dwyer J. R., Saleh Z., Rassoul H. K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M. A., Rakov V. A. A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure. *Journal of Geophysical Research* 2008; 113: D23207. DOI: 10.1029/2008JD010315.
3. Kochkin P. O., van Deursen A. P. J., Ebert U. Experimental study on hard X-rays emitted from metre-scale negative discharges in air. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2015; 48: 025205. DOI: 10.1088/0022-3727/48/2/025205.
4. Zaidel A. N., Ostrovskaya G.V. *Laser Methods for Plasma Research* [In Russian]. Leningrad: Nauka; 1977.
5. Romanova V. M., Ivanenkov G. V., Parkevich E. V., Tilikin I. N., Medvedev M. A., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A., Selyukov A. S. Laser scattering by submicron droplets originated during the electrical explosion of thin metal wires. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2021; 54: 085201. DOI: 10.1088/13616463/abdce5.
6. Smaznova Kh. T., Medvedev M. A., Gavrilov S. Yu., Oginov A. V. The main features of plasma channel formation in a high-voltage atmospheric discharge. *Quantum Electronics* 2024; 54: 673–677.
7. Komuro A., Natsume C., Ando A. Measurement of gas-density variation in pulsed streamer discharge at atmospheric pressure by Mach–Zehnder interferometry. *Plasma Sources Science and Technology* 2021; 30(9): 095008. DOI:

10.1088/1361-6595/ac1def.

8. Gribkov V. A., Nikulin V. Ya., Sklizkov G. V. Double-beam interferometry method for investigating axisymmetric configurations of dense plasma. Soviet Journal of Quantum Electronics 1972; 1(6): 606–612. DOI: 10.1070/QE1972v001n06ABEH003297.

TWO-VIEW, DUAL-WAVELENGTH INTERFEROMETRIC DIAGNOSTICS OF PLASMA CHANNELS IN PULSED HIGH-VOLTAGE DISCHARGES

**P.K. Batrakov^{1*}, M.A. Medvedev^{1,2}, I.S. Baidin¹, A.A. Rodionov¹,
Ya.K. Bolotov¹, F.K. Gasratov¹, P.A. Starovoitova¹, A.V. Oginov¹**

¹*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN), 53
Leninsky Prospekt, Moscow, 119991, Russia*

²*National Research Centre “Kurchatov Institute,” Moscow, 123182, Russia
p.batrakov@lebedev.ru

The work presents a two-channel optical diagnostics method for plasma channels of high-voltage discharges. The proposed approach enables the acquisition of complementary projections of the plasma refractive index distribution and allows reconstruction of the spatial distribution of electron density. It is shown that using two probing directions increases the reliability of the obtained results and makes it possible to assess the degree of axial symmetry of the plasma channel. The proposed technique expands diagnostic capabilities and can be used in the study of the structure and dynamics of pulsed discharges.

Keywords: two-wavelength interferometry of gas discharge, plasma discharge, segmentation and morphological processing, computer vision algorithms.

РАЗЛОЖЕНИЕ CO₂ ПРИ ПРОПУСКЕНИИ ЕГО ЧЕРЕЗ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАЗРЯД В ЖИДКОМ МЕТАНОЛЕ

Т.С. Батукаев ^{1,*}, И.В. Билера ¹, Г.В. Крашевская ^{1,2},
Ю.А. Лебедев ¹, В.К. Шумилов ¹

¹Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), Ленинский пр., 29, Москва, 119991 Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия

*batukaevtimur95@gmail.com

Впервые представлены результаты, демонстрирующие возможность утилизации диоксида углерода с одновременным производством синтез-газа с использованием микроволнового разряда в жидком метаноле с барботажем CO₂ при атмосферном давлении. Скорость потока CO₂ на входе варьировалась от 100 до 670 мл/мин, мощность падающего микроволнового излучения изменялась от 450 до 540 Вт. Основными продуктами разряда являются H₂ и CO. Максимальная степень разложения диоксида углерода составляет 75 %.

Ключевые слова: Микроволновый разряд в жидкости, получение водорода, разложение CO₂.

Введение

В настоящее время успешно решаются или требуют решения несколько важных проблем. Одна из таких проблем — разложение CO₂ или переработка CO₂ в ценные химические вещества и синтетическое топливо. При решении этих проблем значительное внимание уделяется использованию низкотемпературной плазмы [1, 2]. Известно, что добавление метана и водорода в разряд увеличивает степень разложения CO₂ [3, 4].

Использование микроволновых разрядов в жидкостях для разложения CO₂ является перспективным, поскольку основными

продуктами данного типа разряда являются H_2 и CH_4 [5, 6]. Другое ключевое преимущество – естественное быстрое охлаждение продуктов реакции жидкими парами, испаряющимися в горячий газовый пузырек после прекращения активной фазы разряда. Данные о разложении CO_2 в микроволновом разряде в водном растворе этанола с барботажем CO_2 описаны в [5, 7, 8]. Было показано, что степень разложения CO_2 достигает 43%. Присутствие воды в растворе этанола, необходимое для снижения образования твердых частиц, уменьшает степень разложения CO_2 . Был сделан вывод, что метанол может быть перспективным решением этой проблемы. Известно, что в разряде в метаноле образование твердых частиц углерода незначительно.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, используемая для генерации и изучения микроволнового разряда в жидкостях, подробно описана в [7, 8]. Эксперименты проводились при мощности падающего микроволнового излучения в диапазоне от 450 до 540 Вт. Разряд создавался в жидком метаноле на конце центральной антенны коаксиала. Антенна выполнена из вольфрамовой трубки с внешним диаметром 3,0 мм и диаметром канала 1 мм, через которую в жидкость подавался поток CO_2 со скоростью 100-670 мл/мин. Для облегчения возникновения разряда рядом с антенной на расстоянии 3 мм от её конца был помещен заземленный вольфрамовый стержень диаметром 3 мм. Разрешенные во времени спектры регистрировались с помощью стробированного спектрографа AvaSpec-2048x14-USB2 (Avantes B.V., Нидерланды). Расход газовой смеси на выходе измеряли механическим расходомером, состав газовой смеси определяли с помощью портативного газового хроматографа с обратной продувкой ПИА (МЕМС, Россия).

Результаты и обсуждение

Основными продуктами на выходе являются: H_2 (63-40%), CO (35-42%), CO_2 (0,8-24%) и CH_4 (1,75-0,9%). При низких ско-

ростях потока CO_2 на входе основными продуктами газового разряда являются продукты разложения паров метанола. По мере увеличения скорости потока CO_2 на входе, концентрация водорода в продуктах уменьшается (рис. 1а) как из-за разбавления паров метанола диоксидом углерода в газовом пузырьке с плазмой, так и из-за его потребления в реакции с CO_2 (обратная реакция конверсии водяного газа: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} (\text{г}) + \text{CO}$, $\Delta H = 41,2 \text{ кДж/моль}$). Это связано с уменьшением общего потока продуктов на выходе из разряда с увеличением скорости потока CO_2 . При расходе CO_2 более 400 мл/мин кинетика общего потока продуктов на выходе (рис. 1б) определяется разложением CO_2 . Это приводит к увеличению общей скорости и объясняет немонотонный характер зависимости между общим расходом продукта на выходе и расходом CO_2 на входе.

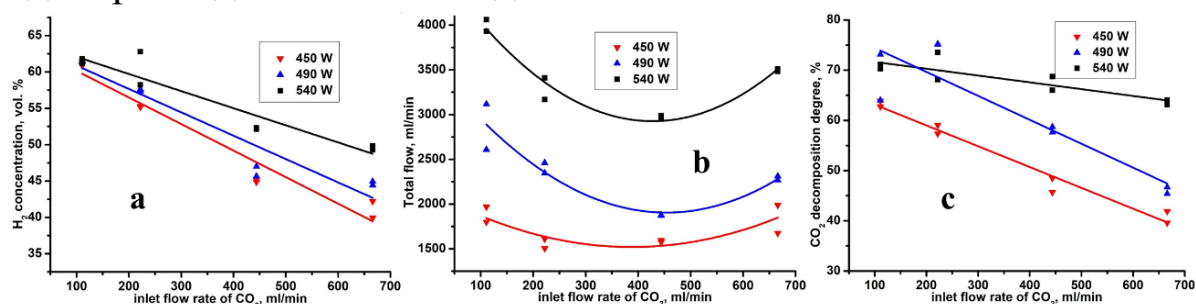


Рис. 1. Зависимость концентрации H_2 (а), скорости образования продуктов (б) и степени разложения CO_2 (с) от расхода CO_2 на входе в реактор для трех режимов падающей мощности.

Зависимость степени разложения CO_2 (рис. 1с) от потребления CO_2 в разряде в метаноле принципиально отличается от той, которая наблюдалась в аналогичном разряде с этанолом [8]. В то время как в экспериментах с этанолом степень разложения была немонотонной и уменьшалась при низких скоростях потока CO_2 [8], в случае метанола в этом диапазоне скоростей потока CO_2 была достигнута максимальная степень разложения CO_2 около 75 %.

В спектрах излучения микроволновых разрядов в жидком метаноле с барботажем CO_2 наблюдаются полосы молекулы C_2 , а также линии атомов водорода H_α (656 нм), H_β (481 нм), кислорода (777 нм), вольфрама (590 нм) и углерода (833, 906, 911, 940, 965 нм). Для определения вращательной и колебательной температур с помощью программы *Spectair* использовались последовательно излучения молекулы C_2 с $\Delta v=0$ (максимум при 516,5 нм), $\Delta v=1$ (максимум при 563,5 нм), $\Delta v=-1$ (максимум при 473,75 нм). Вращательная и колебательная температуры электронно возбужденных состояний равны 5000 и 6000 К соответственно.

Следует отметить, что определенные температуры значительно выше, чем измеренные при разряде этанола [8]. Это различие, скорее всего, обусловлено увеличением удельной поглощенной мощности в условиях данного эксперимента, за счет ввода дополнительного заземленного электрода.

Заключение

Изучен процесс утилизации диоксида углерода в микроволновом разряде атмосферного давления в жидком метаноле с барботажем CO_2 . Максимальная эффективность разложения диоксида углерода достигает 75 %. Показано, что процесс сопровождается образованием синтез-газа (H_2+CO). Увеличение потока CO_2 на входе приводит к уменьшению концентрации водорода в продуктах и росту концентрации CO .

В отличие от разряда в растворе этанола, образование твердых частиц было незначительным. Оценки показали, что наилучший результат с точки зрения энергопотребления для разложения CO_2 составляет 18 эВ/моль. Это лучше, чем при барботировании CO_2 через микроволновый разряд в растворе жидкого этанола (31 эВ/моль [8]) и в жидких углеводородах (80 эВ/моль [5]) и находится в согласии с аналогичными результатами для газовых разрядов атмосферного давления [2].

Эксперименты показали, что разряд в жидком метаноле может быть эффективным способом утилизации углекислого газа, одновременно позволяющим получать синтез-газ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

Литература

1. George A. et al. A Review of Non-Thermal Plasma Technology: A novel solution for CO₂ conversion and utilization // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. №135. С.109702.
2. Lebedev Yu.A., Shakhatov V.A. Decomposition of Carbon Dioxide in Microwave Discharges (an Analytical Review) // Russian J. of Appl. Chem. 2022. T.95. №1. С.1.
3. Czyłkowski D., Hrycak B., Miotk R., Dors M., Jasiński M. Microwave plasma-assisted hydrogen production via conversion of CO₂–CH₄ mixture // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. №78. С.421.
4. Aerts R., Snoeckx R., Bogaerts A. In-situ chemical trapping of oxygen in the splitting of carbon dioxide by plasma // Plasma Processes and Polymers. 2014. T.11. №10. С.985.
5. Batukaev T.S. et al. CO₂ decomposition in microwave discharge created in liquid hydrocarbon // Plasma. 2023. T.6. №1. С.115.
6. Batukaev T.S. et al. Hydrogen production in microwave discharge in water solutions of ethanol at atmospheric pressure // Plasma Processes and Polymers. 2023. T.20. №6. e2300015.
7. Batukaev T.S. et al. Conversion of CO₂ in microwave discharge in liquid ethanol // Technical Physics Letters. 2025. T.51. №11. С.44
8. Batukaev T.S. et al. Decomposition of CO₂ by Bubbling It Through a Microwave Discharge in Liquid Ethanol // Plasma Processes and Polymers. 2026. T.23. e70141.

DECOMPOSITION OF CO₂ BY PASSING IT THROUGH A MICROWAVE DISCHARGE IN LIQUID METHANOL

**Batukaev T.S.^{1,*}, Bilera I.V.¹, Krashevskaya G.V.^{1,2}, Lebedev Yu.A.¹,
Shumilov V.K.¹**

¹*A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences (IPS RAS), 119991, Leninsky Prospekt 29, Moscow*

²*National Research Nuclear University MEPhI, 115409, Kashirskoe Shosse 31, Moscow*

** batukaevtimur95@gmail.com*

For the first time, results are presented demonstrating the possibility of carbon dioxide utilization with simultaneous syngas production using a microwave discharge in liquid methanol with CO₂ bubbling at atmospheric pressure. The inlet CO₂ flow rate varied from 100 to 670 ml/min, and the incident microwave power varied from 450 to 540 W. The main discharge products are H₂ and CO. The maximum carbon dioxide decomposition efficiency is 75 %.

Keywords: Microwave discharge in liquid, hydrogen production, CO₂ decomposition.

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

А.С. Белёв*, Н.А. Шарапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

*105005, г. Москва, вн. тер. г. Муниципальный округ Басманный,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.*

** belev@bmstu.ru*

Методом высокоскоростной видеосъемки, синхронизированной с регистрацией тока и напряжения, исследована динамика формирования квазистационарного импульсного высокочастотного разряда с переменной частотой повторения импульсов в воздухе атмосферного давления. Эксперименты выполнены в аксиальной электродной системе при межэлектродном расстоянии 5 мм, частоте повторения импульсов 1-10 кГц и энергии импульса 1-4 мДж. Показано, что единичный импульс разряда включает три последовательно реализующиеся стадии: формирование ионизационного канала, энергосвечение в канале и деионизацию. По результатам обработки изображений установлено, что средний диаметр токопроводящего канала на первых двух стадиях составляет 0,064–0,089 мм.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, импульсный разряд, атмосферное давление, высокоскоростная видеосъемка, динамика разряда, ионизационный канал.

Введение

Низкотемпературная воздушная плазма атмосферного давления широко используется в плазмохимии, технологиях обработки поверхностей и экологических приложениях [1]. Для разработки импульсных плазменных источников принципиальное значение

имеет установление механизма формирования единичного разряда и распределения энерговклада по стадиям процесса.

В работах [2, 3] рассмотрен объемный импульсный разряд в атмосферном воздухе и структурные особенности квазистационарного импульсного высокочастотного разряда с переменной частотой повторения импульсов. Объемный характер импульсного разряда обусловлен последовательным появлением пространственно-распределенных каналов, интегральное изображение которых выглядит как свечение всего промежутка.

Настоящие тезисы представляют краткое изложение результатов, подробно опубликованных в [4], и направлены на выделение ключевых стадий формирования разряда по данным высокоскоростной видеосъемки и электрических измерений.

Экспериментальная установка и методика

Эксперименты выполнялись на специализированном стенде с аксиальной системой электродов. Частота повторения импульсов составляла 1-10 кГц, расход воздуха от 1 до 10 л/мин, вкладываемая в отдельный импульс энергия 1-4 мДж. Межэлектродное расстояние равнялось $(5 \pm 0,1)$ мм; верхний электрод был выполнен из латуни, нижний – из меди.

Для регистрации разрядного процесса использовалась высокоскоростная камера Phantom v2512 с частотой 675200 кадров/с и экспозицией 0,97 мкс. Напряжение на разрядном промежутке измерялось емкостным делителем, ток – датчиком тока, сигналы регистрировались цифровым осциллографом АКИП-4122. Пространственный масштаб определялся по известному межэлектродному расстоянию. Динамика развития разряда представлена на рис.1.

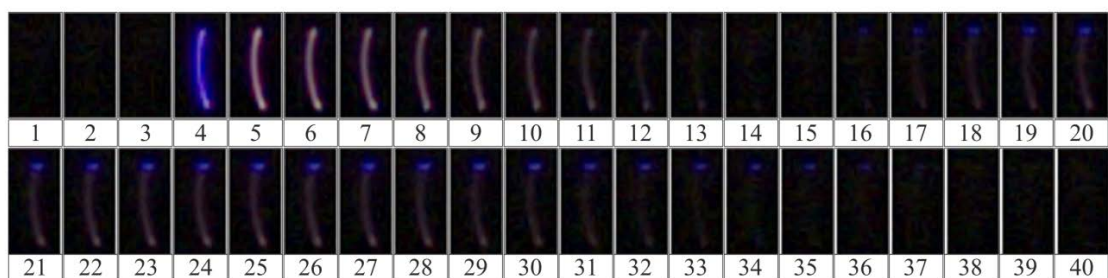


Рисунок 1 – Покадровая динамика развития единичного импульса разряда

Результаты и обсуждение

Характерная продолжительность единичного импульса составляла 50 мкс. Временное разрешение съемки 1,5 мкс позволило проследить эволюцию разряда по кадрам. Сопоставление видеоданных с осциллограммами тока и напряжения показало, что разрядный процесс включает три последовательно реализующиеся стадии, отмеченные на рис. 2.

Стадия I соответствует формированию ионизационного канала в высокочастотном поле. До пробоя сопротивление межэлектродного промежутка остается высоким, а разрядная камера работает как элемент колебательного контура, возбуждаемого на резонансной частоте 20-40 МГц при амплитуде напряжения до 50 кВ. длительность стадии составляет 1-2 мкс.

На стадии II формируется проводящий канал с конечным сопротивлением, параметры колебательного контура изменяются и происходит основное энерговыделение в газе. Частота колебаний тока при этом уменьшается на несколько порядков и определяется уже параметрами внешней цепи и сопротивлением разрядного канала.

Стадия III характеризуется деионизацией канала: ток в разряде прекращается, сопротивление промежутка резко возрастает, а оставшаяся энергия возбуждает затухающие высокочастотные колебания. По данным обработки изображений средний диаметр

канала на стадии I составляет 0,068–0,080 мм, а на стадии II – 0,064–0,089 мм.

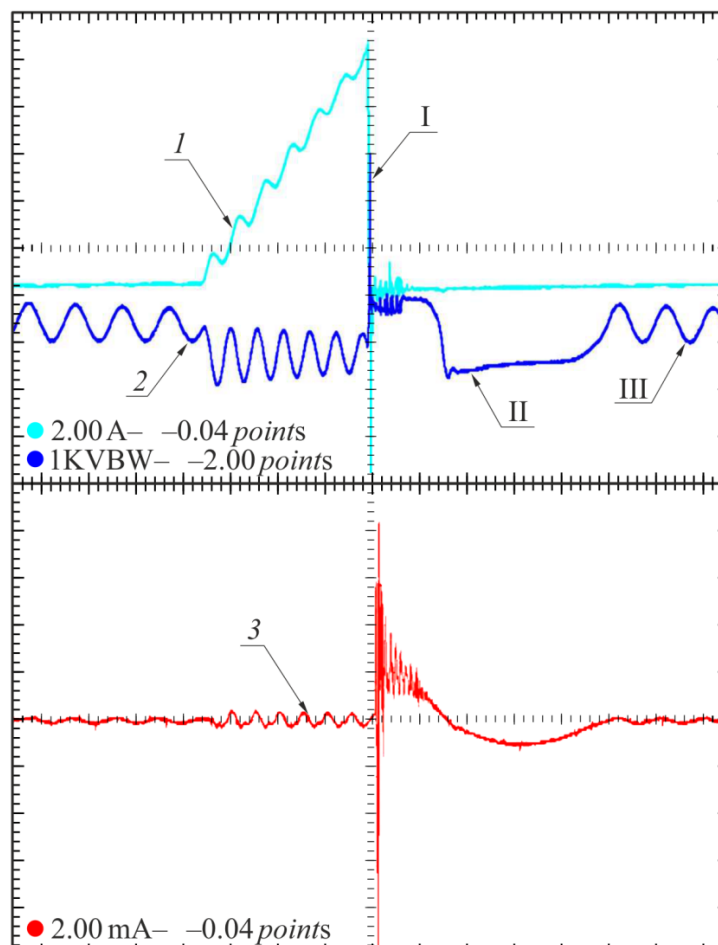


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения, иллюстрирующие три фазы разрядного процесса

Полученные результаты подтверждают, что исследуемый процесс формирования квазистационарного импульсного высокочастотного разряда с переменной частотой повторения импульсов реализуется как объемный высокочастотный пробой с последующим энерговыделением в сформированном канале. Совместное применение высокоскоростной видеосъемки и электрических измерений позволяет разделить стадии предварительной ионизации и основного энерговыделения, что важно для физической интерпретации процесса и оптимизации импульсных источников воздушной неравновесной плазмы.

Заключение

Установлено, что квазистационарный импульсный разряд в воздухе атмосферного давления развивается как трехстадийный процесс: формирование ионизационного канала, энерговыделение и деионизация. Высокоскоростная видеосъемка, синхронизированная с электрическими измерениями, позволила получить количественные характеристики канала на ранних стадиях. Результаты могут быть использованы при диагностике и оптимизации импульсных источников низкотемпературной плазмы.

Литература

1. Акишев Ю.С. Низкотемпературная плазма: новые возможности для химических технологий // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. № 8. С. 26–42. DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5908.
2. Шарапов Н.А., Чуканов В.И., Дистанов Р.Р., Козлов Н.П., Пекшев А.В., Хоменко В.А., Вагапов А.Б., Дусалиева Р.Р. Импульсный разряд с объемным энерговыделением в атмосферном воздухе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10(22). С. 32.
3. Шарапов Н.А., Хинкис А.А., Гаджихалилова С.И., Мельник Т.В., Парфенов А.В. Исследование структуры частотного импульсного разряда в воздухе атмосферного давления // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2017. Т. 40. № 2. С. 61–69.
4. Шарапов Н.А., Маланичев С.Е., Траубергс В.Ю., Белёв А.С., Корепин Д.В. Исследование высокочастотного импульсного разряда в воздухе с помощью высокоскоростной видеосъемки // Журнал технической физики. 2026. Т. 96. Вып. 1. С. 41–47. DOI: 10.61011/JTF.2026.01.62036.58-25.

DYNAMICS OF HIGH-FREQUENCY PULSED DISCHARGE FORMATION IN AIR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

A. S. Belev^{1,*}, N.A. Sharapov¹

*Bauman Moscow State Technical University
5/1 2nd Baumanskaya St., Basmanny Municipal District,
Moscow, 105005, Russia*

** belev@bmstu.ru*

The formation dynamics of a quasi-stationary pulsed high-frequency discharge with a variable pulse repetition frequency in atmospheric-pressure air was investigated using high-speed video imaging synchronized with current and voltage measurements. The experiments were performed in an axial electrode configuration with an interelectrode gap of 5 mm, a pulse repetition frequency of 1-10 kHz, and a pulse energy of 1-4 mJ. A single discharge pulse was shown to consist of three successive stages: ionization channel formation, energy deposition in the channel, and deionization. Image processing revealed that the average diameter of the conductive discharge channel during the first two stages was 0.064 – 0.089 mm.

Key words: low-temperature plasma, pulsed discharge, atmospheric pressure, high-speed imaging, discharge dynamics, ionization channel.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДОК ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

А.С. Белёв *, Н.А. Шарапов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

*105005, г. Москва, вн. тер. г. Муниципальный округ Басманный,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.*

belev@bmstu.ru

Исследовано влияние воздействия низкотемпературной воздушной плазмы атмосферного давления коронного и барьерного разрядов на смачиваемость контактных площадок печатных плат с финишными покрытиями горячим лужением и никель-золотом. В качестве источника плазмы использовался генератор с импульсным высокочастотным разрядом с переменной частотой повторения импульсов. Рабочим газом являлись азот и воздух. Результат оценивался по статическому углу смачивания жидкостью. Показано, что плазменная обработка во всех рассмотренных режимах уменьшает угол смачивания. Наиболее быстрый эффект наблюдался после воздействия барьерным разрядом на контактные площадки с покрытием горячего лужения, а минимальный угол смачивания составил 20° после обработки коронным разрядом в воздухе при времени экспозиции 6 минут. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения технологического процесса плазменной обработки печатных плат перед пайкой.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, атмосферное давление, плазменная обработка, печатные платы, контактный угол, смачиваемость, коронный разряд, барьерный разряд, активация поверхности, пайка.

Введение

Качество паяных соединений в значительной степени определяется состоянием поверхности контактных площадок печатной платы. Органические загрязнения и тонкие оксидные пленки ухудшают смачивание припоем и повышают вероятность дефектов монтажа. В этой связи обработка неравновесной воздушной плазмой атмосферного давления представляет интерес как сухой и экологически более безопасный способ очистки и активации поверхности по сравнению с традиционными химическими методами [1, 2]. В ряде работ для плат с различными финишными покрытиями показано, что воздушная плазма способна повышать смачиваемость и улучшать качество паяного соединения [2–4]. Целью настоящей работы является экспериментальная оценка влияния коронного и барьерного разрядов атмосферного давления на смачиваемость контактных площадок печатных плат с покрытиями HASL и ENIG.

Методика эксперимента

Исследования выполнены на образцах печатных плат с финишными покрытиями HASL и ENIG, а также на образцах фольгированного гетинакса марки FR4 с медной поверхностью, окисленной на воздухе. Обработка проводилась двумя типами разрядов: коронным и барьерным. Коронный разряд реализовывался при атмосферном давлении в воздушной и азотной средах при расходе рабочего газа 6,4 л/мин; время обработки изменялось от 1 до 6 мин. Барьерный разряд формировался в воздушной среде при частотах возбуждения 3 и 5 кГц, длительности импульса 42 мкс и времени обработки от 10 до 180 с.

Для коронного разряда использовался источник с частотой 4 кГц и длительностью импульса 40 мкс при работе на воздухе и 28 мкс при работе на азоте. Для барьерного разряда межэлектродный зазор составлял 4,4 мм, толщина стеклянной диэлектриче-

ской пластины – 1 мм. Эффективность плазменного воздействия оценивалась по величине статического угла смачивания жидкостью. После обработки образцы выдерживались в закрытых контейнерах. Схемы экспериментов приведены на рис. 1.

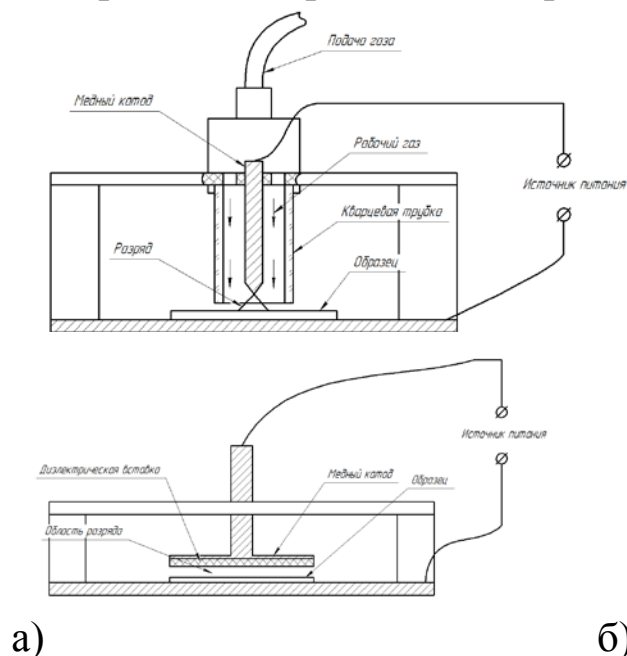


Рисунок 1 – Схемы исследуемых разрядных систем: а – коронный разряд, б – барьерный разряд

Результаты и обсуждение

Во всех рассмотренных режимах плазменное воздействие приводило к уменьшению статического угла смачивания, что свидетельствует о повышении адгезии поверхности. Для необработанного образца HASL угол смачивания составлял 96° . При обработке коронным разрядом в воздухе он снижался с увеличением времени экспозиции до 73° ; 57° ; 55° ; 36° и 20° при временах 1, 2, 3, 4 и 6 мин соответственно. В азотной среде уменьшение также наблюдалось, однако минимальное значение оказалось выше и составило 28° после 6 мин обработки. Наиболее быстрое снижение для HASL обеспечивал барьерный разряд в режиме 3 кГц: уже через 30 с угол уменьшался до 43° , а через 180 с достигал 41° . Соответствующая динамика показана на рис. 2.

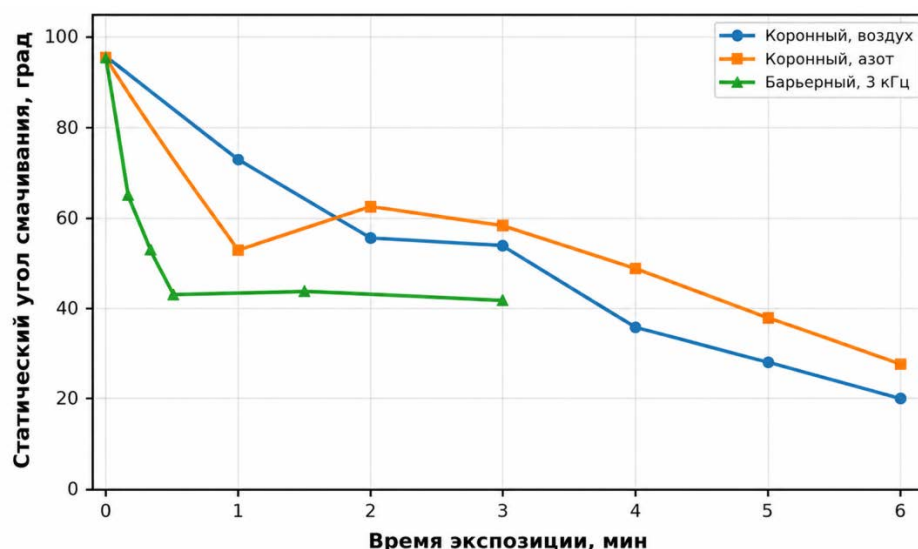


Рисунок 2 – Изменение статического угла смачивания поверхности HASL при различных режимах атмосферной плазменной обработки

Для покрытия ENIG также зафиксировано уменьшение угла смачивания: при коронном разряде в воздухе получены значения 32° через 1 мин и 22° через 4 мин, а при барьерном разряде 3 кГц – 41° через 90 с. Для окисленной медной поверхности гетинакса эффект выражен слабее, что указывает на существенную роль исходного состояния поверхности и состава поверхностной пленки. Важным результатом является частичное сохранение эффекта во времени: для образца HASL, обработанного барьерным разрядом, через 14 суток угол смачивания составил 70° , что хуже свежего состояния, но заметно ниже исходного значения.

Сопоставление режимов показывает, что барьерный разряд обеспечивает более быструю активацию поверхности при существенно меньшей мощности, тогда как коронный разряд в воздухе дает наименьший достигнутый угол при более длительной обработке. Воздушная среда для коронного разряда оказалась эффективнее азотной, несмотря на меньшую вложенную мощность, что согласуется с предположением о важной роли кислородсодержащих активных частиц в процессах очистки и функционализации поверхности.

Заключение

Показано, что воздействие низкотемпературной воздушной плазмой атмосферного давления на контактные площадки печатных плат приводит к устойчивому снижению статического угла смачивания и, следовательно, к повышению адгезии поверхности. Для покрытия HASL наиболее быстрое улучшение достигнуто при барьерном разряде в воздухе в режиме 3 кГц, а минимальное значение угла зафиксировано при коронном разряде в воздухе после 6 мин обработки. Полученные результаты подтверждают перспективность метода плазменной обработки контактных площадок печатных плат как одного из этапов их подготовки перед пайкой. Дальнейшие исследования целесообразно направить на количественную оценку прочности сцепления припоя с поверхностью контактных площадок, анализ химического состава и морфологии поверхности, а также на оценку долговременной стабильности эффекта.

Литература

1. Deltschew R., Hirsch D., Neumann H. et al. Plasma treatment for fluxless soldering // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 142–144. P. 803–807. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01181-1.
2. Takyi G., Ekere N.N. Study of the effects of PCB surface finish on plasma process time for lead-free wave soldering // *Soldering & Surface Mount Technology*. 2010. Vol. 22, No. 2. P. 37–42. DOI: 10.1108/09540911011036271.
3. Kocsis E., Lukács A., Szalai I. Impact of plasma treatment on solderability of printed circuit boards // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 1246. Art. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/1246/1/012013.
4. Králová I., Pilnaj D., Pop-Georgievski O. et al. Wettability in lead-free soldering: Effect of plasma treatment in dependence on flux type // *Applied Surface Science*. 2024. Vol. 668. Art. 160447. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160447.

EFFECT OF ATMOSPHERIC LOW-TEMPERATURE PLASMA ON THE WETTABILITY OF PRINTED CIRCUIT BOARD CONTACT PADS

A.S. Belev *, N.A. Sharapov

*Bauman Moscow State Technical University
5/1 2nd Baumanskaya St., Basmanny Municipal District,
Moscow, 105005, Russia
* belev@bmstu.ru*

The effect of low-temperature atmospheric-pressure plasma generated by corona and dielectric barrier discharges on the wettability of printed circuit board contact pads with hot air solder leveling and electroless nickel immersion gold finishes was investigated. A pulsed high-frequency discharge generator with a variable pulse repetition frequency was used as the plasma source. Nitrogen and air were used as working gases. The treatment effect was evaluated by measuring the static contact angle. Plasma treatment was shown to reduce the contact angle in all investigated modes. The fastest improvement was observed for hot air solder leveling contact pads treated with a dielectric barrier discharge, whereas the minimum contact angle of 20° was achieved after corona discharge treatment in air at an exposure time of 6 min. The results confirm the potential of plasma treatment as a surface preparation step for printed circuit boards prior to soldering.

Key words: low-temperature plasma, atmospheric pressure, plasma treatment, printed circuit board, wettability, contact angle, corona discharge, dielectric barrier discharge, surface activation, soldering.

РАЗВИТИЕ СТЕНДОВОЙ БАЗЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ БЕЗЭЛЕКТРОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (БПРД)

**Н.П. Бобырь*, А.В. Спицын, В.А. Жильцов, А.С. Анциферова,
С.В. Коробцев**

*НИИ "Курчатовский институт"
123098, Москва, пл. Ак. Курчатова д.1
Bobyр_NP@nrcki.ru, NPBobyr@yandex.ru*

В докладе рассмотрена экспериментальная стендовая база НИИ «Курчатовский институт», используемая в рамках работ по созданию мощного безэлектродного плазменного ракетного двигателя, являющегося разновидностью электрических ракетных двигателей. Приведены основные требования к вакуумным стендам для исследований параметров плазменного потока и наземной отработки БПРД большой мощности, в т.ч. требования к их габаритным размерам, системе вакуумной откачки, к моделируемым вакуумным условиям. Приведено описание основных характеристик крупнейшего в России создаваемого специализированного стенда ПЕРСТ.

Ключевые слова: электроракетные двигатели, ЭРД, безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД), вакуумная камера, статическое и динамическое давления, параметрические и ресурсные испытания, диагностика плазменного потока.

Введение

На сегодняшний день электроракетные двигатели (ЭРД) широко применяются на космических аппаратах (КА) для поддержания и коррекции орбит, довыведения на целевые орбиты и в качестве маршевых установок для исследовательских миссий в дальний космос. Также они рассматриваются как основа двига-

тельных установок в перспективных задачах межорбитальных транспортировок грузов и межпланетных перелетов. Двигатели мощностью более 50 кВт являются перспективным классом, предназначенным для использования при перелетах к другим небесным телам, включая пилотируемые миссии. Для электрического питания таких мощных установок наиболее перспективными считаются ядерные бортовые энергоустановки с различными системами преобразования.

Перспективным видом мощного ЭРД является безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД), работа которого основана на принципе ионизации газовой среды рабочего вещества и нагрева сгенерированной плазмы путем создания в разрядной камере двигателя высокочастотного электромагнитного поля большой мощности, с последующим выбросом ускоренного плазменного потока из магнитного сопла двигателя в космическое пространство.

Наиболее значимые преимущества такого двигателя: высокий ресурс двигателя в связи с отсутствием в конструкции изнашивающихся элементов, широкий диапазон регулирования соотношения тяги и удельного импульса, универсальность по отношению к рабочему веществу, возможность создания двигателей мощностью до 10 МВт без изменения физической схемы [1].

Существующие исследовательские установки

Для испытаний макетов и прототипов БПРД требуется специальная экспериментально-стендовая база, включающая в себя, помимо вакуумных камер с высокопроизводительной системой откачки, средства диагностики плазмы. В течение последних 5 лет были существенно модернизированы установки НИЦ «Курчатовский институт» для проведения экспериментальных научных исследований ПС-1, ПН-3, Е-1. Основные изменения были проведены в части систем:

- вакуумной откачки,

- зондовых и тягоизмерительных диагностик,
- оптических диагностик,
- сбора данных.

Установка ПС-1 предназначена для научных исследований БПРД в импульсном режиме с электрической мощностью до 15 кВт и расходом рабочего вещества до 0,005 г/с. Установка представляет из себя вакуумную камеру – имитатор космического пространства объёмом 1 м³ с вакуумной откачкой 7 м³/с. В состав установки входят ВЧ генераторы 1,7 МГц (10 кВт) и 13,56 МГц (10 кВт); СВЧ генератор 7 ГГц (20 кВт); магнитная система из 22 катушек с магнитным полем до 0,67 Тл позволяющая существенно менять профиль магнитного поля; диагностическая система, система регистрации экспериментальных данных.

Установка ПН-3 предназначена для научных исследований и испытаний в импульсном режиме БПРД с электрической мощностью до 25 кВт и расходом рабочего вещества до 0,01 г/с. Установка представляет из себя вакуумную камеру – имитатор космического пространства объёмом 5 м³ с вакуумной откачкой 30 м³/с (включая турбомолекулярный и криогенные насосы). В состав установки входят ВЧ генераторы 1,8 МГц (10 кВт), перестраиваемый генератор 3–30 МГц (20 кВт); магнитная система из двух независимых ВТСП катушек с магнитным полем до 0,67 Тл; диагностическая система, система регистрации экспериментальных данных.

Установка Е-1 предназначена для научных исследований и испытаний в импульсном режиме БПРД с электрической мощностью до 100 кВт и расходом рабочего вещества до 0,02 г/с. Установка представляет из себя вакуумную камеру – имитатор космического пространства объёмом 3 м³/с с вакуумной откачкой 100 м³/с. В состав установки входят ВЧ генераторы 0,5 МГц (150 кВт) и 13,56 МГц (50 кВт); система криогенного охлаждения для обеспечения работы ВТСП магнитной системы БПРД; диагно-

стическая система, система регистрации экспериментальных данных.

Основное рабочее тело БПРД с которым проводятся экспериментальные исследования – аргон, но также используются гелий и неон. В состав диагностических систем установок входят следующие диагностики: СВЧ интерферометрия, ленгмюровские зонды (одиночные, двойные, подвижные), ВЧ зонды, энергетические анализаторы, тягомер и оптические диагностики, что позволяет измерять следующие параметры: плотность плазмы и ее распределение по радиусу, температуру электронной и ионной компоненты и их распределение по радиусу, плазменный потенциал, энергетическое распределение ионов в истекающем из магнитного сопла потоке плазмы, тягу [2].

Однако имеющаяся экспериментальная стендовая база не позволяет проводить полноценные исследования плазмы и испытания мощных БПРД с расходами рабочего вещества более 0,02 г/с в связи с ограниченной скоростью откачки и небольшими размерами вакуумных камер.

Стенд ПЕРСТ

Для расширения возможностей экспериментальной стендовой базы в НИЦ «Курчатовский институт» создается уникальный стенд для научных исследований и стационарных испытаний макетов БПРД с мощностью до 300 кВт и расходом рабочего вещества до 0,1 г/с. Стенд представляет из себя вакуумную камеру – имитатор космоса объемом более 300 м³ с вакуумной откачкой более 350 м³/с и с диагностической системой.

В общем виде стенд ПЕРСТ представляет собой большую цилиндрическую вакуумную камеру общей длиной 20 метров и внутренним диаметром 5м, состоящую из двух независимых отсеков объемом 90 м³ и 300 м³, разделенных диафрагмой (рисунок 1). В меньшем объеме – двигательном отсеке – размещается испытуемое изделие и присоединяется соплом к диафрагме, боль-

ший объём – испытательный отсек – принимает на себя потоки плазмы, являющиеся предметом исследования.



Рисунок 1 – Стенд ПЕРСТ в процессе монтажа секций 2025 г.

Вакуумная камера стенда ПЕРСТ полностью изготовлена из немагнитной нержавеющей стали типа AISI 321, что обеспечивает отсутствие искажений конфигурации электромагнитного поля. Двойная водоохлаждаемая стенка вакуумной камеры обеспечивает отвод тепловой мощности до 300 кВт.

Высокая производительность откачки рабочего вещества обеспечивается 15 (в перспективе 25) криогенными насосами ДУ 900 с номинальной скоростью откачки по аргону $42 \text{ м}^3/\text{с}$ [3]. Предельный остаточный вакуум в испытательном отсеке ожидается не более $1 \times 10^{-4} \text{ Па}$. Динамическое давление в камере в ходе испытаний не должно превышать $1 \times 10^{-2} \text{ Па}$ при расходах рабочего вещества до $0,1 \text{ г/с}$ [4, 5].

Диагностический комплекс стенда включает в себя: волоконный СВЧ интерферометр, подвижные ленгмюровские зонды (одиночные, двойные) и энергетические анализаторы, тягомер,

оптическую эмиссионную спектроскопию, лазерно-индуцированную флюоресценцию.

Стенд ПЕРСТ является высокотехнологичным инструментом, который позволит проводить как параметрические, так и ресурсные испытания макетов БПРД мощностью до 300 кВт, а также проводить всесторонние исследования плазменных потоков благодаря предусмотренному в комплектации полноценному диагностическому комплексу.

Литература

1. В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин «Термояд и космос» ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3. с. 5-20.
2. E.Yu. Bragin «Development of a Diagnostic System for Studying Plasma Processes in the Magnetic Nozzle of an Electrodeless Plasma Rocket Thruster Prototype» Instruments and Experimental Techniques, 2024, Vol. 67, No. 4, pp. 742–754.
3. Н.П. Бобырь и др. «Результаты испытания отдельных элементов криогенной системы стенда ПЕРСТ» 2024 *Вакуумная техника и технологии – 2024* – С. 71-74.
4. А.С. Анциферова и др. «Моделирование распределения давления в вакуумной камере стенда ПЕРСТ при различном расположении средств высоковакуумной откачки» 2024 *Вакуумная техника и технологии – 2024* – С. 65-70.
5. Н.П. Бобырь и др. «Система вакуумной откачки установки ПЕРСТ для отработки безэлектродных плазменных ракетных двигателей» 2023 *Вакуумная техника и технологии – 2023* – С. 421-425.

DEVELOPMENT OF FACILITIES IN THE FIELD OF ELECTRODELESS PLASMA ROCKET THRUSTER (EPRT) RESEARCH

N.P. Bobyr*, A.V. Spitsyn, V.A. Zhil'tsov, A.S. Antsiferova, S.V Korobtsev

*NRC “Kurchatov Institute”
123098, Moscow, Ak. Kurchatov Sq., 1
Bobyr_NP@nrcki.ru, NPBobyry@yandex.ru*

This report examines the experimental facilities at the NRC “Kurchatov Institute” used in the development of a powerful electrodeless plasma rocket thruster (EPRT), a type of electric rocket thruster (ERT). It outlines the key requirements for vacuum facilities for plasma flow research and ground testing of high-power EPRTs, including their dimensions, vacuum pumping system, and simulated vacuum conditions. A description of the key characteristics of Russia's largest specialized test facility, PERST, is also presented.

Key words: electric rocket thruster, ERT, electrodeless plasma rocket thruster, EPRT, vacuum chamber, static and dynamic pressure, parametric and resource tests, plasma flow diagnostics.

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ И УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРЕТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛАСТИНОК, ОБРАБОТАННЫХ В ПЛАЗМЕ ПОСТОЯННОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА

**В.К. Болдышева¹, М.Ф. Галиханов^{1,*}, Ю.М. Хантимерова¹,
А.И. Хасанов², Л.К. Каримова²**

¹*Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А*

²*Казанский национальный исследовательский технологический университет 420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68*

** mgalikhanov@yandex.ru*

В работе анализируется влияние сажевого наполнителя и метода изготовления (горячее прессование и 3D-печать) на электретные свойства пластин из полиэтилена высокой плотности, подвергнутых обработке плазмой постоянного коронного разряда. Приведено изменение значений потенциала поверхности, эффективной поверхностной плотности заряда и напряженности электрического поля образцов в процессе хранения. Саженаполненный полиэтилен демонстрируют улучшенные электретные характеристики с высокой стабильностью, что обусловлено наличием энергетически глубоких ловушек инжектированных носителей зарядов на границе фаз полимер-наполнитель. 3D-печатные образцы обладают повышенными начальными свойствами электретных свойств за счет дефектной структуры, но более быстрой релаксацией по сравнению с прессованными аналогами. Результаты подтверждают перспективность аддитивных технологий для создания электретных устройств сложной архитектуры.

Ключевые слова: электрет, композит, полиэтилен высокой плотности, сажа, плазма постоянного коронного разряда, аддитивные технологии, 3D-печать, прессование.

Введение

Полимерные электреты – это диэлектрические материалы, сохраняющие электрический заряд в течение длительного времени [1]. В последнее время электреты становятся незаменимыми в сенсорных устройствах, в воздушных фильтрах, в преобразователях энергии и т.п. [1, 2]. Для создания таких материалов из многих методов электретирования особенно широко применяется метод обработки полимеров плазмой постоянного коронного разряда. Для получения электретов предпочтительно использовать полимерные композиционные материалы [3]. Добавление наполнителей, в частности сажи, существенно модифицирует структуру полимера, поэтому способно сыграть положительную роль при достижении долговечности электрета в реальных условиях эксплуатации [3, 4].

Внедрение аддитивных технологий для изготовления электретных изделий (главным образом, пленок и пластин сложной архитектуры) открывает новые возможности в материаловедении, позволяет преодолеть ограничения традиционных методов переработки пластмасс [5].

Целью работы является анализ влияния сажи и метода получения на электретные свойства пластин из полиэтилена, обработанных плазмой постоянного коронного разряда.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были взяты полиэтилен высокой плотности (ПЭ) марки HD 02493 NP и саженаполненный ПЭ марки HD 02594 NP (ПАО «Казаньоргсинтез»). Пластины толщиной 1 мм изготавливали методом горячего прессования на гидравлическом прессе Gotech GT-7014-H10C при 190°C и 15 МПа. Параллельно полиэтиленовые пластинки изготавливали методом 3D-печати/ Процесс формирования экспериментальных образцов из полиэтилена высокой плотности и его саженаполненной композиции осуществлялся методом послойного наплавления гранулированного полимера по технологии FGF (Fused

Granulate Fabrication), реализованной на экспериментальной аддитивной установке. Подготовка цифровых моделей к аддитивному производству осуществлялась в программном пакете OrcaSlicer.

Образцы переводили в электретное состояние в плазме постоянного коронного разряда (90 °С, 30 секунд, напряжение на коронирующем электроде – 25 кВ). Потенциал поверхности V_s , эффективную поверхностную плотность зарядов $\sigma_{эф}$ и напряженность электрического поля E пластинок определяли на приборе ИПЭП-1 (Беларусь) в течение некоторого времени хранения $\tau_{хр}$. Ошибка экспериментов – 3 %.

Термогравиметрический анализ (ТГА) образцов проводили на приборе Q500 (США). Структуру образцов на срезе анализировали на микроскопе Saike Digital SK2009HDMI-T (Китай) с увеличением 4×.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований четырех серий пластинок (чистый ПЭ, полученный методом горячего прессования и 3D-печати, а также композитные образцы полиэтилена с сажой, изготовленные аналогичными способами), обработанных плазмой постоянного коронного разряда, было установлено следующее.

Наблюдаемая кинетика спада поверхностного потенциала (рис. 1), характеризующаяся резким снижением в первые 1-5 суток хранения с последующей стабилизацией к 10-15 суткам, типична для полимерных электретов и обусловлена сложным взаимодействием различных механизмов релаксации заряда [1]. При обработке материалов в плазме коронного разряда в объем диэлектрика инжектируются носители заряда – электроны и ионы, захватываемые энергетическими ловушками различной природы. В начальный период хранения более интенсивно протекает процесс релаксации, связанный с нейтрализацией инжектированных зарядов, захваченных на ловушках с низкой энергией активации в

поверхностных и приповерхностных слоях. Эти носители зарядов легко мигрируют на поверхность образца через дефекты структуры и стекают, что приводит к быстрому падению потенциала. Оставшийся заряд локализован в глубоких ловушках с высокой энергией активации. Начиная с этого периода скорость спада заряда становится пренебрежимо малой и электрет переходит в состояние квазистабильности [1].

Введение сажи в полимерную матрицу оказывает решающее влияние на уровень их электретных свойств (рис. 1, табл. 1). Наилучшие показатели по величинам $V_{\text{э}}$, $\sigma_{\text{эф}}$ и E имели композитные образцы, что подтверждает роль углеродных наполнителей в создании глубоких ловушек для электрических зарядов [3, 4]. В композитах, содержащих сажу, перераспределение носителей заряда происходит не только к поверхности образца, но и на границу раздела фаз «полимер–наполнитель», в ловушки с высокой энергией активации. Это и обуславливает повышенные значения их электретных свойств по сравнению с ненаполненным полиэтиленом (рис. 1, табл. 1).

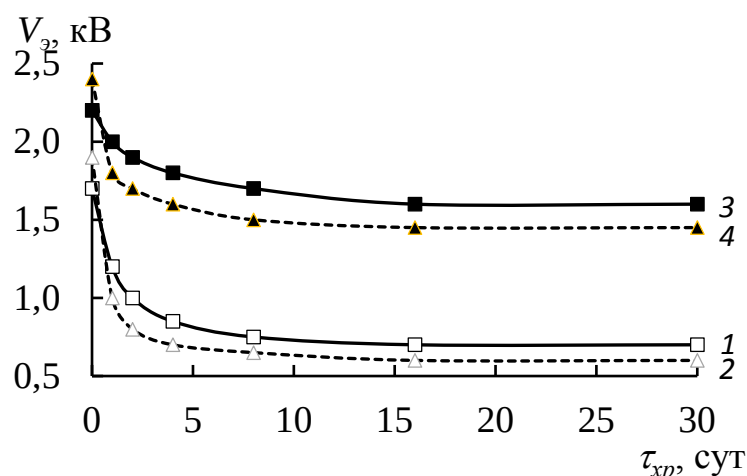


Рисунок 1. Спад потенциала поверхности электретных пластинок на основе ПЭ (1, 2) и саженаяполненного ПЭ (3, 4), полученных методом пресования (1, 3) и 3D-печати (2, 4) с течением времени

Таблица 1. Электретные свойства пластинок на основе ПЭ и саженাপолненного ПЭ, полученных различными методами, сразу после обработки в плазме коронного разряда и на 30-е сутки хранения

Образец	Метод получения	$V_{э0}$, В	$V_{э30}$, В	$\sigma_{эф0}$, мкКл/м ²	$\sigma_{эф30}$, мкКл/м ²	E_0 , кВ/м	E_{30} , кВ/м
ПЭ	прессование	–1720	– 690	0,24	0,14	15,0	6,5
ПЭ	3D-печать	–1920	– 610	0,28	0,13	16,0	6,0
ПЭ + сажа	прессование	–2190	–1640	0,30	0,23	18,5	13,5
ПЭ + сажа	3D-печать	–2440	–1450	0,35	0,20	20,0	11,5

Улучшенная стабильность электретных свойств композитов не связана с повышением термической стабильностью полиэтилена с введением сажи. Наоборот, ТГА показал смещение температур разложения в сторону более низких значений для саженাপолненного ПЭ по сравнению с чистым ПЭ: Температуры потери 5%, 10% и 50% массы для ПЭ – 498,76 °С, 513,92 °С и 550,14 °С, а для саженাপолненного ПЭ – 497,92 °С, 510,55 °С и 546,77 °С соответственно.

Это можно объяснить тем, что поверхность сажи содержит остаточные функциональные группы (карбоксильные, гидроксильные, карбонильные), которые могут выступать катализаторами деструкции полимерной цепи, инициируя процесс распада при более низких температурах, чем в чистом полиэтилене.

Возможность создания сложных геометрических форм и индивидуальной настройки внутренней структуры делает 3D-печать эффективным инструментом для создания нового поколения электретных устройств, что уже было показано ранее [6, 7].

Выявлено, что пластинки, полученные аддитивной технологией, демонстрировали наиболее высокие начальные значения электретных характеристик. Это можно объяснить специфической морфологией слоев, сформированных при 3D-печати, которая создает развитую сеть дефектов, выступающих в роли лову-

шек инжектированных носителей заряда (рис. 2). Однако, данные ловушки, по-видимому, обладают низкой энергией активации и в процессе длительного хранения электретов наблюдается более быстрая релаксация заряда по сравнению с их отпрессованными аналогами (рис. 1).

Хотя образцы, полученные методом прессования, демонстрируют несколько более высокие электретные свойства, напечатанные на 3D-принтере пластины уступают им незначительно. Перспективность использования аддитивных технологий для производства электретов обусловлена не только сопоставимой эффективностью получаемых материалов, но и уникальными возможностями, недоступными традиционным методам переработки полимеров.

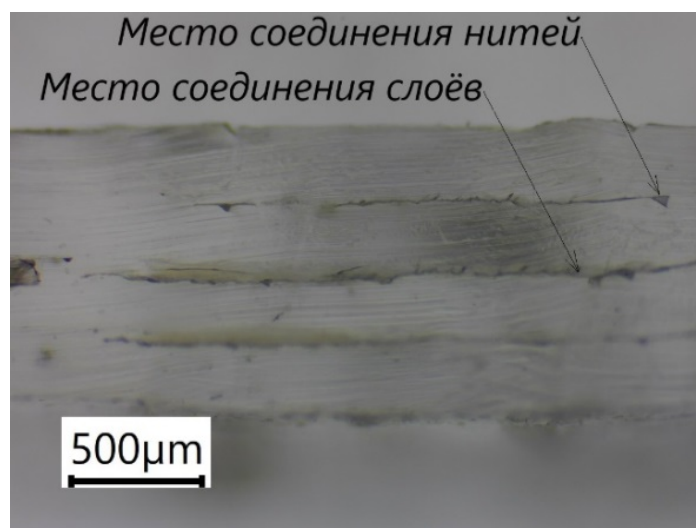


Рисунок 2. Поперечный срез ПЭ пластинок, полученных 3D-печатью

Выводы

Таким образом, композиты из полиэтилена с сажей, полученные методом 3D-печати и обработанные в плазме постоянного коронного разряда, обладают высокими и стабильными электретными свойствами, соответствующими современным требованиям. Это открывает широкие возможности для внедрения аддитивных технологий в серийное производство электретных изделий.

Благодарности

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образо-вательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение № 27 от 01.12.2025 г.).

Литература

1. Электреты / Под ред. Г. Сесслера. – М.: Мир, 1983. 487 с.
2. Li X., Wang Y., Xu M. et al. Polymer electrets and their applications // Journal of applied polymer science. 2021, V. 138, 19. 50406.
3. Galikhanov M. Corona electrets based on filler-loaded polymers: structure, properties, and applications // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2022. V. 29, No. 3. P. 788-793.
4. Осина Ю.К., Борисова М.Э., Галиханов М.Ф. Влияние добавок технического углерода на стабильность электретного состояния полиэтилена высокого давления // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 4-1(183). С. 151-157.
5. Фролова А.Б., Шигапов А.И. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Научные известия. 2022. №29. С. 198-201.
6. Altmann A.A., Suppelt S., Dali O.B. et al. Single-Step 3D Printing of Flexible Ferroelectret Sensors with Large Air Cavities // IEEE Sensors, IEEE, 2024. pp. 1-4.
7. Галиханов М.Ф., Болдышева В.К., Хантимерова Ю.М., Хэ Х., Ма С., Чжан С. Исследование электретных свойств полилактидных пластинок с воздушными полостями, полученных методом 3D-печати // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2025. Т. 5, №. 4. С. 28-36.

THE EFFECT OF FILLER AND PRODUCTION CONDITIONS ON THE ELECTRET PROPERTIES OF POLYETHYLENE PLATES TREATED IN PERMANENT CORONA DISCHARGE PLASMA

V.K. Boldysheva¹, M.F. Galikhanov^{1,*}, Yu.M. Khantimerova¹,
A.I. Khasanov², L.K. Karimova²

¹*Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia*

²*Kazan National Research Technological University
68 K. Marx str., Kazan, 420015, Russia*

* *mgalikhanov@yandex.ru*

The paper analyzes the effect of soot filler and the manufacturing method (hot pressing and 3D printing) on the electret properties of high-density polyethylene plates treated with permanent corona discharge plasma. Changes in the values of the surface potential, effective surface charge density, and electric field strength of the samples during storage are given. Carbon-filled polyethylene exhibits improved electret characteristics with high stability, due to the presence of energetically deep traps of injected charge carriers at the polymer-filler phase boundary. 3D-printed samples have increased initial electret properties due to their defective structure, but faster relaxation compared to their pressed counterparts. The results confirm the promise of additive technologies for creating electret devices of complex architecture.

Key words: electret, composite, high-density polyethylene, carbon black, permanent corona discharge plasma, additive technologies, 3D printing, pressing.

ЭЛЕКТРЕТНЫЕ СВОЙСТВА ФИЛЬТРОМАТЕРИАЛОВ С TPMS-СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО FDM/FFF- ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТАННЫХ В ПЛАЗМЕ ПОСТОЯННОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА

**В.К. Болдышева¹, М.Ф. Галиханов^{1,*},
Ж.В. Кадолич², И.Б. Одарченко², И.Н. Прусенко²**

¹Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А

²Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, 246029, Республика Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, д. 48

** mgalikhanov@yandex.ru*

В работе исследованы электретные свойства объемных фильтроматериалов с TPMS-структурой героидного типа с заполнением 50 и 60%, изготовленных методом FDM/FFF-печати из модифицированного полилактида. Образцы обрабатывались в плазме постоянного коронного разряда. Установлена быстрая релаксация электретного состояния, связанная с преобладанием носителей заряда в поверхностных ловушках. Предложено применять подобные материалы для фильтрации газовых и жидких сред от твердых включений.

Ключевые слова: электрет, фильтроматериал, плазма постоянного коронного разряда, аддитивные технологии, 3D-печать.

Введение

При очистке жидкостей и газов, когда требуется высокая производительность, эффективная глубинная фильтрация и селективное удержание загрязнений (в фармацевтике, биотехнологиях, нефтехимии и т.д.) применяются твердые объемные филь-

троматериалы со сложной архитектурой сквозных пор [1]. Такая структура характеризуется наличием извилистых каналов с градиентной пористостью, что предотвращает прорыв частиц при перепадах давления и повышает ресурс фильтро-материала – его можно многократно регенерировать. Скорость фильтрации при этом может быть в разы выше, чем у гранулированных аналогов, за счет большой площади поверхности и контролируемого размера пор [2].

Пористые фильтроматериалы с гладкими сквозными порами могут иметь структуру TPMS – трижды периодическую минимальную поверхность с нулевой средней кривизной, повторяющаяся в трех измерениях. Такие твердые объемные фильтры со сложной архитектурой сквозных пор активно печатают на 3D-принтерах [3, 4].

Эффективным способом модификации фильтрующих материалов и мембран является обработка в плазме постоянного коронного разряда, что повышает их фильтрующую и разделительную способности [5, 6]. При этом зачастую материал фильтра переходит в электретное состояние, что способствует притяжению частиц загрязнений [7].

Целью данной работы явилось изучение электретных свойств фильтроматериалов с TPMS-структурой, полученных с помощью 3D-печати и обработанных в плазме постоянного коронного разряда.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран технически модифицированный полилактид в виде филамента марки Ultimaker Tough PLA (Нидерланды). Для изготовления образцов фильтроматериалов с TPMS-структурой героидного типа использовали FFF/FDM-принтер Ultimaker S5 (Нидерланды). Параметры печати: высота слоя 0,1 мм, печатное ядро AA0.25 (диаметр сопла –

0,2 мм) с 50 (ФМ-50) и 60 %-ным (ФМ-60) заполнением полимером. Цифровые 3D-модели создавались с использованием Ultimaker Cura 5.11 (рис. 1).

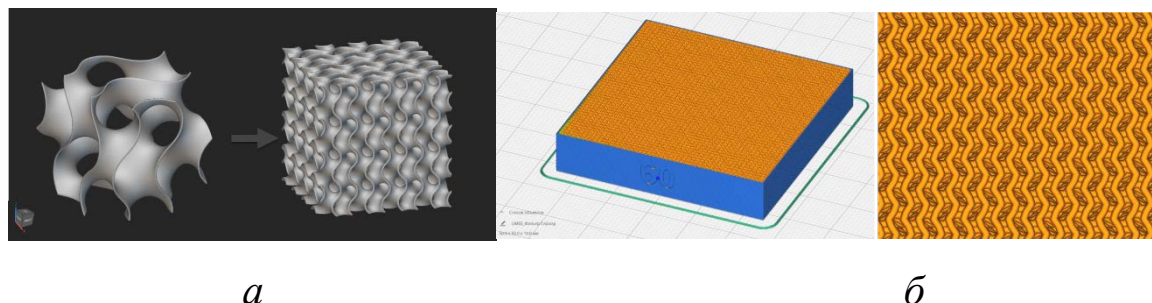


Рисунок 1. Элементарная TPMS- ячейка героидного типа формирующая объемную структуру фильтроматериала (*a*) и послойная структура цифровой модели «Фильтроматериал» для FDM/FFF- печати (*б*)

Образцы переводили в электретное состояние в плазме постоянного коронного разряда с помощью ячейки, состоящей из коронирующего электрода (из 169 игл) и заземленного электрода. Параметры обработки: 90 °С, 30 секунд, напряжение на коронирующем электроде – 25 кВ. Потенциал поверхности V_s определяли на приборе ИПЭП-1 (Беларусь) в течение некоторого времени хранения τ_{xp} . Ошибка экспериментов – 3 %.

Результаты и их обсуждение

Уникальные возможности 3D-печати позволяют создавать объемные фильтры с TPMS-структурой в качестве альтернативы традиционным фильтрам. В отличие от аналогов, фильтроматериалы со сложной архитектурой сквозных пор могут быть сконструированы с заданными количеством и размерами пор, пористостью и удельной поверхностью, с четкой упорядоченностью. Через управление структурой таких фильтров можно перейти к управлению процессами переноса потенциалом для управления процессами переноса газовых или жидких сред.

В настоящей работе, созданные образцы фильтроматериалов с TPMS-структурой героидного типа обрабатывались в плазме постоянного коронного разряда. При этом создается поток носителей зарядов в направлении к заземленному электроду. В результате их инъекции в объем диэлектрика, образцы переходят в электретное состояние (рис. 2). Однако электретное состояние полученных фильтроматериалов быстро релаксирует: к 7-15 суткам потенциал поверхности становится равен нулю.

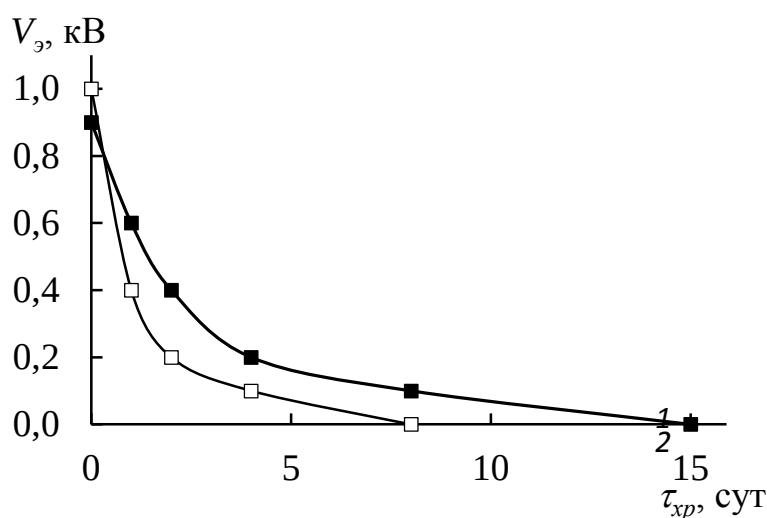


Рисунок 2. Изменение потенциала поверхности полилактидных фильтроматериалов во время хранения

Как правило, начальные значения электретных свойств образцов определяются площадью их поверхности, на которой сосредотачиваются мелкие ловушки инжектированных носителей зарядов, образующиеся в плазме постоянного коронного разряда. Энергетическая глубина таких ловушек невысока и значения $V_э$ быстро спадают во времени (рис. 2). Судя по малому времени жизни короноэлектретов, в объемные глубокие ловушки носители заряда практически не попадают. Это происходит из-за того, что сквозные поры позволяют большинству носителей заряда достигать нижнего электрода не попадая в объем полимера, «облетая» их.

Выводы

Таким образом, полилактидные фильтроматериалы с TPMS-структурой героидного типа, полученные аддитивными технологиями и обработанные в плазме постоянного коронного разряда, приобретают электретные свойства с достаточно высокими начальными значениями потенциала поверхности. Однако электретное состояние быстро релаксирует из-за низкой энергетической глубины поверхностных ловушек и прохождения носителей зарядов через сквозные поры без инъекции в объем полимера. Для повышения электретируемости целесообразно оптимизировать архитектуру пор и параметры плазменной обработки.

Литература

1. Parenteral Medications, Fourth Edition. Ed. by Sandeep Nema, John D. Ludwig. - Boca Raton: CRC Press, 2019. – 1143 p.
2. Sutherland K. Filters and Filtration Handbook Fifth Edition. – Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008. – 507 p.
3. Yu Y., Zhang N., Hoffman D. et al. Design and Evaluation of 3D-Printed Lattice Structures as High Flow Rate Aerosol Filters // ACS Appl. Eng. Mater. 2024. No. 2. P. 2875-2884.
4. Демьяновский В.Б., Каушанский Д.А., Дрозд А.С. Изучение проницаемости изделий героидной структуры, изготовленных по аддитивной технологии 3D-печати термопластичным полимером // Высокомолекул. Соед. Серия А. 2024. Т. 66, No 3. С. 175-180.
5. Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F. et al. Separation of Oil Emulsion Using Polyacrylonitrile Membranes, Modified by Corona Discharge // Inorganic Materials: Appl. Res. 2020. V. 11, No. 5. P. 1160-1164.
6. Galikhanov M.F. Unipolar Corona Discharge Effect on Filtering Capacity of Polypropylene Non-Woven Fabrics // Fibre Chemistry. 2017. V. 48, No. 6. P. 473-477.
7. Li K., Feng G., Chen T. et al. Research of electret air filter: A review // Polymers for Advanced Technologies. 2024. Vol. 35, Issue 6. e6454.

ELECTRET PROPERTIES OF FILTER MATERIALS WITH TPMS STRUCTURE OBTAINED BY FDM/FFF TECHNOLOGY AND PROCESSED IN PERMANENT CORONA DISCHARGE PLASMA

**V.K. Boldysheva¹, M.F. Galikhanov^{1,*},
Zh.V. Kadolich², I.B. Odarchenko², I.N. Prusenko²**

*¹Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia*

*²Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi,
October Avenue, 48, Gomel, 246029, Republic of Belarus,*

** mgalikhanov@yandex.ru*

Abstract: The electret properties of bulk filter materials with a TPMS-structure of the heroid type with a 50% and 60% filling, made by the FDM/FFF-printing method from modified polylactide, were investigated. The samples were processed in the plasma of a constant corona discharge. The fast relaxation of the electret state, associated with the prevalence of charge carriers in surface traps, was established. It is proposed to use such materials for filtering gas and liquid media from solid inclusions.

Key words: electret, filter material, permanent corona discharge plasma, additive technologies, 3D printing.

ПРОЕКТ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕГАВАТНОГО КЛАССА

Я.К. Болотов, А. Г. Мозговой*, А.А. Родионов

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
199991, Москва, Ленинский проспект 53, Россия*

** mozgovoja@lebedev.ru*

Для полета на Марс за пару месяцев кораблю массой в десятки тонн нужны электроракетные двигатели с тягой в сотни ньютонов при непрерывной работе. Максимальная тяга двигателя F может быть оценена по простой формуле из предположения, что вся мощность идет на кинетическую энергию выбрасываемой массы m . Энергия $W = m \cdot V \cdot V/2$, за 1 сек. это мощность N двигателя, $F = m \cdot V$ за секунду, или $F = 2 \cdot N/V$ – тяга обратно пропорциональна скорости V выброса массы; энергия выброса растет как квадрат скорости, а импульс – линейно. И оптимальная скорость порядка 20-40 км/сек при потребляемой мощности в мегаватты. Предложено использовать ускорение компактного тора – плазмоида с замкнутым током в плазме с любым составом и массой до сотен миллиграмм за импульс.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, плазменный двигатель, магнитодинамическое ускорение, тяга, масса и скорость выброса, Марс, абляционный плазменный двигатель.

Введение

Существующие электроракетные двигатели ЭРД дают очень большую скорость выброса в десятки и сотни км/сек и небольшой миллиграммовый расход массы в секунду. Заявленный Росатомом ЭРД имеет скорость выброса 100 км/сек, тягу 6 ньютонов при 300 кВт потреблении, что точно соответствует выше приведенной формуле $F = 2 \cdot N/V$.

Необходимо увеличивать массу ускоряемого вещества. Наша технология направлена на достижение этих целей. Предложено использовать многократное ускорение компактного тора (КТ, или FRC - Field Reversed

Configuration) - плазмоида с замкнутым токовым витком в плазме с любым составом и массой от микрограмм до сотен миллиграмм за импульс как в мегаваттных гибридных (fusion-fission) реакторах, так и в ЭРД. В таком безэлектродном двигателе компактный тор ускоряется магнитным полем от внешних ускоряющих витков с током, как в пушке Гаусса.

В настоящее время происходит всплеск интереса к компактным тородам (КТ или FRC). В Лос Аламосе строится новая экспериментальная платформа по их генерации. Эти исследования проводятся и частными компаниями- американискими Helion Energy, Tri Alpha Energy, MSNW, китайскими-ННМАХ-Energy, NovaFusionX, Хеопова, японской – Nihon (U./LINEA). В ТРИНИТИ планируется эксперимент со столкновением двух плазменных потоков, ускоренных друг навстречу друга, моделирование этих процессов ведется в ВНИИТФ. Helion Energy запустила новую установку POLARIS по FRC (инвестировано с 2021г. более \$ 1 млрд) и даже провела эксперименты с тритием. Объявлено о заключении контрактов с Майкрософт на поставку первого реактора на 50 МВт для дата-центров в 2028 г. и на \$ 35 млн с крупнейшей сталелитейной компании США Nucor Co. и начато его строительство. Tri Alpha Energy также освоено более \$ 1.2 млрд., из них 50 млн. от Роснано [1].

Эксперименты

Международная Космическая станция (МКС), находясь на высоте 400 км, ежемесячно снижается на пару километров под действием силы сопротивления остатков атмосферы. Это сила порядка 0.25 Ньютона и это требует ежемесячного включения двигателей пристыкованных Прогрессов с годовым расходом топлива более тонны, а для «ближнего космоса в 200 км» - это будет на порядок больше. Ближайшая задача – это создание импульсных электроракетных двигателей с тягой в сотни миллиньютон при 5-10 кВт-ном потреблении.

Эксперименты по формированию компактных торов проведены в ФИАН на установке, показанной на Рис.1

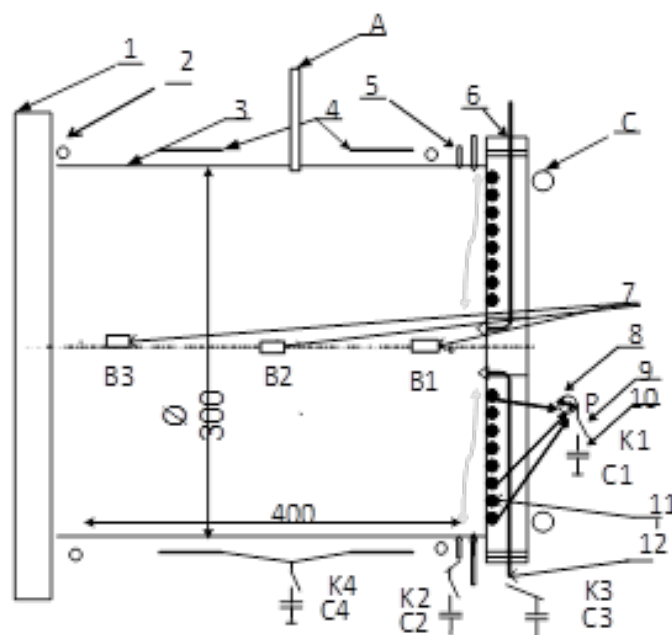


Рис. 1. 1- фланец из оргстекла, 2- измерительная петля, 3- корпус ди-электрической камеры, 4- витки сжатия, 5- плазменные пушки (12 шт.), 6- фланец с индуктивным накопителем с многозаходной обмоткой, 7- датчи-ки магнитного поля B-dot, 8 - прерыватель тока на взрывающихся прово-лочках, 9- вакуумные разрядники K1-K4 к конденсаторным батареям (по одному на батарею), 10- C1, 2, 3, 4- батареи конденсаторов, 11- витки (8-9) индуктивного накопителя с многозаходной обмоткой, 12- электроды от ба-тареи нагрева плазмы, А- детекторная трубка для датчиков мягкого рент-гена PCD , С - виток ускорения.

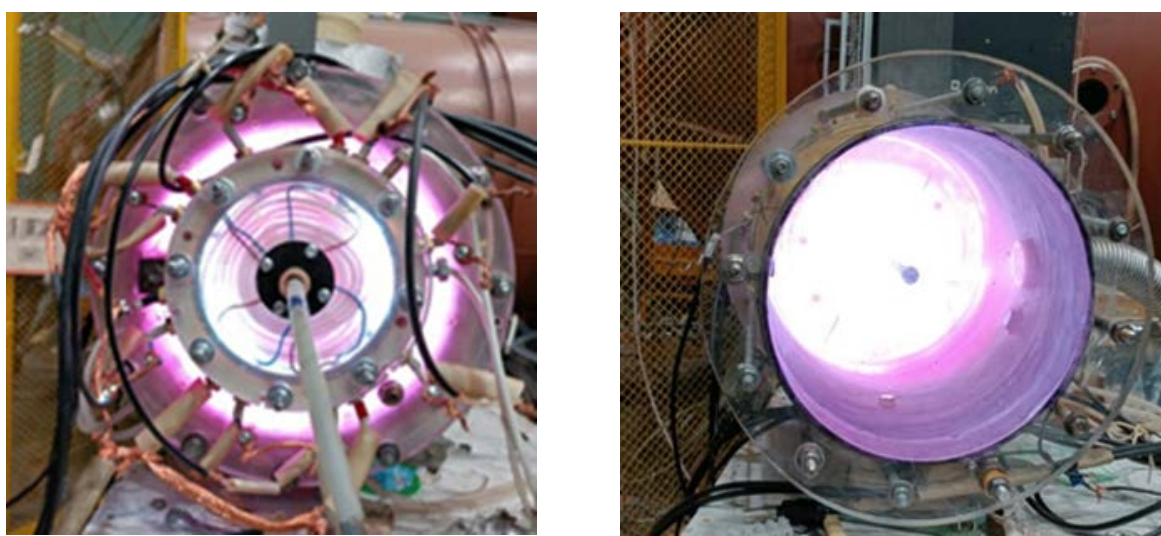


Рис. 2 Фотографии формирователя компактных торов

Раннее испытан и запатентован новый способ формирования компактного тора в индуктивных накопителях энергии [2]. Для увеличения массы выброса были опробованы взрывающиеся проволоки, что не практично. Сейчас испытывается ускорение плазмы от пробоя по поверхности диэлектрика покрытом тонким слоем йода с графитом. Такой состав может наноситься спреем с нужной дозировкой. Таким образом можно возбуждать FRC более простым способом, чем испытанный нами ранее способ генерации FRC в индуктивных накопителях энергии. Такой способ позволит перейти на частотный режим работы, что необходимо как для коллайдеров, так и для электроракетных двигателей [2].

Для измерения импульса использовался маятник с зеркалом, расположенный в центре камеры, по отклонению пятна от лазера можно было оценить импульс, который растет с увеличением прикладываемой энергетики и составил порядка несколько миллиньютонов при килоджоуле запасаемой энергии.

Для полета человека на Марс за пару месяцев для ЭРД нужны мегаватты и масса выброса в г/сек, что достижимо только с твердыми или жидкими веществами и составит более десятка тонн в месяц. Никаких газов. Это прямое использование бытовых отходов экипажей кораблей типа Starship. Энергетика может быть обеспечена только высокотемпературным ядерным реактором на несколько МВт, а для отвода тепла потребуется площадь в тысячу квадратных метров, что сравнимо с площадью того же Starship, рассеиваемая мощность $W = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot S \cdot T^4$ (Вт, м², град К), $S = 1500 \text{ м}^2$. Таким образом нужна будет связка из 2-3 кораблей, два с реакторами при температуре 300-500 градусов С° [3]. Это и должно объединить Россию, Китай и США.

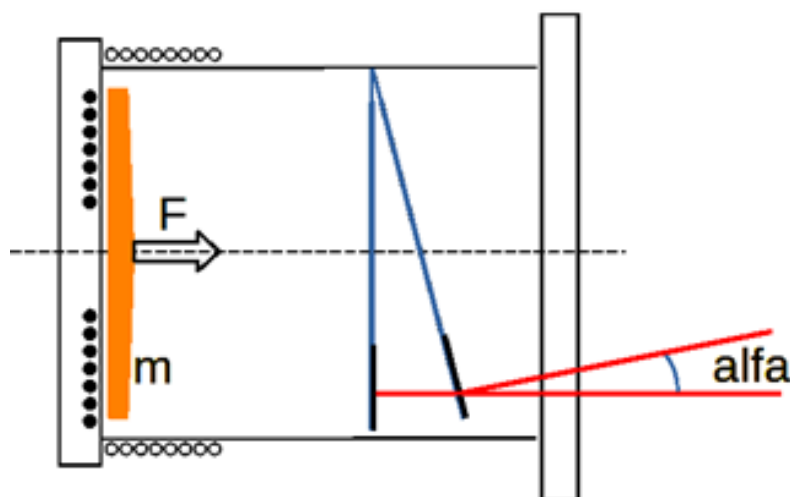


Рис. 2 Сдвиг точки на экране при повороте на угол $\alpha - \delta$; 4 см. Сдвиг зеркала при повороте на угол $\alpha - \chi = 1.3$ см. Измеренный импульс кольца – $6.5 \cdot 10^{-3}$ м*кг/сек. Оценка скорости плазмоида из предыдущих измерений – 40 км/сек. Масса плазмоида $1.6 \cdot 10^{-7}$ кг. Энергия 128 Дж

Литература

1. А.Г. Мозговой, Коллайдер компактных торов/ Харитоновские научные чтения г. Саров 2023 г., труды - стр. 124
2. А.Г. Мозговой, И.Н. Тиликин, Реакторы на природном уране с внешним источником быстрых нейтронов - это будущее энергетики и космонавтики, Сборник материалов XVII Международной конференции Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, 2025, стр. 244
4. Mozgovoy A.G. Fusion-Fission U 238 Small Module Reactor - The combined 25th IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conf. (PPPS) and the 52nd IEEE Conf. ICOPS, Berlin, 2025, <https://ieeexplore.ieee.org/document/11248131>

MEGAWATTS-CLASS ELECTRIC THRUSTER PROJECT

Ya.K. Bolotov., A.G. Mozgovoy*, A.A. Rodionov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

199991, Moscow, Leninsky prospect 53, Russia

** mozgovoja@lebedev.ru*

For a flight to Mars in just a few months, a ship weighing tens of tons requires electric rocket engines with a thrust of hundreds of newtons during continuous operation. The maximum engine thrust F can be estimated using a simple formula assuming that all the power goes toward the kinetic energy of the ejected mass m . Energy $W = m * V * V/2$, which is the engine power N per second. $F = m * V$ per second, or $F = 2 * N/V$ – thrust is inversely proportional to the mass ejection velocity V ; the ejection energy grows as the square of the velocity, and the impulse grows linearly. The optimal velocity is approximately 20-40 km/sec with a power consumption in the megawatt range. It has been proposed to use the acceleration of a compact torus – a FRC (Field Reversed Configuration) plasmoid with a closed current in a plasma of any composition and mass up to hundreds of milligrams per impulse.

Key words: electric rocket engine, thruster, magneto dynamic

УДК: 533.92, 544.43

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЭВОЛЮЦИЮ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

**А.Н. Бочаров, И.А. Моралев, И.В. Селивонин,
Е.А. Филимонова***

*Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2*

** helpfil@mail.ru*

Аннотация. Представлены экспериментально полученные электрические характеристики высокочастотного коронного разряда для разных концентраций пропана в воздухе. С помощью моделирования продемонстрировано влияние параметров разряда на эволюцию смеси в отдельном канале-филаменте.

Ключевые слова: высокочастотный коронный разряд, бедная пропано-воздушная смесь, эксперимент, моделирование, плазмохимическая кинетика

Введение

Следование стратегии низкотемпературного горения предполагает использование бедных смесей, которые помимо экономии топлива резко снижают вредные выбросы сажи и оксидов азота. Низкая воспламеняемость и скорость сгорания бедной смеси не позволяют использовать традиционные системы зажигания, что требует создания новых или усовершенствованных воспламенителей. Нарботка химически активных частиц и дополнительный нагрев при использовании плазмы высокочастотного коронного разряда, который представляет собой разветвленную сеть каналов-филаментов, позволяет создать многоочаговое воспламенение и сразу решить несколько возникающих проблем.

В данной работе экспериментально исследуются электрические характеристики высокочастотного (ВЧ) коронного разряда при различных концентрациях пропана в воздухе [1]. А также изучается влияние параметров разряда на эволюцию смеси в отдельном канале-филаменте с помощью моделирования.

Описание эксперимента

На рис.1 представлено изображение разрядной камеры в поперечном разрезе. На острый электрод в течение 1 мс подавалось переменное напряжение с амплитудой до 15 кВ и частотой 730 кГц. Напротив иглы на расстоянии 70 мм размещался экран, заземленный через измерительную емкость. Содержание пропана варьировалось от 0 до 2.1% объемных долей, что соответствовало диапазону коэффициента избытка топлива $\phi = 0-0.5$.

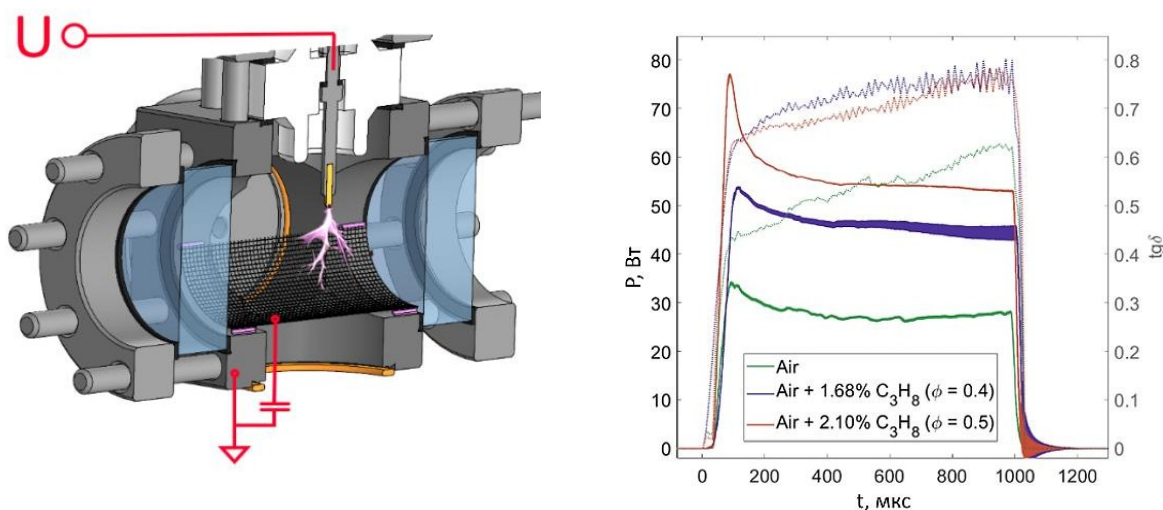


Рис. 1. Изображение разрядной камеры (слева) и динамика электрических характеристик разряда при различном содержании пропана в смеси (справа).

В рамках экспериментальной части работы было выявлено, что при добавлении пропана наблюдается значительное увеличение суммарной рассеиваемой в разряде мощности (сплошная ли-

ния) и тока разряда (рис. 1). Этот эффект связан с изменением морфологии разряда: при большей концентрации пропана разряд образует более разветвленную структуру, из-за чего суммарная длина разрядных филаментов оказывается больше. Следует отметить, что энергозатраты на единицу длины разрядной нити при этом остаются практически неизменными. Предположительно, эффект добавления пропана заключается в дополнительном энерговыделении внутри разрядного филамента, обусловленном реакциями окисления и конверсии.

Условия для моделирования

Для условий описанного выше эксперимента было проведено моделирование эволюции смеси для одного филамента с разным содержанием пропана в одномерной осесимметричной постановке. Результаты были получены при самосогласованном решении системы уравнений Навье-Стокса с учетом электроразрядного многоимпульсного воздействия с частотой 730 кГц. Полная схема химической кинетики, применяемая в расчете, состояла из «разрядной» части, в которой константа скорости реакций зависела от приведенного электрического поля, и части, отвечающей за конверсию, воспламенение и горение пропано-воздушной смеси с $\phi=0-1$ при давлении 1 бар и начальной температуре 300 К. Амплитуда тока разряда варьировалась в диапазоне $I=2-30$ мА. Начальный радиус филамента $r=100$ мкм и его длина $l=1$ см задавались. Расчеты проводились на основе модели разряда, представленной в работах [2,3]

Обсуждение результатов моделирования

На рис. 2 представлена температура в канале и мощность для разных значений тока и содержания пропана в смеси. Видно, что разброс мощности для фиксированного тока небольшой для разных значений ϕ . Величина мощности количественно согласуется с экспериментальными результатами. Чем больше топлива содержится в смеси, тем выше температура в канале, которая за-

висит не только от тока и концентрации пропана, но также от времени действия разряда, которое в расчетах варьировалось.

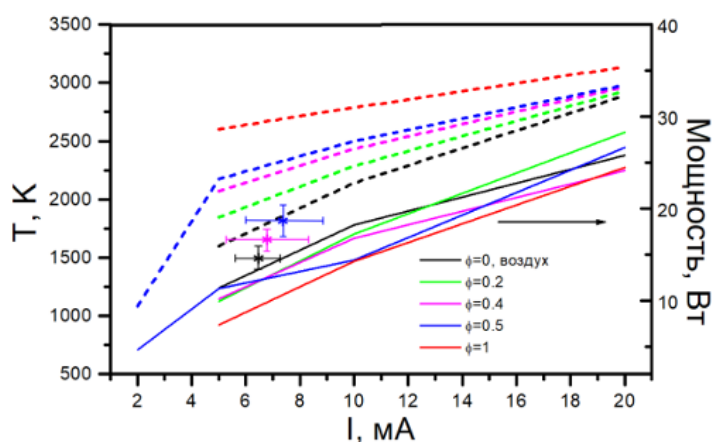


Рис. 2. Температура (пунктир) и мощность (сплошная линия) в зависимости от тока для разных ϕ . $\phi=1$ (4.03% C_3H_8), $\phi=0.5$ (2.05%), $\phi=0.4$ (1.65%), $\phi=0.2$ (0.84%). Точками обозначены экспериментально измеренные значения тока и мощности для некоторых ϕ .

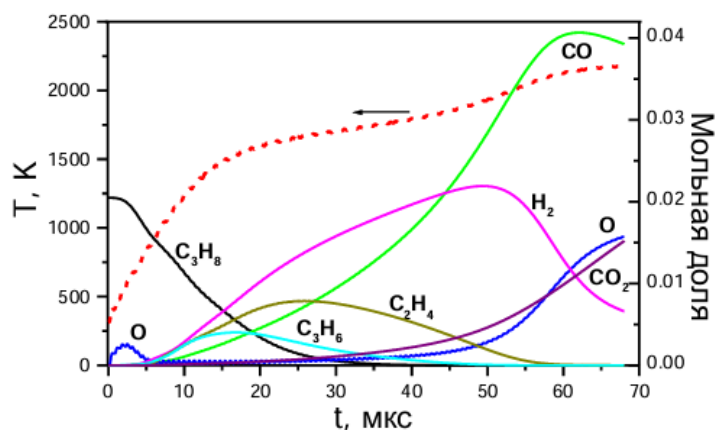


Рис.3. Эволюция температуры и мольных долей некоторых компонентов за время работы разряда. $I=5$ мА и $\phi=0.5$. Длительность работы разряда 68 мкс.

Эволюция температуры и мольных долей различных компонентов показаны на рис. 3. Атомы О нарабатываются в результате диссоциации электронным ударом в каждом импульсе, где поле меняется на протяжении одного периода длительностью 1.36 мкс,

максимальное приведенное электрическое поле $E/N \sim 100$ Тд. Далее атомы О быстро реагируют с пропаном, их концентрация падает, в результате конверсии пропана образуются промежуточные углеводороды, которые потом тоже сгорают в течение 60 мкс. Образующиеся компоненты СО и H_2 превращаются в CO_2 и H_2O . Поскольку разряд продолжает работать, идет дополнительный нагрев газа и наработка атомов О. Для данных значений тока и количества пропана рост атомов О происходит, в большей степени, за счет образования атомов О в электрическом поле в канале разряда, а не за счет роста температуры из-за сгорания сингаза ($CO+H_2$), т.к. смесь бедная.

На рис.4а показана зависимость температуры и мольной доли атомов О в зависимости от коэффициента избытка топлива. Видно, что в чистом воздухе в разы больше образуется атомов кислорода. При наличии пропана концентрация атомов О зависит только от величины тока и не зависит от ϕ . Поэтому расчеты концентрации атомов О, сделанные для воздуха, проецировать на топливные смеси надо с оговорками.

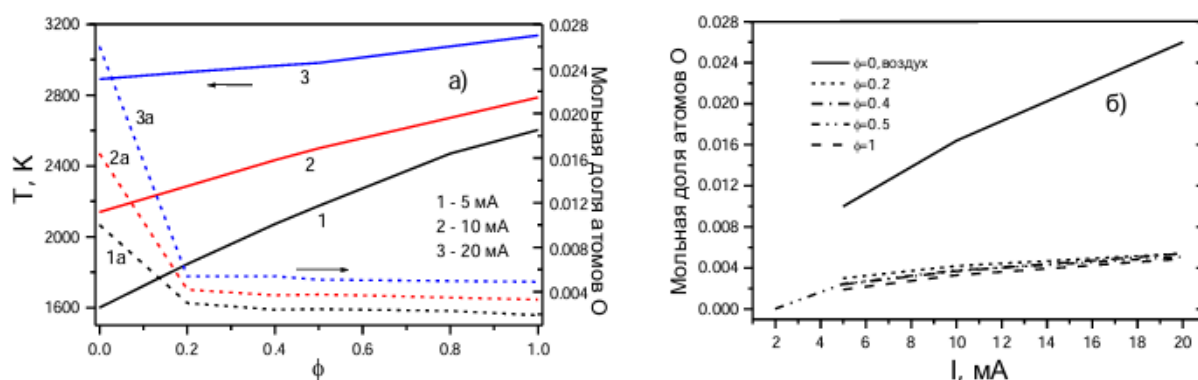


Рис.4. а) Температура (сплошные линии) и мольная доля атомов О (пунктир) в первом максимуме (см. рис.3) на временах ~ 5 мкс в зависимости от коэффициента избытка топлива для разных значений тока. б) Мольная доля атомов О в первом максимуме в зависимости от тока для разных значений ϕ .

О значительной разнице в наработке атомов О в воздухе и в топливной смеси свидетельствуют результаты, представленные на рис. 4б. Видно, что разброс значений атомов О между воздухом и топливными смесями доходит до 5 раз, в воздухе значительно больше атомов О. В топливных смесях нет зависимости от ϕ , и слабая зависимость от тока.

Литература

1. I. Selivonin, V. Galkin, and I. Moralev // Phys. Plasmas. 2026. V.33. 020702.
2. А.Н. Бочаров, Н.А. Попов, Е.А. Филимонова // Физика плазмы. 2025. Т. 51. № 8. С. 891-901.
3. A.N. Bocharov and E.A. Filimonova // Plasma Physics Reports. 2026. V. 52. No. 2. P. 217-223.

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY CORONA DISCHARGE PARAMETERS ON THE EVOLUTION OF A PROPANE-AIR MIXTURE

A.N. Bocharov, I.A. Moralev, I.V. Selivonin, E.A. Filimonova*

Joint Institute for High Temperatures of RAS, 125412 Russia, Moscow, Izhorskaya st., 13, bld.2

** helfil@mail.ru*

Experimentally obtained electrical characteristics of a high-frequency corona discharge for different propane concentrations in air are presented. Simulation demonstrates the influence of discharge parameters on the evolution of the mixture in a single filament channel.

Key words: high-frequency corona discharge, lean propane-air mixture, experiment, modeling, plasma-chemical kinetics

УДК 533.924:544.2

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Н.А. Булычев

*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.
nbulychev@mail.ru*

В данной работе при использовании плазмохимических процессов в жидкофазных средах получены наночастицы оксидов металлов, в том числе смешанных оксидов металлов и органо-неорганические наночастицы с контролируемыми свойствами, характеристики которых определяются сочетанием воздействия на жидкую среду импульсных или стационарных электрических разрядов и ультразвуковых колебаний в кавитационном режиме.

Ключевые слова: наночастицы, плазма, ультразвук, оксиды металлов.

Введение

Актуальность данной работы определяется тем, что, несмотря на высокую востребованность функциональных композиционных материалов, пути получения таких сложных композиционных систем, состоящих из полиметаллических наночастиц и наночастиц полиметаллооксидной керамики, а также полимеров различного состава и структуры, в настоящее время не разработаны. Таким образом, получение наночастиц смешанных оксидов металлов и биметаллических наночастиц с контролируемым (и переменным) составом, размером и формой имеет принципиаль-

ное значение, поскольку суспензии этих наночастиц будут использоваться в качестве основы для получения органико-неорганических гибридных дисперсных материалов, которые будут изучены и использованы для создания конструкционных и функциональных композиционных материалов. При этом критическими параметрами, определяющими возможность использования таких материалов, являются специфическая иерархическая структура полимерных слоев внутри гибридного материала и достаточно высокий уровень адгезии между органической и неорганической фазами, достигаемый за счет интенсивного ультразвукового воздействия на синтезируемый материал, т.е. наночастицы смешанных оксидов металлов и биметаллические наночастицы.

Результаты и обсуждение

Создание наноматериалов на основе смешанных оксидов металлов и биметаллических наночастиц при высокой локальной концентрации энергии в плазменном разряде с кавитацией позволяет использовать неравновесные условия для формирования сложных смешанных нанокристаллов.

В данном исследовании рассмотрены методы получения наночастиц смешанных оксидов металлов и биметаллических наночастиц в плазменном разряде (мощностью 100-400 Вт) под воздействием ультразвуковой кавитации ($0,5-3 \text{ Вт/см}^3$) в жидкофазных средах (вода, углеводороды, кислородсодержащие органические соединения и их смеси). Образцы наночастиц смешанных оксидов металлов были синтезированы в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации с использованием разрядных электродов из различных металлов: цинка, железа, меди, алюминия, кобальта, олова, хрома и других в различных сочетаниях, а также разрядных электродов из сплавов: латуни и бронзы, и таким образом были синтезированы наночастицы оксидов меди

и цинка, а также оксидов меди и олова.

Ультразвуковое воздействие на жидкофазную среду в режиме развитой кавитации изменяет в процессе плазмохимических реакций условия электрического пробоя между разрядными электродами в реакционной камере за счет того, что кавитационные пузырьки в электрическом поле способны выстраиваться в цепочки, таким образом изменяя среду с жидкофазной на парожидкостную, при этом сам разряд имеет падающую вольт-амперную характеристику, схожую с вольт-амперной характеристикой аномального тлеющего разряда в газе. Определены оптимальные параметры разряда (режим, ток, напряжение) и ультразвукового поля (частота, мощность). Типичными параметрами разряда при синтезе наночастиц являются следующие: напряжение постоянного тока 50-70 В, сила тока 4-5 А. Такие параметры выбраны, с одной стороны, исходя из необходимости обеспечить поддержание устойчивого разряда, а с другой стороны – создать воспроизводимые условия для синтеза твердофазных наночастиц.

Синтезированные образцы наночастиц были охарактеризованы методами физико-химического анализа. Получены данные о размере, химическом и фазовом составе наночастиц.

Синтезированные в плазменном разряде под действием ультразвука наночастицы оксидов металлов в виде водной суспензии были исследованы методом динамического рассеяния света и показано, что синтезированные частицы имеют пик распределения в области размеров 70-80 нм, при интенсивной ультразвуковой кавитации в процессе синтеза пик распределения смещается в область 50-60 нм. Измерение значений электрокинетического потенциала поверхности исходных наночастиц в водной дисперсионной среде позволило установить, что под воздействием ультразвука частицы смешанных оксидов металлов приобретают дополнительные активные центры адсорбции, способные к взаимодействию с функциональными группами полимерной матрицы.

Научная новизна подхода заключается в использовании оригинального сочетания полимерной оболочки с контролируемыми параметрами толщины и плотности с повышенным уровнем функциональных свойств и наноразмерных частиц наполнителя, активируемых при высокоинтенсивном ультразвуковом воздействии. Такое сочетание с вариациями как количественного и качественного состава и плотности полимерной оболочки, так и типа, состава и концентрации наночастиц наполнителя обеспечит возможности направленного варьирования свойств макроматериала и их точной настройки для обеспечения характеристики, оптимальные для каждого конкретного применения таких материалов.

Полученные в данной работе результаты по воздействию ультразвука на дисперсные системы открывают новые подходы к синтезу гибридных наночастиц с контролируемыми параметрами адсорбционного слоя и наполненных полимеров, что имеет большое практическое значение для получения новых полимерных композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, улучшения качества лакокрасочных материалов, паст и т. д. Открытие физико-химических закономерностей взаимодействия поверхности неорганических и органических микро- и наночастиц с высокомолекулярными соединениями различного строения в жидкофазных водных дисперсных системах под воздействием ультразвука позволит создать новые методы и подходы к получению композиционных материалов для различных приложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 26-13-00305

FABRICATION OF FUNCTIONAL NANO-SIZED PARTICLES BASED ON METAL OXIDES IN PLASMA DISCHARGE UNDER ULTRASONIC TREATMENT

N. A. Bulychev

*Moscow Aviation Institute (National Research University), 125993, Moscow,
Volokolamskoe shosse, 4, Russia
nbulychev@mail.ru*

In this study, metal oxide nanoparticles including mixed metal oxides and organic-inorganic nanoparticles with controlled properties were produced using plasma-chemical processes in liquid-phase media. The characteristics are determined by a combination of pulsed or steady-state electrical discharges and ultrasonic vibrations in cavitation mode.

Keywords: nanoparticles, plasma, ultrasound, metal oxides

АКТИВНЫЕ БРОУНОВСКИЕ МОТОРЫ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

М.М. Васильев*, Р.А. Сыроватка, Е.А. Кононов,
Р.В. Сеношенко, О.Ф. Петров

ОИВТ РАН

125412, Россия, Москва, Ижорская ул., 13 стр.2

**vasiliev@ihed.ras.ru*

Экспериментально изучалась динамика активных броуновских микрочастиц в плазме газовых разрядов низкого давления. В результате поглощения лазерного излучения поверхностью микрочастиц возникал механизм контролируемого активного броуновского движения и запасания энергии такими частицами. В результате чего такие частицы могут рассматриваться как активные броуновские моторы. При этом изменение интенсивности лазерного воздействия может приводить к формированию сложного движения таких активных броуновских моторов.

Ключевые слова: активные броуновские моторы, активная материя, коллоидная плазма.

В последние годы активное броуновское движение привлекает значительное внимание исследователей в области физики, биофизики и смежных научных дисциплин [1–5]. В отличие от классических броуновских частиц, находящихся в состоянии теплового равновесия с окружающей средой, активные броуновские частицы обладают способностью преобразовывать энергию внешних источников в кинетическую энергию собственного движения [7, 8]. Вследствие этого формируемые такими частицами структуры представляют собой неравновесные системы, находящиеся вдали от состояния термодинамического равновесия. Спо-

способность активных частиц к экспорту энтропии в окружающую среду обуславливает возникновение процессов самоорганизации и эволюционного усложнения формируемых структур.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование динамики отдельных активных броуновских частиц, малых кластеров, а также протяжённых структур, образованных взаимодействующими частицами. Эксперименты выполнялись в газоразрядной камере радиочастотного ёмкостного разряда низкого давления. Отличительной особенностью экспериментальной установки являлось использование «мягкой» ловушки, обеспечивающей возможность исследования квазисвободного движения активных броуновских частиц.

В результате поглощения лазерного излучения поверхностью микрочастиц реализовывался механизм контролируемого активного броуновского движения, обусловленный преобразованием энергии лазерного излучения в кинетическую энергию поступательного и вращательного движения частиц. Поглощённая энергия частично аккумулировалась в системе, что приводило к поддержанию неравновесного состояния частиц и возникновению сложной динамики. При этом характер движения определялся как параметрами внешнего лазерного воздействия, так и особенностями взаимодействия частиц с окружающей плазменной средой. Благодаря способности запасать энергию и эффективно преобразовывать внешнюю энергию в механическое движение такие микрочастицы могут быть интерпретированы как активные броуновские моторы, совместное действие которых демонстрирует сложную динамику и самоорганизацию в неравновесных диссипативных системах.

Установлено, что при поглощении лазерного излучения различной интенсивности взаимодействующие активные броуновские частицы формируют как малые кластеры, так и протяжённые упорядоченные структуры. При этом наблюдается широкий спектр динамических режимов — от хаотического броуновского

движения до направленного коллективного движения, включая вихревые режимы [9–12]. Одновременно с изменением характера динамики происходит усложнение пространственной организации системы.

Анализ экспериментальных данных осуществлялся путём определения координат каждой частицы на последовательности видеокадров с последующим восстановлением траекторий их движения. На основе полученных данных были исследованы зависимости кинетической энергии частиц от интенсивности лазерного излучения, временные зависимости среднеквадратичного смещения, а также характеристики протяжённых систем сильно взаимодействующих частиц, включая длину персистенции и структурный фактор [13].

Исследования выполнены за счет проекта Российского научного фонда (№25-12-00406).

Литература

1. Ebbens S. J., Howse J. R. “In pursuit of propulsion at the nanoscale”, *Soft Matter* 6 726–738 (2010).
2. Clemens Bechinger, Roberto Di Leonardo, Hartmut Löwen, Charles Reichhardt, Giorgio Volpe, Giovanni Volpe, “Active particles in complex and crowded environments”, *Reviews of Modern Physics* 88 (2016).
3. Selmeçci et al. D. *The European Physical Journal Special Topics* 157 1-15 (2008).
4. Komin N., Erdman U., Schimansky-Geier L., “Random walk theory applied to daphnia motion”, *Fluctuation and Noise Letters*, 4, L151–L159 (2004).
5. Berg H. C., “E. coli in motion”, *Springer Science & Business Media* (2008).
6. Cates M.E., “Diffusive transport without detailed balance in motile bacteria: does microbiology need statistical physics?”, *Rep. Prog. Phys* 75 042601 (2012).
7. Rustem F. Ismagilov Dr., Alexander Schwartz Dr., Ned Bowden, George M. Whitesides, “Autonomous Movement and Self-Assembly”, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl* 41 652-654 (2002).
8. Walter F. Paxton, Kevin C. Kistler, Christine C. Olmeda, Ayusman Sen, Sa-

- rah K. St. Angelo, Yanyan Cao, Thomas E. Mallouk, Paul E. Lammert, Vincent H. Crespi, “Catalytic Nanomotors: Autonomous Movement of Striped Nanorods”, *J. Am. Chem. Soc* 126 13424–13431 (2004).
9. M.M. Vasiliev, E.A. Kononov, Arkar Kyaw, O.F. Petrov, “Dynamics of motion of particles with a modified surface in a dusty plasma monolayer”, *Journal of Physics: Conference Series* 1556 012074 (2020).
 10. Arkar K. *Journal of Physics: Conference Series* 147 012113 (2019).
 11. Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Kononov E.A., Trukhachev, F.M., “Dynamics of Active Brownian Particles in Plasma”, *Molecules*, V. 26, p. 561 (2021).
 12. M. M. Vasiliev, A. A. Alekseevskaya, K. G. Koss, E. V. Vasilieva, O. F. Petrov, “Self-Organization of Clusters of Active Brownian Particles in a Colloidal Plasma under the Action of Laser Radiation”, *High temperature* 61 6 759-763 (2023).
 13. O.F. Petrov, K.B. Statsenko, M.M. Vasiliev. “Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma”, *Scientific Reports* 12(1) 8618, 2022.

ACTIVE BROWNIAN MOTORS IN GAS DISCHARGE PLASMA

**Vasiliev M.M.*, Syrovatka R.A., Kononov E.A., Senoshenko R.V.,
O.F. Petrov**

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
125412, Moscow, Izhorskaya 13 Bldg 2, Russia*

* vasiliev@ihed.ras.ru

The dynamics of active Brownian microparticles in low-pressure gas discharge plasma was experimentally studied. The absorption of laser radiation by the microparticle surface resulted in energy storage and in mechanism of controlled active Brownian motion of these particles. As a result, such kind of particles can be considered as an active Brownian motors. Furthermore, varying the laser intensity can lead to the formation of controlled complex motion in these active Brownian motors.

Key words: active Brownian motors, active matter, colloidal plasma.

РАСЧЕТЫ АТОМНЫХ ДАННЫХ О НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССАХ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ ЦИРКОНИЯ С ВОДОРОДОМ

В.А. Васильева*, С.А. Яковлева

*Российский государственный педагогический университет
им. А.И. Герцена, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д.48
e-mail: veravasilieva2000@gmail.com*

Аннотация. Исследованы неупругие процессы, происходящие при низкоэнергетических столкновениях $Zr II + H$. Электронная структура рассчитана с использованием асимптотической модели. Исследование ядерной динамики проведено в рамках многоканальной модели Ландау-Зинера в диапазоне энергий столкновений от 0,001 до 100 эВ. Константы скоростей рассчитаны для диапазона температур от 1000 до 10000 К. Определены наибольшие значения констант скоростей, соответствующие процессам нейтрализации. Полученные данные необходимы для астрофизических исследований при моделировании фотосфер звезд с учетом отклонения от локального термодинамического равновесия.

Ключевые слова: атомные данные, цирконий, водород, неадиабатические переходы, неупругие процессы

Введение

Точное определение распространенности циркония в атмосферах звезд является важной задачей астрофизики, поскольку цирконий относится к элементам s-процесса и служит индикатором нуклеосинтеза в звездах асимптотической ветви гигантов. В работе [1] показано, что учет отклонений от локального термодинамического равновесия при моделировании линий $Zr I$ и $Zr II$ приводит к существенным поправкам к определяемым распространенностям. При этом в исследовании указано, что данные о неупругих столкновениях с водородом были рассчитаны при по-

мощи формулы Дравина с эмпирически подбираемым параметром, которая, как установлено, не дает физически корректных результатов [2]. В настоящей работе представлен результат расчета сечений и констант скоростей неупругих процессов в системе Zr II+H, выполненный в рамках модельного подхода.

Теоретическая часть

Неупругие процессы, происходящие при столкновениях иона циркония с водородом, исследованы в рамках подхода Борна-Оппенгеймера. Электронная задача решена асимптотическим подходом [3,4], который позволяет смоделировать диабатические и адиабатические потенциальные энергии с учетом областей неадиабатичности, образованных за счет ионно-ковалентного взаимодействия. При этом рассматриваются только неадиабатические переходы между состояниями одной молекулярной симметрии. В исследовании неадиабатической ядерной динамики использована многоканальная модель Ландау-Зинера. В результате получены вероятности $P_{if}(J, E)$ из заданного начального молекулярного состояния i в выделенное конечное молекулярное состояние f для различных энергий столкновений E и квантовых чисел полного углового момента J . Для экзотермических процессов ($i > f$) сечения рассчитывались как сумма по квантовому числу полного углового момента:

$$\sigma_{if}(E) = \frac{\pi \hbar^2 p_i^{stat}}{2\mu E} \sum_{J=0}^{J_{max}} P_{if}(J, E)(2J + 1), \quad (1)$$

где μ – приведенная масса ядер, а p_i^{stat} – статистическая заселенность начального молекулярного состояния i . Константы скоростей неупругих процессов рассчитаны при усреднении сечений по распределению Максвелла:

$$K_{if}(T) = \left(\frac{8}{\pi \mu (k_B T)^3} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \sigma_{if}(E) \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) E dE, \quad (2)$$

где k_B – постоянная Больцмана.

Сечения и константы для эндотермических процессов ($k < j$) можно определить по уравнениям баланса:

$$\sigma_{kj}(E) = \sigma_{jk}(E + \Delta E_{kj}) \frac{p_k^{stat}}{p_j^{stat}} \exp\left(\frac{\Delta E_{kj}}{k_B T}\right), \quad (3)$$

$$K_{kj}(T) = K_{jk}(T) \frac{p_k^{stat}}{p_j^{stat}} \exp\left(\frac{\Delta E_{kj}}{k_B T}\right), \quad (4)$$

где ΔE_{kj} – разность значений асимптотических энергий каналов k и j .

Результаты

В рамках асимптотического подхода моделирование электронной структуры квазимолекулы ZrH^+ выполнено для двух ионных каналов: $Zr^{2+}(4d^2 \ ^3F) + H^-(1s^2 \ ^1S)$ (молекулярные симметрии $^3\Sigma^-$, $^3\Pi$, $^3\Delta$, $^3\Phi$) и $Zr^{2+}(4d^2 \ ^1D) + H^-(1s^2 \ ^1S)$ (молекулярные симметрии $^1\Sigma^+$, $^1\Pi$, $^1\Delta$). Первый ионный терм связан матричными элементами неадиабатической связи с триплетными молекулярными состояниями 55 каналов рассеяния $Zr^+(4d^2 nl \ ^{2,4}L) + H(1s \ ^2S)$, а второй – с синглетными молекулярными состояниями 39 каналов рассеяния $Zr^+(4d^2 nl \ ^{2,4}L) + H(1s \ ^2S)$. При этом, в рассмотрение были включены состояния, которые связаны с ионным как одноэлектронным, так и двухэлектронным переходом. Данные о рассматриваемых состояниях взяты из базы данных NIST [5], асимптотические значения энергий всех выбранных состояний усреднены по квантовому числу полного углового момента J .

В результате исследования рассчитаны характеристики неупругих процессов для переходов между 96 каналами рассеяния столкновительной системы ZrH^+ . В рассмотрение включены два ионных терма, каждый из которых связан со своим набором ковалентных термов. Для каждого из наборов каналов рассеяния исследования ядерной динамики проводились внутри каждой молекулярной симметрии отдельно, а итоговые данные о характеристиках неупругих процессов получены при суммировании по

всем симметриям. Рассчитаны сечения для 4640 неупругих процессов в диапазоне энергий столкновения от 0,001 до 100 эВ и константы скоростей для температур от 1000 до 10000 К.

Наибольшие значения констант скоростей при $T = 6000$ К соответствуют некоторым процессам нейтрализации, их значения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значение констант скоростей для процессов нейтрализации.

Входной канал Выходной канал		$Zr^{2+}(4d^2\ ^3F) + H^-$	$Zr^{2+}(4d^2\ ^1D) + H^-$
		Константа скорости, $см^3 \cdot с^{-1}$	
1	$Zr^+(4d^2(^3F)6s\ ^2F) + H$	$8,24 \times 10^{-9}$	—
2	$Zr^+(4d^2(^1D)6s\ ^2D) + H$	$7,74 \times 10^{-9}$	$6,05 \times 10^{-9}$
3	$Zr^+(4d^2(^1G)6s\ ^2G) + H$	$1,39 \times 10^{-8}$	1.46×10^{-8}
4	$Zr^+(4d^2(^3F)5d\ ^2F) + H$	$2,17 \times 10^{-8}$	$1,73 \times 10^{-8}$
5	$Zr^+(4d^2(^3F)5d\ ^4F) + H$	$2,43 \times 10^{-8}$	—
6	$Zr^+(4d^2(^1G)5d\ ^2I) + H$	$2,07 \times 10^{-8}$	$3,18 \times 10^{-8}$
7	$Zr^+(4d^2(^1G)5d\ ^2H) + H$	$2,59 \times 10^{-8}$	$2,88 \times 10^{-8}$
8	$Zr^+(4d^2(^3F)5d\ ^4H) + H$	$2,64 \times 10^{-8}$	—
9	$Zr^+(4d^2(^1G)5d\ ^2G) + H$	$2,31 \times 10^{-8}$	$4,24 \times 10^{-8}$
10	$Zr^+(4d^2(^3F)5d\ ^2H) + H$	$1,52 \times 10^{-8}$	—
11	$Zr^+(4d^2(^3F)5d\ ^2G) + H$	—	$3,46 \times 10^{-8}$

Полученные данные представляют интерес для астрофизического моделирования звездных атмосфер.

Работа поддержана внутренним грантом РГПУ им. А. И. Герцена (проект №46-ВГ)

Литература

1. Velichko A. B., Mashonkina L. I., Nilsson H. Formation of Zr I and II lines under non-LTE conditions of stellar atmospheres //Astronomy Letters. 2010. T. 36. №. 9. C. 664-679.
2. Barklem P. S., Belyaev A. K., Guitou M., Feautrier N., Gadéa F. X., Spiel-fiedel A. On inelastic hydrogen atom collisions in stellar atmospheres //Astronomy & Astrophysics. 2011. T. 530. C. A94.
3. Belyaev A. K. Model approach for low-energy inelastic atomic collisions and application to $\text{Al}^+ \text{H}$ and $\text{Al}^{++} \text{H}^-$ //Physical Review A—Atomic, Mo-lecular, and Optical Physics. 2013. T. 88. №. 5. C. 052704.
4. Belyaev A. K. Inelastic aluminium-hydrogen collision data for non-LTE applications in stellar atmospheres //Astronomy & Astrophysics. 2013. T. 560. C. A60.
5. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2026, April 21]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

CALCULATIONS OF ATOMIC DATA ON INELASTIC PROCESSES IN COLLISIONS OF ZIRCONIUM IONS AND HYDROGEN

V.A. Vasil'eva*, S.A. Yakovleva

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moika Emb., Saint Petersburg, 191186

** veravasylieva2000@gmail.com*

Inelastic processes in low-energy $\text{Zr II} + \text{H}$ collisions are investigated. The electronic structure is calculated using the asymptotic model. The nuclear dynamics is studied with the multichannel Landau-Zener model for the collision energy range from 0.001 to 100 eV. Rate coefficients are calculated for the temperature range from 1000 to 10000 K. The largest values of rate coefficients correspond to neutralization processes. The obtained data are required for astrophysical applications in non-local thermodynamic equilibrium modeling of stellar atmospheres.

Key words: atomic data, zirconium, hydrogen, non-adiabatic transitions, inelastic processes

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА И УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ РАЗЛОЖЕНИИ КЕРОСИНА

А.С. Владимиров*, Б. А. Тимеркаев, Г. Р. Фархутдинова,
А.Н. Галиев¹

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, РОССИЯ*

** alexvlad2000@mail.ru*

Представлены результаты плазмохимического разложения керосина с целью получения водорода и углеродных наноструктур. Электрическая дуга зажигалась между графитовыми электродами, погруженными в керосин. В результате эксперимента были получены газообразные фракции и твердые отложения на электродах. Газообразные фракции состояли из водорода, этилена и метана. Твердые фракции представляли собой наноалмазы и нанотрубки.

Ключевые слова: плазмохимия, электродуговой разряд, жидкие углеводороды, керосин, водород, наноалмазы, углеродные нанотрубки.

Введение

Получение водорода и углеродных наноматериалов из жидких углеводородов в одном цикле перспективно для энергетики и производства функциональных материалов. Классические методы требуют высокого давления, катализаторов и многостадийной очистки. Развивается подход с зажиганием электрической дуги непосредственно в жидкости, позволяющий одновременно проводить крекинг углеводородов с выделением водорода и осаждение углеродных структур. Цель работы – исследование электродугового разложения керосина, анализ состава газа и морфологическая идентификация твёрдого осадка.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на лабораторной установке, в которой электрическая дуга зажигалась в объёме технического керосина. В качестве электродов использовались стержни из электрографита диаметром 8 мм. В процессе эксперимента на поверхности анода формировался плотный чёрный нарос. Для удаления не прореагировавших углеводородов и аморфного углерода образец многократно промывали бензином-калоша, после чего высушивали в сушильном шкафу при температуре 250 °С в течение 20 минут. Газовую фазу отбирали из верхней части реактора и анализировали методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл 4000М» (производитель «Метахром»). Морфологию твёрдых продуктов изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), идентификацию фазы проводили визуально по микрофотографиям, оценивая размер, форму и характер поверхности частиц.

Результаты и обсуждение

Хроматографический анализ газовой смеси показал следующий состав (об. %): водород – 45; этилен – 36; Оставшаяся часть приходится на следовые количества высших углеводородов. Высокое содержание водорода в составе газообразных продуктов разложения углеводородов обеспечивается за счет бомбардировок углеводородных молекул разогретыми электронами и ионами, а также интенсивным термическим распадом молекул керосина в канале дуги. Полученные данные согласуются с литературными данными по плазменному риформингу жидких углеводородов.

Твёрдый продукт, накопленный на катоде, после промывки и сушки представлял собой микронные агломераты чёрного цвета. При исследовании на СЭМ на поверхности отложений были выявлены два типа наноструктур. Первый тип – частицы с выраженной огранкой и многогранной формой, характерной для алмаза (рис. 1). Диаметр данных частиц составляет 50–80 нм. Второй

тип – волокнистые структуры цилиндрической формы, идентифицированные как углеродные нанотрубки (рис. 2). Диаметр нанотрубок составляет 40–50 нм. На рис. 2 также видны нанотрубки в окружении наноразмерных алмазных частиц.

Визуальный анализ СЭМ-изображений выявил преобладание изометричных кристаллитов с гладкими гранями, идентифицированных как наноалмазы. Их формирование обусловлено быстрой конденсацией углеродных кластеров при охлаждении плазмы керосином, а атомарный водород стабилизирует sp^3 -структуру, подавляя графитизацию поверхности. Одновременное образование углеродных нанотрубок свидетельствует о наличии в плазме условий для формирования как sp^3 -гибридизованных (алмаз), так и sp^2 -гибридизованных (графит, нанотрубки) углеродных структур [1-2]. Вероятно, нанотрубки образуются в зонах с более низкой температурой и меньшей концентрацией атомарного водорода, где графитизация становится энергетически выгодной.

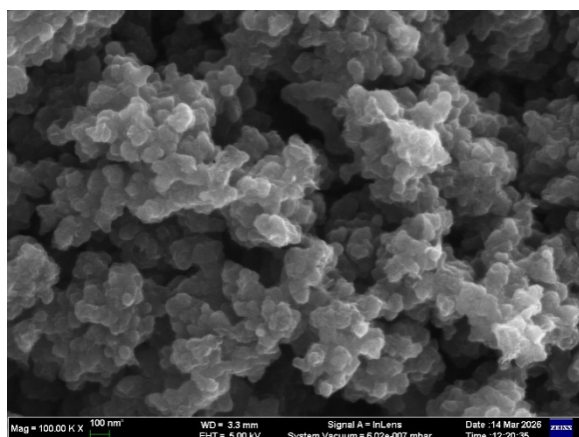


Рис.1. Скопление наноалмазов, отобранных с графитового катода. Размеры наноалмазов определяются продолжительностью разряда и оказываются порядка 50 нм.

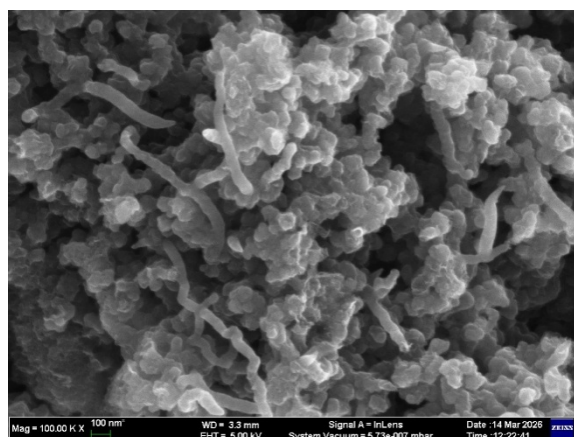


Рис.2. Трубоччатые нано образования диаметром порядка 50 нм. Они отличаются от традиционных углеродных нанотрубок. Видимо, это связано с условиями их формирования в среде с пониженными температурами.

Процесс протекает без использования катализаторов и не требует откачных устройств. Также не требуется использование инертных газов. Все эти факторы значительно упрощают конструкцию реактора и снижают эксплуатационные затраты. При заданных параметрах разряда удельные энергозатраты остаются в пределах, сопоставимых с лабораторными аналогами плазменного синтеза углеродных наноматериалов [3].

Заключение

В ходе работы экспериментально подтверждена возможность одностадийного получения водорода и углеродных наноматериалов при электродуговом разложении керосина. Полученная газовая фаза содержит до 45 % водорода, а на поверхности анода формируются наноразмерные алмазные частицы (50 нм) и углеродные нанотрубки (40–50 нм), идентифицированные по данным СЭМ. Метод не требует катализаторов, работает при атмосферном давлении и использует доступное сырьё, что делает его перспективным для создания компактных установок по переработке жидких углеводородов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния геометрии электродов и времени выдержки дуги на соотношение наноалмазов и нанотрубок в конечном продукте.

Литература

1. Ismail A. F., Iqbal M. Z., Ihsanullah I. et al. The Structural Characteristics of Carbon Nanoparticles Produced by Arc Discharge in Liquid // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2020. Vol. 20, No. 9. P. 5678–5685.
2. Liu Y., Wang L. Hydrogen production from liquid hydrocarbons via plasma reforming: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, No. 28. P. 14235–14250. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.085
3. Miotk R., Czyłkowski D., Hrycak B. et al. Atmospheric pressure microwave (915 MHz) plasma for hydrogen production from steam reforming of ethanol // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 14789. DOI: 10.1038/s41598-024-65874-9

PLASMA-CHEMICAL PRODUCTION OF HYDROGEN AND CARBON NANOMATERIALS BY ELECTRO-ARC DECOMPOSITION OF KEROSENE

A. S. Vladimirov*, B. A. Timerkaev

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, RUSSIA*

** alexvlad2000@mail.ru*

The results of plasma-chemical decomposition of kerosene for the production of hydrogen and carbon nanostructures are presented. An electric arc was initiated between graphite electrodes immersed in kerosene. As a result of the experiment, gaseous fractions and solid deposits on the electrodes were obtained. The gaseous fraction consisted of hydrogen, ethylene, and methane. The solid fraction consisted of nanodiamonds and carbon nanotubes.

Key words: plasma chemistry, electric arc discharge, liquid hydrocarbons, kerosene, hydrogen, nanodiamonds, carbon nanotubes.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН КОНСТАНТ СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМНОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КАТИОНОВ И АНИОНОВ В РАМКАХ УПРОЩЁННОЙ МОДЕЛИ

Я.В. Воронов*, С.А. Яковлева, А.К. Беляев

*Российский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена, 191186, Россия, Санкт-Петербург, наб. Мойки, 48*

**voron.yar42@gmail.com*

В работе рассматривается применение упрощённой модели для оценки величин констант скорости процессов взаимной нейтрализации, происходящих при столкновениях различных катионов с различными анионами. Приводятся новые теоретические оценки относительных заселённостей атомных состояний кальция Ca^* после столкновений $\text{Ca}^+ + \text{D}^-/\text{O}^-/\text{S}^- \rightarrow \text{Ca}^* + \text{D}/\text{O}/\text{S}$. Также приводится оценка величин констант скорости процессов взаимной нейтрализации для температуры $T = 1000 \text{ K}$ тех процессов, которые попадают в оптимальное окно упрощённой модели.

Ключевые слова: неупругие столкновения, неупругие процессы, константы скорости, взаимная нейтрализация, катионы, анионы

Введение

Для физически корректного моделирования газовых и плазменных сред необходимо знание о константах скорости неупругих столкновительных процессов возбуждения, девозбуждения, перезарядки. При этом на сегодняшний день для относительно низких температур (меньше $\sim 10000 \text{ K}$) теоретические расчёты являются практически единственным источником данных о константах скорости. Эти температуры соответствуют диапазону энергий столкновения примерно от 10^{-3} эВ до 10 эВ . За последние

два десятилетия экспериментальные исследования неупругих столкновений ионов друг с другом для энергий столкновения порядка 10^{-2} - 10^{-1} эВ получили большое развитие благодаря созданию установок DESIREE (например, [4]) и merged-beam apparatus (например, [5]), что позволяет провести критический анализ современных теоретических методов исследования низкоэнергетических столкновений атомов и ионов.

Количество процессов, которые необходимо учесть при моделировании газовых и плазменных сред, может исчисляться тысячами и десятками тысяч. Расчёты констант скорости для такого количества процессов наиболее точными методами из первых принципов на текущий момент невозможны в силу больших вычислительных трудностей, поэтому критически важно иметь физически обоснованные и надёжные модельные методы, в рамках которых можно получать надёжные оценки величин констант скорости. Одной из таких моделей является упрощённая модель, изначально предложенная для оценки величин констант скорости неупругих процессов, происходящих при столкновениях различных атомов и ионов с водородом [6, 7].

Сравнительно недавно были проведены экспериментальные исследования столкновений катионов кислорода O^+ с анионами P^- , D^- , C^- , Si^- , O^- , S^- [5, 8, 9] при энергиях порядка 10^{-2} эВ. Полученные экспериментально результаты относительных заселённостей возбуждённых состояний кислорода после рассеяния хорошо воспроизводятся в рамках упрощённой модели, как было показано в работе [10]. Также предсказания упрощённой модели подтверждались и в рамках теоретических квантовых расчётов из первых принципов (см., например, [1]) и квантовых модельных расчётов (см., например, [3, 11]). Это говорит о физической корректности упрощённой модели и надёжности получаемых с её помощью результатов. Достоинством упрощённой модели является и то, что она позволяет получить оценки не только относи-

тельных заселённостей состояний нейтрализованного катиона после рассеяния, но и абсолютных значений констант скорости.

Оценки констант скорости процессов взаимной нейтрализации $\text{Ca}^+ + \text{D}^-/\text{O}^-/\text{S}^- \rightarrow \text{Ca}^* + \text{D/O/S}$

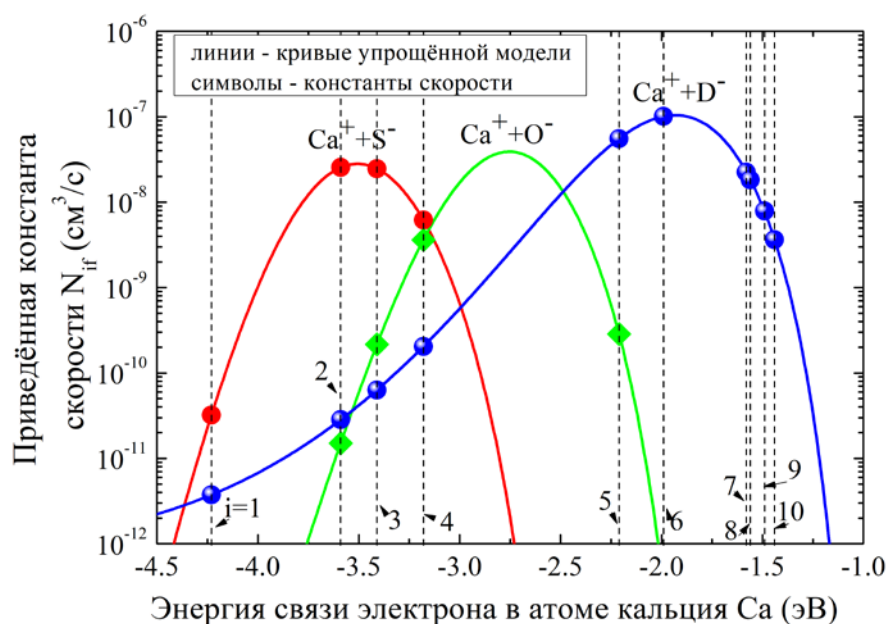


Рисунок 1. Зависимость приведённой константы скорости процессов взаимной нейтрализации от энергии связи электрона в атоме кальция для температуры $T = 1000 \text{ K}$.

Сплошные линии соответствуют непрерывной кривой упрощённой модели, символы – конкретным величинам констант скорости для процессов нейтрализации $\text{Ca}^+ + \text{D}^-/\text{O}^-/\text{S}^-$ в конечные каналы реакции $\text{Ca}^* + \text{D/O/S}$, пунктирные линии – энергиям связи электрона для конкретного состояния атома кальция. Красный цвет относится к столкновениям $\text{Ca}^+ + \text{S}^-$, зелёный – к столкновениям $\text{Ca}^+ + \text{O}^-$, синий – к столкновениям $\text{Ca}^+ + \text{D}^-$.

Обозначения молекулярных состояний квазимолекулы CaX ($X = \text{D/O/S}$) приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Молекулярные состояния квазимолекул CaX , где $X = \text{D/O/S}$, каналы рассеяния, энергия связи электрона E_{bind} в нейтральном атоме кальция, величины приведённых констант скорости нейтрализации $\text{Ca}^+ + \text{D}^-/\text{O}^-/\text{S}^- \rightarrow \text{Ca}^* + \text{D/O/S}$ в соответствующие каналы рассеяния и относительные заселённости каналов рассеяния.

№	Канал рассеяния $\text{Ca}(4snl \text{ } ^{2S+1}L) + X$, где $X = \text{D/O/S}$	E_{bind} в атоме Ca, эВ	Приведённая константа скорости, $\text{см}^3/\text{с}$			Относительные заселённости каналов рассеяния, %		
			$\text{Ca}^+ + \text{D}^-$	$\text{Ca}^+ + \text{O}^-$	$\text{Ca}^+ + \text{S}^-$	$\text{Ca}^+ + \text{D}^-$	$\text{Ca}^+ + \text{O}^-$	$\text{Ca}^+ + \text{S}^-$
1	$\text{Ca}(4s4p \text{ } ^3P^o) + X$	-4.23	--	--	--	--	--	--
2	$\text{Ca}(3d4s \text{ } ^3D) + X$	-3.59	--	--	2.55[-8]	--	--	45
3	$\text{Ca}(3d4s \text{ } ^1D) + X$	-3.41	--	2.16[-10]	2.47[-8]	--	5	44
4	$\text{Ca}(4s4p \text{ } ^1P^o) + X$	-3.18	--	3.63[-9]	6.19[-9]	--	88	11
5	$\text{Ca}(4s5s \text{ } ^3S) + X$	-2.21	5.55[-8]	2.86[-10]	--	26	7	--
6	$\text{Ca}(4s5s \text{ } ^1S) + X$	-1.99	1.01[-7]	--	--	48	--	--
7	$\text{Ca}(4s5p \text{ } ^3P^o) + X$	-1.58	2.25[-8]	--	--	11	--	--
8	$\text{Ca}(4s5p \text{ } ^1P^o) + X$	-1.56	1.83[-8]	--	--	9	--	--
9	$\text{Ca}(4s4d \text{ } ^1D) + X$	-1.49	7.89[-9]	--	--	4	--	--
10	$\text{Ca}(4s4d \text{ } ^3D) + X$	-1.44	3.63[-9]	--	--	2	--	--

В данной работе в рамках упрощённой модели получены теоретические оценки констант скорости неупругих процессов взаимной нейтрализации, происходящих при столкновениях катионов кальция с анионами дейтерия, кислорода и серы. Данные анионы выбраны по причине того, что ранее было проведено экспериментальное исследование столкновений катионов кислорода с этими анионами, следовательно, возможна экспериментальная проверка предсказаний упрощённой модели для столкновений катионов кальция с этими анионами. Полученные оценки абсолютных величин приведённых констант скорости (то есть кон-

стант скорости для статистической населённости входного канала $p_i^{\text{stat}} = 1.0$, подробнее см. в [10]), а также оценки относительных населённостей атомных состояний кальция после нейтрализации приведены в Таблице 1. На Рисунке 1 представлены приведённые константы скорости в зависимости от энергии связи электрона в атоме кальция. Видно, что в рамках предсказаний упрощённой модели при столкновениях кальция с разными партнёрами столкновения различными состояниями атома кальция будут иметь наибольшую заселённость, а соответствующие процессы взаимной нейтрализации будут характеризоваться наибольшими величинами констант скорости. Экспериментальная проверка позволит подтвердить предсказания упрощённой модели

Работа поддержана внутренним грантом РГПУ им. А. И. Герцена (№ 46-ВГ).

Литература

1. Belyaev A. K. et al. Quantum study of inelastic processes in low-energy calcium–hydrogen collisions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Т. 490. № 3. С. 3384-3391.
2. Belyaev A. K., Yakovleva S. A., Barklem P. S. Inelastic silicon-hydrogen collision data for non-LTE applications in stellar atmospheres // *Astronomy & Astrophysics*. 2014. Т. 572. С. A103.
3. Bergemann M. et al. Solar oxygen abundance // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Т. 508. № 2. С. 2236-2253.
4. Thomas R. D. et al. DESIREE: a unique cryogenic electrostatic storage ring for merged ion-beams studies // *Journal of Physics: Conference Series*. 2011. Т. 300. № 1. С. 012011.
5. Urbain X. et al. Merged beam studies of mutual neutralization at subthermal collision energies // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. Т. 1412. №. 6. С. 062009.
6. Belyaev A. K., Yakovleva S. A. Estimating inelastic heavy-particle–hydrogen collision data-I. Simplified model and application to potassium-hydrogen collisions // *Astronomy & Astrophysics*. 2017. Т. 606. С. A147.
7. Belyaev A. K., Yakovleva S. A. Estimating inelastic heavy-particle–hydrogen collision data-II. Simplified model for ionic collisions and application

to barium-hydrogen ionic collisions // *Astronomy & Astrophysics*. 2017. T. 608. C. A33.

8. Poline M. et al. Mutual neutralisation of O^+ with O^- : investigation of the role of metastable ions in a combined experimental and theoretical study // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2021. T. 23. № 43. C. 24607-24616.

9. De Ruette N. et al. Mutual neutralization of O^- with O^+ and N^+ at sub-thermal collision energies // *Physical Review Letters*. 2018. T. 121. № 8. C. 083401.

10. Voronov Ya. V., Yakovleva S. A., Belyaev A. K. Extension of the simplified model and its application to mutual neutralization processes in collisions with oxygen cations // *Physical Review A*. 2025. T. 112. № 6. C. 062803.

11. Belyaev A. K. et al. Atomic Data on Inelastic Processes in Calcium–Hydrogen Collisions // *The Astrophysical Journal*. 2017. T. 851. № 1. C. 59.

ESTIMATION OF THE RATE COEFFICIENTS VALUES FOR MUTUAL NEUTRALIZATION PROCESSES IN COLLISIONS OF ARBITRARY CATIONS AND ANIONS WITHIN THE SIMPLIFIED MODEL APPROACH

Ya.V. Voronov*, S.A. Yakovleva, A.K. Belyaev

*Herzen State Pedagogical University of Russia
191186, Russia, Saint-Petersburg, Moika Emb., 48*

** voron.yar42@gmail.com*

Abstract. Application of the simplified model to rate coefficient values estimations are considered for the mutual neutralization processes in collisions of different cations with different anions. New theoretical estimations of the relative populations of the atomic states of Ca^* atoms for collisions $Ca^+ + D^-/O^-/S^- \rightarrow Ca^* + D/O/S$ are performed. New theoretical estimations of the rate coefficients values that belong to the optimal window are also performed for the temperature $T = 1000$ K.

Key words: inelastic collisions, inelastic processes, rate coefficients, mutual neutralization, cations, anions

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГОМОГЕННОЙ И ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ

М.Х. Гаджиев*, М.В. Ильичев, Д.И. Юсупов, В.П. Петровский,
А.С. Тюфтяев

*Объединенный институт высоких температур РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
makhach@mail.ru

Создан экспериментальный генератор низкотемпературной гомогенной и гетерогенной плазмы постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода, в котором в качестве плазмообразующего газа можно использовать как чистые атомарные (аргон) газы, так и их смесь с молекулярными (азот) газами, с возможностью подачи порошка в прикатодную область, в зону привязки дуги и безтоковый поток плазмы для исследования электрофизических характеристик самого плазмотрона и генерируемого им плазменного потока.

Ключевые слова: генератор низкотемпературной плазмы, плазмотрон, постоянный ток, плазменные технологии

Введение

Плазменная обработка, в силу своих неоспоримых преимуществ, уже много лет применяется в производстве материалов и покрытий. Этому способствуют такие уникальные достоинства, как возможность регулирования глубины воздействия, способность обрабатывать объекты любой формы, низкая себестоимость обработки, экологичность и, что самое главное, возможность охватывать большие площади. В технологиях, где необходимо достичь наибольших значений температур, самыми эффективными и простыми по конструкции являются дуговые генераторы низкотемпературной плазмы (ГНП) постоянного тока. При этом необходимо знать электрофизические характеристики, как самого

плазмотрона, так и генерируемого им гомогенного и гетерогенного плазменного потока для разработки промышленных ГНП.

Эксперимент и методы исследований

Для исследования электрофизических свойств термической гомогенной и гетерогенной плазмы был создан экспериментальный плазмотрон с вихревой стабилизацией и расширяющимся каналом выходного электрода с возможностью подачи порошка в прикатодную область через отверстия различной конфигурации в катоде, в зону привязки дуги через отверстия в первой секции анода и безтоковый поток плазмы через отверстия во второй секции анода. При исследовании применялись электрические и оптические методы с использованием аналого-цифровых плат L-Card, расходомерных участков с датчиками температуры, высокоскоростных камер и систем спектральных измерений.

Результаты и обсуждение

На основе значений напряжения горения дуги при заданном токе и тепловых потоков в водоохлаждаемые части плазмотрона были определены вольтамперные характеристики и КПД плазмотрона на аргоне. Поведение вольтамперной характеристики в диапазоне токов $I > 200$ А оказывается зависящим от расхода газа – при его увеличении в интервале от 1 до 3 г/с падающий участок ВАХ сменяется медленно растущим, что свидетельствует об изменении режима горения дуги. Проведено исследование потока плазмы аргона с порошком Al_2O_3 при напылении на подложку из нержавеющей стали. Скорость частиц в зависимости от расхода газа и тока дуги варьируется в диапазоне от 40 до 100 м/с. Температура частиц порошка при токе 300 А в среднем составляет 2400-2500 К (температура плавления Al_2O_3 – 2317 К). О высоком уровне прогрева частиц порошка свидетельствует также появление в спектре излучения резонансного дублета алюминия.

Также с использованием разработанного экспериментального плазмотрона впервые показаны перспективы использования

термической низкотемпературной плазмы при формировании сверхтвердых, супергидрофобных TiN/TiO_2 композиционных покрытий с ярко выраженными комбинационными свойствами [1] и синтезе супергидрофобных покрытий из гексаферрита бария с низкой магнитной твердостью [2]. Произведен синтез композитных микрочастиц металл-полупроводник-диэлектрик на основе титана, нитрида титана и рутила $Ti/TiN/TiON/TiO_2$ [3], фотоактивных композиционных микрочастиц $ZnO/TiO_2/Nb_2O_5$ [4] и синтез со скоростью до 2 мкм/с плотной керамики оксида галлия [5]. Получен также гетерокомпозитный микроразмерный фотокатализатор на основе TiO_2/ZnO , отличающийся от традиционных высокой эффективностью разложения трудноокисляемых органических загрязнителей (антибиотики, фенолы) при облучении солнечным светом [5].

Заключение

Создан экспериментальный генератор низкотемпературной плазмы постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода для изучения электрофизических характеристик, как самого плазмотрона, так и генерируемого им гомогенного и гетерогенного плазменного потока. Полученные результаты способствуют разработке плазмотронов для плазменных технологий на основе термической плазмы.

Литература

1. Muslimov A.E., Gadzhiev M.Kh. and Kanevsky V.M. Influence of Plasma Treatment Parameters on the Structural-Phase Composition, Hardness, Moisture-Resistance, and Raman-Enhancement Properties of Nitrogen-Containing Titanium Dioxide // Materials. 2022. 15. 8514. <https://doi.org/10.3390/ma15238514>
2. Muslimov A.E., Gadzhiev M.Kh. and Kanevsky V.M. Synthesis of Superhydrophobic Barium Hexaferrite Coatings with Low Magnetic Hardness // Materials. 2022. 15. 7865. <https://doi.org/10.3390/ma15217865>
3. Muslimov A., Orudzhev F., Gadzhiev M., Selimov D., Tyuftyaev A., Kanevsky V. Facile Synthesis of $Ti/TiN/TiON/TiO_2$ Composite Particles for

- Plasmon-Enhanced Solar Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue // *Coatings*. 2022. 12. 1741. <https://doi.org/10.3390/coatings12111741>
4. Гаджиев М.Х., Оруджев Ф.Ф., Муслимов А.Э. Электродуговой синтез фотоактивных композиционных микрочастиц ZnO/TiO₂/Nb₂O₅ // Письма в ЖТФ. 2023. Том 49. Вып.18. С.3-7. 10.21883/PJTF.2023.18.56168.19644
 5. Gadzhiev M.Kh., Muslimov A.E., Yusupov D.I., Il'ichev M.V., Kulikov Y.M., Chistolinov A.V., I.D. Venevtsev, Volchkov I.S., Kanevsky V.M., Tyuftayev A.S. Gas-thermal spraying synthesis of β -Ga₂O₃ luminescent ceramics // *Materials*. 2024. 17. 6078. <https://doi.org/10.3390/ma17246078>
 6. Orudzhev F.F., Gadzhiev M.Kh., Abdulkerimov M.S., Muslimov A.E., Krasnova V.V., Il'ichev M.V., Kulikov Y.M., Chistolinov A.V., Volchkov I.S., Tyuftayev A.S. and Kanevsky V.M., Plasma-Assisted Synthesis of TiO₂/ZnO Heterocomposite Microparticles: Phase Composition, Surface Chemistry, and Photocatalytic Performance // *Molecules*. 2025. 30(16). 3371. <https://doi.org/10.3390/molecules30163371>.

EXPERIMENTAL GENERATOR OF LOW-TEMPERATURE HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS PLASMA

M.Kh. Gadzhiev, M.V. Ilyichev, D.I. Yusupov, V.P. Petrovsky, A.S. Tyuftayev

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
125412, Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, Russia
makhach@mail.ru

An experimental generator of low-temperature homogeneous and heterogeneous DC plasma with an expanding channel of the output electrode has been created, in which both pure atomic (argon) gases and their mixtures with molecular (nitrogen) gases can be used as plasma-forming gases, with the possibility of supplying powder to the cathode region, the arc attachment zone, and the current-free plasma flow for studying the electrophysical characteristics of the plasma torch itself and the plasma flow generated by it.

Key words: low-temperature plasma generator, plasma torch, direct current, plasma technologies

ЭЛЕКТРЕТЫ ИЗ ГОФРИРОВАННОГО ЛИСТА ПОЛИЛАКТИДА: 3D-ПЕЧАТЬ И ОБРАБОТКА В ПЛАЗМЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА

М.Ф. Галиханов^{1,*}, И.Б. Одарченко², И.Н. Прусенко²,
Ж.В. Кадолич²

¹Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А

²Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, 246029, Республика Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, д. 48

* mgalikhanov@yandex.ru

В настоящей работе методом 3D-печати получен гофрированный лист из технически модифицированного полилактида, проведены его поляризация в плазме постоянного коронного разряда и оценка электретных характеристик. Исследования выявили высокие начальные значения электретных свойств, превосходящие плоские аналоги за счет увеличенной площади гофрированной структуры. Однако наблюдается повышенная релаксация свойств со временем, обусловленная наличием микродефектов на межслойных границах. Полученные результаты демонстрируют потенциал аддитивных технологий для создания пьезоэлектрических многослойных пленок или пластин с регулируемыми параметрами воздушных полостей.

Ключевые слова: электрет, полилактид, плазма постоянного коронного разряда, аддитивные технологии, 3D-печать, гофрированные лист, пьезоэлектрик.

Введение

Разработка пьезоэлектрических датчиков с использованием полимерных электретов в виде многослойных пленок или пластин со сформированными воздушными полостями является од-

ним из стремительно развивающемся направлении в научном и практическом плане [1, 2]. После поляризации (как правило – в плазме постоянного коронного разряда) такие материалы могут показывать пьезоэлектрические свойства, достигающие высоких пьезоэлектрических коэффициентов [3].

Ранее были показаны преимущества аддитивных технологий для создания полимерных электретов сложных геометрических форм и с развитой внутренней структурой [4-6]. Перспективным также выглядит сочетание аддитивных технологий с традиционными технологиями переработки полимеров. Например, возможна 3D-печать среднего слоя пьезоэлектрика в виде гофрированного листа, его обработка в плазме коронного разряда и последующее дублирование его с двумя или более полимерными пленками. В этом случае сформируется многослойная пластина с заданными параметрами воздушных полостей в ее объеме и, следовательно, с регулируемыми пьезоэлектрическими свойствами.

Целью данной работы стало создание с помощью 3D-печати гофрированной пластины, обработка ее в плазме постоянного коронного разряда и оценка ее электретных характеристик.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был взят технически модифицированный полилактид в виде филамента марки Ultimaker Tough PLA (Нидерланды). Для изготовления образцов (гофрированных листов) использовался профессиональный FFF/FDM принтер Ultimaker S5 (Нидерланды). Параметры печати: высота слоя 0,1 мм, печатное ядро AA0.25 (диаметр сопла – 0,25 мм), 100%-ное заполнение. 3D-модель образца создавалась с использованием Ultimaker Cura 5.11.

Образцы переводили в электретное состояние в плазме постоянного коронного разряда (90 °С, 30 секунд, напряжение на коронирующем электроде – 25 кВ). Потенциал поверхности V_s ,

эффективную поверхностную плотность зарядов $\sigma_{эф}$ и напряженность электрического поля E образцов определяли на приборе ИПЭП-1 (Беларусь) в течение некоторого времени хранения $\tau_{хр}$. Ошибка экспериментов – 3 %.

Результаты и их обсуждение

Применение полилактида для получения пьезоэлементов методом 3D-печати имеет ряд преимуществ: биоразлагаемость, сочетание структурной жёсткости с повышенной ударной вязкостью, обеспечение воспроизводимой геометрии без усадки, коробления, низкая вероятность межслойного расслоения. Поэтому внешний вид напечатанных образцов с высокой степенью схожести соответствовал их 3D-модели (рис. 1).

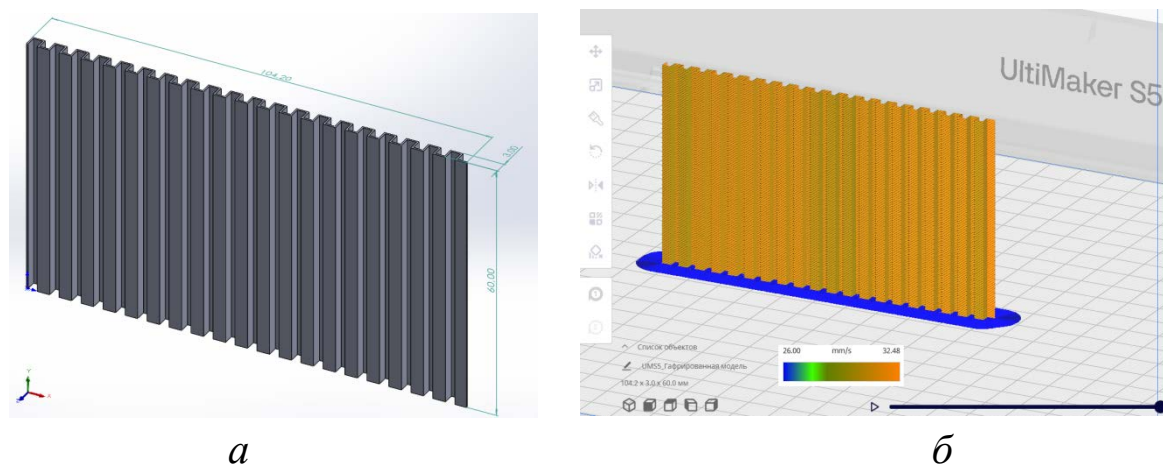


Рисунок 1. 3D-модель «Гофрированный лист» с габаритными размерами (а) и характеристики скоростного режима послойного построения образца в процессе FDM/FFF-формирования (б)

При обработке полученных гофрированных пластинок в плазме постоянного коронного разряда, они переходят в электретное состояние, о чем свидетельствуют значения $V_э$, $\sigma_{эф}$ и E (табл. 1).

Таблица 1. Электретные свойства исследуемых образцов после обработки в плазме коронного разряда

Материал образца	$V_{э0},$ В	$\sigma_{эф0},$ мкКл/м ²	$E_0,$ кВ/м	$V_{э10},$ В	$\sigma_{эф10},$ мкКл/м ²	$E_{10},$ кВ/м	$V_{э20},$ В	$\sigma_{эф20},$ мкКл/м ²	$E_{20},$ кВ/м
ПЛА	–1950	0,29	32,0	–850	0,10	17,0	–750	0,09	15,5

Примечание: индекс «0» - начальные значения, индекс «10» – на 10-е сутки хранения; индекс «20» – на 20-е сутки хранения

Видно, что начальные значения $V_{э}$, $\sigma_{эф}$ и E отличаются достаточно большими значениями, превосходящими плоские ПЛА-образцы. Вероятно, играет роль структура образца, площадь которого фактически в 3 раза больше плоского – стенки гофра также активно участвуют в захвате носителей зарядов, образующихся в плазме коронного разряда. Однако происходит достаточно быстрый спад электретных характеристик гофрированного листа со временем. Дело в том, что 3D-печать создает микроскопические дефекты на границе между слоями и нитями (филаментами). Эти структурные несовершенства могут служить и каналами для ускоренной диффузии носителей зарядов и их нейтрализации в процессе релаксации.

Выводы

Таким образом, обработка гофрированных листов, полученных методом 3D-печати, в плазме постоянного коронного разряда приводит к формированию электретного состояния с высокими начальными характеристиками за счет увеличенной в ~3 раза поверхности гофрированной структуры. Ускоренная релаксация электретных свойств гофрированных ПЛА-пластинок со временем связана с микроскопическими дефектами на границах слоев филамента, служащими каналами для диффузии и нейтрализации носителей зарядов. Работа открывает перспективы для создания

многослойных пьезоэлектрических датчиков с регулируемыми воздушными полостями путем термического дублирования гофрированных электретов с плоскими пленкам.

Благодарности

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образо-вательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение № 27 от 01.12.2025 г.).

Литература

1. Qiu X., Fang P., Mellinger A. et al. Ferroelectrets: Heterogenous polymer electrets with high piezoelectricsensitivity for transducers // J. of Adv. Dirllrc-trics, 2023. Vol. 13, No. 4. 2341009.
2. Fang P., Holländer L., Wirges W. et al. Piezoelectric d_{33} coefficients in foamed and layered polymer piezoelectrets from dynamic mechano-electrical experiments, electro-mechanical resonance spectroscopy and acoustic-transducer measurements // Meas. Sci. Technol., 2012. V. 23, No 3. 035604.
3. Qiu X., Bian Y., Liu J. et al. Ferroelectrets: Recent developments. // IET Nanodielectrics. 2022. Vol. 5, No. 3-4. P. 113-124/
4. Sellami Y., Ben Dali O., Chadda R. et al. Piezoelectret Sensors from Direct 3D-Printing onto Bulk Films // IEEE Sensors J., 2023, 23(18), 21354.
5. Altmann A.A., Suppelt S., Dali O.B. et al. Single-Step 3D Printing of Flexible Ferroelectret Sensors with Large Air Cavities // IEEE Sensors, IEEE, 2024. pp. 1-4.
6. Галиханов М.Ф., Болдышева В.К., Хантимерова Ю.М., Хэ Х., Ма С., Чжан С. Исследование электретных свойств полилактидных пластинок с воздушными полостями, полученных методом 3D-печати // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2025. Т. 5, №. 4. С. 28-36.

POLYLACTIDE CORRUGATED SHEET ELECTRETTEES: 3D PRINTING AND CORONA DISCHARGE PLASMA PROCESSING

M.F. Galikhanov^{1,*}, I.B. Odarchenko², I.N. Prusenko², Zh.V. Kadolich²

*¹Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia*

*²Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi,
October Avenue, 48, Gomel, 246029, Republic of Belarus,*

** mgalikhanov@yandex.ru*

In this work, a corrugated sheet made of a technically modified polylactide was obtained by 3D printing, its polarization in a permanent corona discharge plasma and the evaluation of electret characteristics were carried out. Studies have revealed high initial values of electret properties, surpassing their flat counterparts due to the increased area of the corrugated structure. However, there is an increased relaxation of properties over time due to the presence of microdefects at the interlayer boundaries. The results obtained demonstrate the potential of additive technologies for creating piezoelectric multilayer films or plates with adjustable air cavity parameters.

Key words: electret, polylactide, permanent corona discharge plasma, additive technologies, 3D printing, corrugated sheet, piezoelectric.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРИМЕРНОЙ ФАЗЫ РАЗРЯДА С ФОТОИОНИЗАЦИЕЙ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Ф.К. Гасратов^{*}, И.С. Байдин, П.К. Батраков, А.В. Огинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

^{} f.gasratov@lebedev.ru*

Приведены результаты моделирования стримеров в воздухе на дециметровом масштабе. Моделирование осуществляется с помощью кода Afivo-streamer. Фотоионизация учитывается с подходом Монте Карло. Внешнее напряжение меняется нелинейно. Распределения электронной плотности показывают, что при разных запусках моделирования наблюдаются как различия в морфологии, так и общие черты. В частности, слияние стримеров в прианодной области с повышением плотности и образование каналов, направленных в сторону катода. Внешнее напряжение влияет на скорость стримеров. Распределение силы тока отражает неоднородность проводимости в плазменных каналах. Скалограммы показывают, что излучение лежит в диапазоне высоких частот радиоволн.

Ключевые слова: атмосферный разряд, стримеры, численное моделирование, фотоионизация

Стримерные разряды представляют собой начальную фазу электрического пробоя газового промежутка, возникающую под действием высокого напряжения [1]. Моделирование стримерной фазы атмосферного разряда представляет значительный интерес, потому что позволяет исследовать природу зарождения реальных молний. В частности, морфология стримеров влияет на характеристики излучения в начальной стадии разряда [2]. Существенную роль в понимании процессов роста и ветвления стримерных каналов играют механизмы фотоионизации.

Мы используем открытый код для моделирования электрических разрядов в газах — Afivo-streamer (Adaptive Finite Volume Octree) [3]. Код основан на фреймворке, который обеспечивает адаптивно оптимизированные сетки, распараллеливание с разделяемой памятью, геометрический многосеточный решатель. Стримеры рассматриваются в приближении плазменной жидкости с дрейфом и диффузией. Изменение плотности электронов во времени зависит от электрического поля, коэффициентов диффузии и подвижности электронов, источников фотоионизации и свободных электронов [4]. Электрическое поле рассчитывается в электростатическом приближении. Мы пренебрегаем движением ионов и нейтральных частиц на фоне более подвижных электронов.

Моделирование выполняется в области $10 \times 10 \times 40$ см³, заполненной воздухом (80% N₂, 20% O₂) под атмосферным давлением и с температурой 300 К. Внизу расчетной области расположен анод в виде стержня с радиусом 4 см, а сверху катод в форме иглы с радиусом 0.15 мм. Разрядный промежуток составляет ≈ 30 см. Для фоновой ионизации взято значение 10^9 м⁻³. Подаваемое на катод напряжение имеет нелинейную зависимость от времени. Шаг моделирования меняется во время расчетов и находится в диапазоне 10^{-14} - 10^{-11} секунд. Временной шаг для файлов вывода данных составляет 5 нс.

Мы рассматриваем фотоионизацию с методом Монте-Карло [3]. Этот подход учитывает квантование фотонов и, следовательно, воспроизводит стохастические флуктуации электронной плотности перед стримером. Средняя эффективность фотоионизации составляет 0.075. Также учитывается фотоэмиссия с электродов. Проведено несколько запусков моделирования с одинаковыми конфигурациями системы, но с разными наборами случайных чисел, которые определяют место поглощения ионизирующих фотонов. В результате моделирования наблюдаются неоднородные распределения электронной плотности (рис. 1), осе-

вое и не осевое слияние стримеров, образование каналов с высокой плотностью в прикатодной области, излучение в диапазоне 10-100 МГц (рис. 2). Максимальные значения плотности электронов достигают $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Также построены распределения для силы тока вдоль оси разряда; максимальное значение $\approx 130 \text{ А}$. Скорость основных каналов катодных стримеров достигает $\sim 10^7 \text{ м/с}$. Результаты хорошо согласуются с данными, полученными на экспериментальной высоковольтной установке ЭРГ.

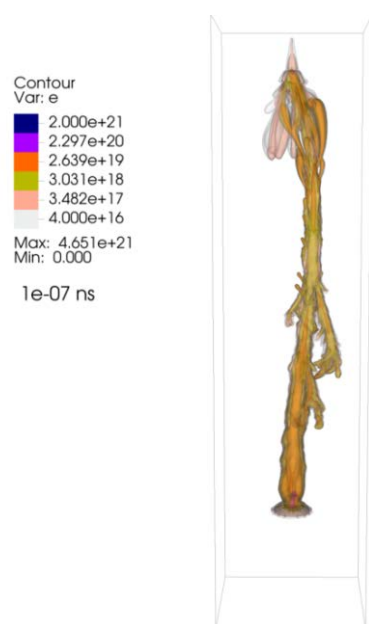


Рис 1. Распределение электронной плотности спустя 5 нс после слияния стримеров в логарифмическом масштабе в единицах м^{-3}

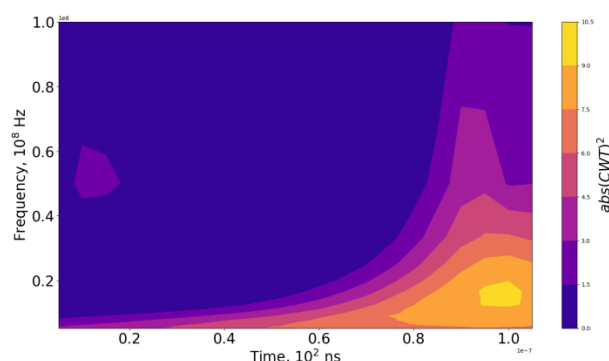


Рис 2. Скалограмма излучаемого поля E_z

Литература

1. Y . P . Raizer . Gas discharge physics. Springer Verlag Berlin, 1991.
2. Parkevich E., Shpakov K., Baidin I. et al. Streamer formation processes trigger intense x-ray and high-frequency radio emissions in a high-voltage discharge. *Physical Review E*. 105. 10.1103/PhysRevE.105.L053201 (2022).
3. Teunissen J and Ebert U 2017 *Journal of Physics D: Applied Physics* 50 474001 ISSN 1361-6463 URL <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/aa8faf>
4. A. Luque and U. Ebert. Density models for streamer discharges: Beyond cylindrical symmetry and homogeneous media. *Journal of Computational Physics*, 231(3):904–918, Feb 2012.
5. Bagheri, B., & Teunissen, J. (2019). The effect of the stochasticity of photoionization on 3d streamer simulations. *Plasma Sources Science and Technology*, 28 (4), 045013.

SIMULATION OF THE STREAMER PHASE OF DISCHARGE WITH PHOTOIONIZATION USING THE MONTE CARLO METHOD

F.K. Gasratov*, I.S. Baidin, P.K. Batrakov, A.V. Oginov

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** f.gasratov@lebedev.ru*

The results of the simulation of streamers in air on a decimeter scale are presented. The simulation is performed using the Afivo-streamer code. Photoionization is taken into account with the Monte Carlo approach. The external voltage varies non-linearly. The electron density distributions show that both morphological differences and common features are observed during different simulation runs. In particular, the merge of streamers in the anode region with an increase in density and the formation of channels directed towards the cathode. The external voltage affects the speed of the streamers. The current strength distribution reflects the heterogeneity of the conductivity in the plasma channels. The scalograms show that the radiation lies in the high frequency range of radio waves.

Key words: atmospheric discharge, streamers, numerical simulation, photoionization

ВЛИЯНИЕ ПРИКАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСЛОВИЯ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ДИОДЕ С КОНИЧЕСКИМ КАТОДОМ

М.А. Гашков¹, Н.М. Зубарев^{1,2}, О.В. Зубарева^{1,*},
М.И. Яландин^{1,2}

¹Институт электрофизики УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул.
Амундсена, д. 106

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленин-
ский проспект, д. 53

* olga@iep.uran.ru

Анализируется влияние прикатодных плазменных областей, формирующихся на начальных стадиях субнаносекундного пробоя газа, на условия генерации убегающих электронов для слабо- и сильнонеоднородных распределений электрического поля. Демонстрируется, что для слабонеоднородного поля (конические катоды с большими углами раствора) размер этих областей составляет десятки микрометров, и не оказывает существенного влияния на условия убегания. Для сильнонеоднородного поля (малые углы раствора) размер плазменных областей достигает нескольких сотен микрометров, т.е. становится макроскопическим. Их формирование приводит к существенному увеличению напряжения, требуемого для генерации убегающих электронов.

Ключевые слова: убегающие электроны, импульсный пробой газа, резко неоднородное электрическое поле, конический катод, воздушный диод.

Теоретически исследуются условия убегания электронов в плотном газе при неоднородном распределении электрического поля, обусловленном использованием острийных катодов. Для катодов в форме идеального конуса напряженность поля спадает с расстоянием от острия по степенному закону $E \propto r^{\gamma-1}$, где пока-

затель ($0 < \gamma < 1$) характеризует степень неоднородности его распределения. Предел $\gamma \rightarrow 1$ соответствует однородному полю (плоский катод), а предел $\gamma \rightarrow 0$ – резко неоднородному полю (бесконечно тонкая игла). Основной поток убегающих электронов (УЭ) эмитирует с внешней границы формирующейся прикатодной плазменной области [1].

В работе предложена аналитическая модель, согласно которой пространственный масштаб плазменной области определяется тем, что на ее границе должны одновременно выполняться два условия убегания: локальное (напряженность поля в месте старта электрона превышает порог убегания в однородном поле [2,3]) и нелокальное (для достижения быстрым электроном анода требуется превышение приложенным напряжением некоторого критического значения [4,5]). Это требование позволило рассчитать зависимость характерного масштаба (ρ_c) плазменной области от показателя неоднородности поля γ : см. Рис. 1. Видно, что масштаб мал для слабонеоднородного поля, и монотонно растет при заострении конического катода (уменьшении γ).

Получаемые в рамках модели оценки качественно согласуются с результатами экспериментов [6,7], где сопоставлялись условия убегания для графитовых катодов различной формы: иглы ($\gamma \approx 0.21$) и конуса с углом раствора в $\sim 100^\circ$ ($\gamma \approx 0.5$). Масштаб ρ_c составляет сотни микрон в первом случае и десятки микрон во втором. Столь существенное – на порядок – различие размеров плазменных областей обусловлено тем, что в сильнонеоднородном поле локальное условие вблизи катодного острия реализуется при сравнительно низких, докритических напряжениях – уже на переднем фронте прикладываемого к разрядному промежутку импульса напряжения. Начинающие убегать электроны теряют энергию и превращаются в тепловые на некотором от удалении от катода, инициируя при этом формирование плазмы. Для слабонеоднородного поля локальное условие оказывается более

сильным, чем нелокальное, и поток УЭ формируется в непосредственной близости от катодного острия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053-П.

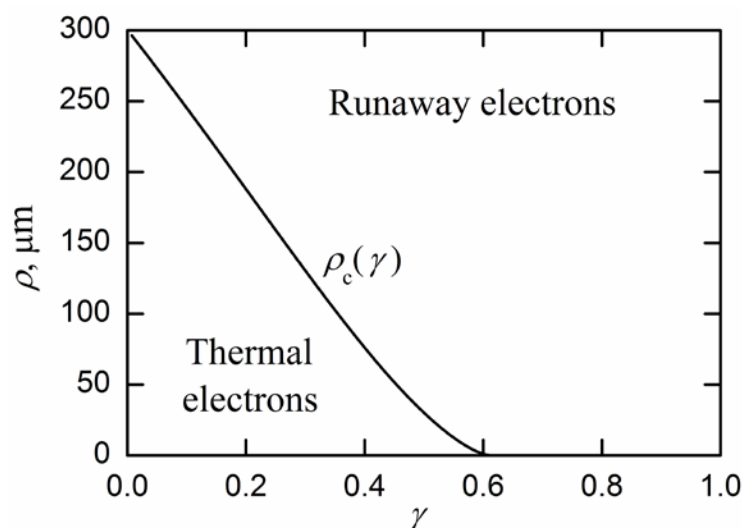


Рис. 1. Зависимость характерного пространственного масштаба прикатодной плазменной области от показателя неоднородности электрического поля. Газ – воздух атмосферного давления; ширина зазора .

Литература

1. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M., Sadykova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Ulmaskulov M.R., Zubareva O.V., Kozyrev A.V., Semeniuk N.S. How short is the runaway electron flow in an air electrode gap? // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. Art. no. 063501.
2. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. Импульсный наносекундный электрический разряд в газе // УФН. 1972. Т. 107. С. 201–228.
3. Babich L.P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Arlington, TX: Futurepast, 2003.
4. Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И. Особенности убегания электронов в газовом промежутке с коническим катодом // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 512. С. 5–10.
5. Kozyrev A.V., Lobanov L.N., Mesyats G.A., Semeniuk N.S., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M., Zubareva O.V. Local and

- nonlocal conditions for electron runaway in a gas gap with a conical cathode with a variable opening angle // *Phys. Plasmas*. 2024. V. 31. Art. no. 103109.
6. Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И. Размеры прикатодных плазменных областей – источников убегающих электронов – в условиях резко неоднородного электрического поля // *Журнал радиоэлектроники*. 2025. № 11.
7. Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Яландин М.И. Условия генерации убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным электрическим полем: теория и эксперимент // *УФН*. 2024. Т. 194. С. 853–864.

INFLUENCE OF NEAR-CATHODE PLASMA ON ELECTRON RUNAWAY CONDITIONS IN A GAS DIODE WITH A CONICAL CATHODE

М. А. Gashkov¹, N. M. Zubarev^{1,2}, O. V. Zubareva^{1,*}, M. I. Yalandin^{1,2}

¹*Institute of Electrophysics UB RAS, 106 Amundsen Str., Ekaterinburg, 620016, Russia*

²*Lebedev Physical Institute RAS, Leninsky Prospekt 53, Moscow, 119991, Russia*

* olga@iep.uran.ru

The influence of near-cathode plasma regions formed at the initial stages of subnanosecond gas breakdown on the conditions of runaway electron generation under weakly and strongly inhomogeneous electric field distributions is analyzed. It is demonstrated that for a weakly inhomogeneous field (conical cathodes with large opening angles), the size of these regions is tens of micrometers and does not significantly affect the runaway conditions. For a strongly inhomogeneous field (small opening angles), the size of the plasma regions reaches several hundred micrometers, i.e., it becomes macroscopic. Their formation leads to a significant increase in the voltage required to generate runaway electrons.

Key words: runaway electrons, pulsed gas breakdown, sharply inhomogeneous electric field, conical cathode, air diode.

537.533, 621.793.1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ИСПАРЕНИЯ ТВЕРДОЙ МИШЕНИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДА БОРА

Д.А. Горьковская^{1,*}, Р.А. Картавцов¹, Д.А. Шпанов^{1,2},
Н.Н. Коваль¹, Е.А. Петрикова¹, М.Е. Рыгина¹,
М.С.Петюкевич^{1,2}, М.С. Воробьев^{1,2}

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, г. Томск, пр.
Академический, 2/3*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический универси-
тет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

**da.gorkovskaia@hcei.ru*

В работе продемонстрирована возможность нанесения покрытия из карбида бора B_4C на твердый сплав ВК8 методом импульсного электронного испарения мишени. После нанесения таких покрытий был проведен анализ микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазовый анализ.

Ключевые слова: Карбид бора, твердые сплавы, электронного-пучковое испарение, плазменный катод, износостойкие покрытия, термическое испарение.

Введение

Покрытия из карбида бора обладают высокой износостойкостью и химической инертностью, а также устойчивостью к различным видам механического износа. Твердость покрытия карбида бора B_4C близка к твердости алмаза и кубического нитрида бора при температуре свыше $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что важно для высокотемпературного индентирования [1], а также придает стойкость к износу и коррозии соплам пескоструйных аппаратов, фильерам и матрицам [2]. Стоит отметить, что покрытия B_4C благодаря сво-

им основным преимуществам (низкая сорбционная емкость к водороду, устойчивость при высоких энергетических нагрузках) перспективны к использованию в качестве защитного покрытия в термоядерных установках [3].

Широко используемые методы нанесения покрытий, такие как дуговое и магнетронное распыление, обладают рядом технологических ограничений. В отличие от дугового и магнетронного распыления метод испарения импульсным электронным пучком обеспечивает существенно более высокую скорость нанесения покрытий до 10 мкм/мин и подходит как для электропроводящих, так и для диэлектрических материалов [4], включая тугоплавкие и композиционные системы, благодаря высокой локальной мощности импульсного пучка (до 10^7 Вт/см²) и равномерному распределению энергии по поверхности мишени.

Целью данной работы является исследование структуры и свойств покрытия на основе карбида бора, сформированного на поверхности сплава ВК8 методом импульсного электронно-пучкового испарения твердотельной подложки в источнике с сеточным плазменным катодом.

Методика эксперимента

Формирование покрытия методом импульсного электронного испарения мишени осуществляли, используя источник электронов «СОЛО» с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [5,6]. Процесс нанесения покрытия включал две стадии: 1) очистку и нагрев поверхности подложек ионами азота в тлеющем разряде при давлении 50 Па, напряжении горения 1 кВ и токе 0.3 А в течение 15 минут; 2) импульсное электронно-пучковое испарение мишени из карбида бора В₄С электронным пучком при ускоряющем напряжении 13 кВ, токе пучка 80 А, длительности импульса 500 мкс, энергии в одном импульсе 500 Дж, частоте следования импульсов 4 с⁻¹, давлении $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Время напыления покрытия составляло 30 минут, за которое на мишень проследовало 7000 импульсов тока пучка с

вышеизложенными параметрами. Полированный образец из твердого сплава ВК8 располагался на расстоянии 30 мм от испаряемой мишени из карбида бора B_4C .

Фазовое состояние исследовали методами рентгеноструктурного анализа (РФА) на дифрактометре XRD 6000. Структуру и элементный состав изучали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Микротвердость поверхности определяли на твердомере ПМТ-3 при нормальной нагрузке на индентор 500 мН.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов сформированы покрытия на подложках твердого сплава ВК8 методом распыления мишени из карбида бора B_4C импульсным электронным пучком. Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности подложки, сформировавшейся после распыления мишени из B_4C , представлены на рисунке 1. Элементный анализ полученных образцов показал наличие бора (77.6 вес. %), углерода (5.2 вес. %), кислорода (7.3 %), железа (8 вес. %), вольфрама (1.5 вес. %), содержание хрома и кремния не превышает (0.5 вес. %).

При формировании на поверхности подложки из ВК8 тугоплавких покрытий выявлено наличие микрокапельной фракции (минимальный размер капель – 0.03 мкм, максимальный размер – 26 мкм) [7]. При исследовании поверхности испаряемой мишени B_4C было обнаружено наличие мелкодисперсных частиц, из которого спекалась мишень, которые не испарились в процессе электронно-пучкового воздействия и представляли собой порошкообразный осадок. Исследование этого порошка не выявило дополнительных примесей.

Для исследования методом РФА были приготовлены следующие образцы: плоский образец, вырезанный из мишени, порошок, полученный в результате деградации мишени под действием импульсного электронного пучка, и образец материала подложки из ВК8 с нанесенным покрытием. РФА покрытия выявил

содержание BC_5 (47.4 мас.%) и α -WC (52.6 мас.%). Фаза BC_5 является по сравнению с $B_{13}C_2$, которая содержится в мишени, более дисперсной и напряженной вероятно из-за импульсного режима испарения и более плотноупакованной кристаллической решетки. Установлено, что размер параметров кристаллической решетки и областей когерентного рассеяния уменьшается в 2 и 3 раза, по сравнению с исходной.

Выводы

Таким образом, продемонстрирована возможность формирования покрытия из карбида бора на поверхности твердого сплава ВК8 методом электронно-пучкового испарения материала катода. Методами РФА выявлено формирование в покрытии карбида бора BC_5 и α -WC. Отмечается также формирование капельной фракции с неоднородным элементным составом, что требует дополнительных исследований и подбора оптимального режима ввода энергии пучка в испаряемую мишень. Микротвердость покрытия составила 30 ± 1.1 ГПа. Полученные результаты представляют интерес для разработки процессов модификации поверхности режущего инструмента эффективным методом импульсного электронно-пучкового испарения карбида бора B_4C .

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №25-49-10018).

Литература

1. Wheeler J.M, Michler J. Indenter materials for high temperature nanoindentation // Rev. Sci. Instrum. 2013. № 10. P. 101301.
2. Бинцева А.А., Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И. Плазменное напыление покрытий из порошков карбида бора // Актуальные проблемы в машиностроении. 2020. № 1-2. С. 122-127
3. Cherepanov D.E., Burdakov A.V., Vyacheslavov L.N. et al. Testing of Boron Carbide Coatings with a Pulsed Thermal Load Possible in the Divertor Zone of the ITER Tokamak. // Phys. Atom. Nuclei. 2024. № 1. P. 99–107.
4. Yushkov Y.G., Oks E.M., Tyunkov A.V., Zolotukhin D. Electron-Beam Synthesis of Dielectric Coatings Using Forevacuum Plasma Electron Sources (Review) // Coatings. 2022. № 1. P. 82-120.

5. V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval, Generation and propagation of high-current low-energy electron beams // *Laser Particle Beams*. 2003. №2. P. 243-248.
6. Улаханов Н.С., Москвин П.В., Мишигдоржийн У.Л. и др. Модификация диффузионных бор и алюминий содержащих слоев электронно-пучковой обработкой // *Доклады АН ВШ РФ*. 2024. № 62. С. 75.
7. Шпанов Д.А., Картавцов Р.А., Воробьев М.С. и др. Нанесение покрытий из карбида бора методом импульсного электронного испарения твердой мишени // *Materials. Technologies. Design*. 2025. Т. 7. №4 (23). С. 87–97.

METHOD OF PULSED ELECTRON EVAPORATION OF A SOLID TARGET FOR BORON CARBIDE COATING

**D.A. Gorkovskaia^{1,*}, R.A. Kartavtsov¹, D.A. Shpanov^{1,2},
N.N. Koval¹, E.A. Petrikova¹, M.A. Rygina¹,
M.S. Petyukevich^{1,2}, M.S. Vorobyov^{1,2}**

¹*Institute of High-current Electronics SB RAS, 634055, Tomsk, Akademicheskoy Avenue., 2/3*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue., Tomsk, 634050*

* da.gorkovskaia@hcei.ru

The application of boron carbide B₄C coatings by pulsed electron evaporation is a modern and promising technology for the industrial sector. The coatings applied by this method have high strength and wear-resistant characteristics. The paper demonstrates the possibility of applying a boron carbide B₄C coating to a hard alloy VK8 by pulsed electron evaporation of a target. After applying such coatings, the microstructure was analyzed by scanning electron microscopy and X-ray phase analysis.

Keywords: boron carbide, hard alloys, electron-beam evaporation, grid plasma emitter, wear-resistant coatings, thermal evaporation.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С АЗИМУТАЛЬНЫМИ ВОЛНАМИ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. К. Данильченко^{1,2,*}, Д. А. Томилин¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации
«Исследовательский центр имени М.В.Келдыша», 125438, Россия, Москва,
Онежская ул., д. 8

²Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), 141701, Россия, Московская область, г.
Долгопрудный, Институтский Переулок 9

*danilchenko.ik@phystech.edu

Описание турбулентного переноса электронов поперек магнитного поля является одной из ключевых задач численного моделирования холловских двигателей. В данной работе с помощью двумерной аксиально-азимутальной PIC-модели исследовалась динамика электронов в катодной области разрядного канала. Анализ полученных функций распределения электронов и их траекторий позволил выделить различные механизмы формирования турбулентного тока. Полученные результаты позволяют усовершенствовать подходы к учету турбулентного переноса в численных моделях уменьшенной размерности.

Ключевые слова: Холловский двигатель, численное моделирование, PIC, турбулентный перенос.

Электрореактивные двигатели (ЭРД), и в частности холловские двигатели (ХД), широко используются на множестве космических аппаратов благодаря относительно большому удельному импульсу, который позволяет значительно уменьшить необходимую массу рабочего тела. Численное моделирование

ЭРД может существенно упростить разработку новых моделей двигателей. Однако для создания точных численных моделей необходимо учитывать турбулентный перенос электронов поперек магнитного поля, возникающий из-за взаимодействия электронов с азимутальными волнами [1].

Трехмерные численные модели, позволяющие явным образом учитывать взаимодействие электронов с азимутальными волнами, крайне вычислительно затратны [2]. Поэтому на практике для моделирования ЭРД используются двумерные радиально-аксиальные модели, учитывающие турбулентный перенос с помощью различных полуэмпирических подходов, таких как введение аномальной частоты столкновений [3].

В данной работе с помощью двумерной аксиально-азимутальной PIC-модели исследуется динамика электронов в катодной области разрядного канала ХД. Были получены функция распределения электронов, осредненная по азимутальному направлению и циклотронному периоду, при различных конфигурациях магнитного поля, а также траектории электронов с разными начальными скоростями.

На основе полученных данных был проанализирован вклад различных электронных энергетических групп в турбулентные потоки частиц и энергии. Удалось выявить электронные группы, вносящие основной вклад в турбулентный перенос, а также выделить два различных механизма формирования турбулентного тока: электроны с диаметром Лармора превышающим длину волны азимутальных возмущений создают поток частиц от анода к катоду, в то время как электроны с диаметром Лармора близким к длине волны азимутальных возмущений создают ток, направленный к аноду.

Полученные результаты показывают, что вклад электронов в общий турбулентный ток существенно зависит от их скорости. Учет этой зависимости необходим для корректного моделирования турбулентного переноса и может позволить

значительно увеличить точность радиально-аксиальных моделей ХД.

Литература

1. Kaganovich ID, Smolyakov A, Raitses Y, Ahedo E, Mikellides IG, Jorns B, et al. Physics of ExB discharges relevant to plasma propulsion and similar technologies. Physics of Plasmas. AIP Publishing; 2020;27(12).
2. Villafana, Willca & Benedicte, Cuenot & Vermorel, Olivier. (2023). 3D particle-in-cell study of the electron drift instability in a Hall Thruster using unstructured grids. Physics of Plasmas. 30. 033503. 10.1063/5.0133963.
3. Kravchenko D.A., Shagayda A.A., Selivanov M.Y., Shashkov A.S., Tomilin D.A., Khmelevskoi I.A., et al “Ion Thruster Discharge Modeling with Adjustment of Coefficient of Anomalous Electron Conductivity”, Journal of Propulsion and Power. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 2022

NUMERICAL STUDY OF ELECTRON INTERACTION WITH AZIMUTHAL WAVES IN THE DISCHARGE CHANNEL OF A HALL THRUSTER

I. K. Danilchenko^{1,2,*}, D. A. Tomilin¹

¹*State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center"*
8, Onezhskaya Str., Moscow, 125438, Russia

²*Moscow Institute of Physics and Technology*
Institutskiy Pereulok 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

*danilchenko.ik@phystech.edu

Turbulent electron transport across the magnetic field represents one of the key challenges in numerical modeling of Hall thrusters. In this work, the electron dynamics in the cathode region of the discharge channel is studied using a two-dimensional axial–azimuthal PIC model. Analysis of the obtained electron distribution functions and particle trajectories revealed various mechanisms of turbulent current formation. These results offer insight into how turbulent transport can be more accurately represented in reduced-dimension numerical models.

Key words: Hall thruster, numerical simulation, PIC, turbulent transport.

ВОЛНЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ СВЧ РАЗРЯДА

С.А. Двинин^{1,2*}, К.Н. Корнев¹, З.А. Кодирзода³, Д.К. Солихзо-
да³, Д.В. Чупров²

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, 119899, г. Москва, Россия, Ленинские Горы,
1, стр. 2

²Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, Россия, ул.
Миклухо-Маклая, д. 6,

³Таджикский национальный университет, 734035, Душанбе, Таджикистан,
Проспект Рудаки, 17,

* DvininSA@my.msu.ru

В работе представлены аналитические расчеты перестройки дисперсионных характеристик электромагнитных волн, возбуждаемых в цилиндрическом резонаторе в магнитоактивной плазме и численного моделирования структуры электромагнитного поля в пакете Comsol Multiphysics при изменении как постоянного магнитного поля, так и плотности электронов. Использованные параметры плазмы соответствуют установке РАПИРА (РУДН). Учтено наличие как осевой, так азимутальной компонент волнового вектора возбуждаемых волн.

Ключевые слова: электронный циклотронный резонанс, ЭЦР-разряд, разряд в резонаторе, разряд в магнитной ловушке, сверхвысокочастотный разряд.

Введение

Разряды на электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) применяются для создания источников многозарядных ионов, ионов водорода, маневровых двигателей космических аппаратов, плазмохимических установок для обработки материалов. Пре-

имущество таких источников заключается в простоте создания плазмы при низком давлении рабочего газа, поскольку в условиях резонанса энергия электромагнитной волны эффективно поглощается электронами в условиях, когда частота столкновений электронов ν много меньше частоты сверхвысокочастотного (СВЧ) поля ω поддерживающего разряд (2.45 ГГц). В данной работе изучаются электродинамические свойства разряда на установке «РАПИРА» (РУДН) [1, 2], в которой ЭЦР разряд создается в длинной цилиндрической трубке (плазмотроде), пронизываемой СВЧ-резонатор вдоль его оси, магнитное поле представляет собой многопробочную ловушку, а резонатор возбуждается с помощью двух стержней, к которым подводится СВЧ поле. Данная работа развивает подходы, изложенные в [3, 4] для разряда в магнитной ловушке, инициируемого с помощью цилиндрического резонатора, возбуждаемого щелевой антенной.

Изменение конструкции приводит к тому, что волны в разряде будут иметь не только азимутальное, но и осевое волновые числа, причем в плазмотроде внутри резонатора и за его пределами могут распространяться разные типы волн. В связи с этим становится актуальной задача анализа системы спектров волн в плазменном волноводе и компьютерное моделирование пространственной структуры поля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическое моделирование показало, что при одно-стержневом возбуждении пространственное распределение СВЧ поля в резонаторе в целом аналогично распределению при возбуждении с помощью щелевой антенны [4]. При возбуждении с помощью двух стержней картина становится более сложной, при определенных плотностях электронов наблюдается сложение или вычитание волн, возбуждаемых каждым из стержней, а на зависимости амплитуды СВЧ поля появляются резонансы, связанные с этим взаимодействием. Пример расчета пространственных кон-

фигураций электромагнитного поля приведен на рис. 1.

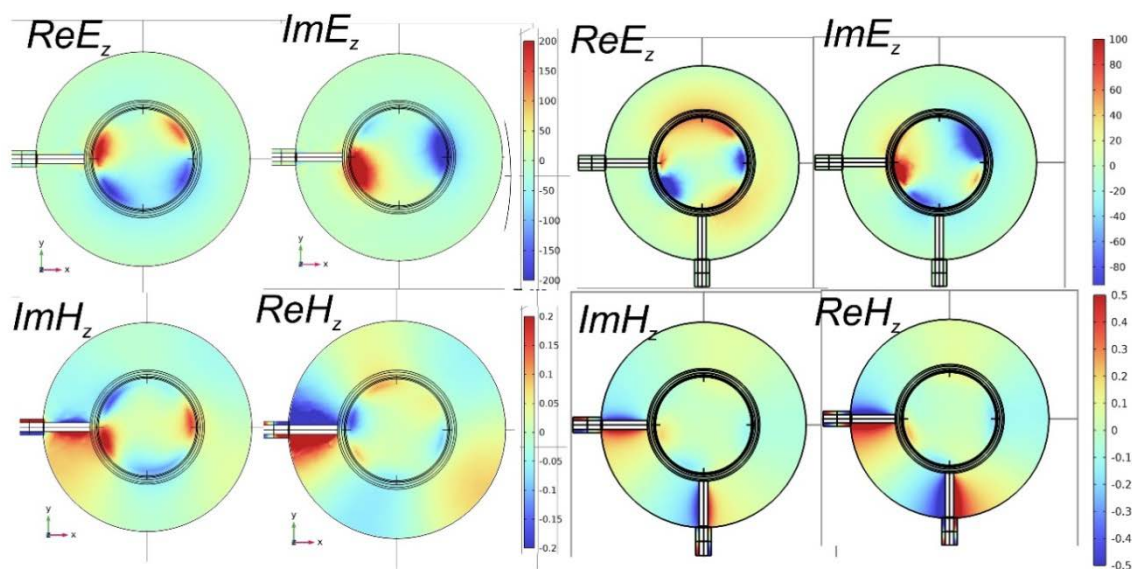


Рис.1. Азимутальное распределение z-компонент электрического (В/м) и магнитного (А/м) полей в пространстве в плоскости возбуждения резонатора при одностержневом и двухстержневом возбуждении и плотности электронов $1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Осевое магнитное поле в окрестности резонатора 785 Гс

При малых плотностях электронов поле возбуждается исключительно в резонаторе. Как только создаются условия для распространения поверхностной или объемной мод в заперде волноводе, экранирующем при отсутствии плазмы прилегающую к резонатору часть плазموпровода, поле проникает через него в окружающее пространство (рис. 2). При этом азимутальная асимметрия волны в волноводе сохраняется.

Аналитический расчет показал, что в целом в рассматриваемой системе, при конечном значении осевой постоянной распространения h , плотности электронов, при которых происходит изменение структуры собственных волн неоднородного плазменного волновода близки к их значениям при $h=0$. Однако для волн, распространяющихся преимущественно вдоль магнитного поля, которые могут преобладать, если размер резонатора вдоль оси будет близок или больше длины окружности плазменного столба,

волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля, также будут играть существенную роль.

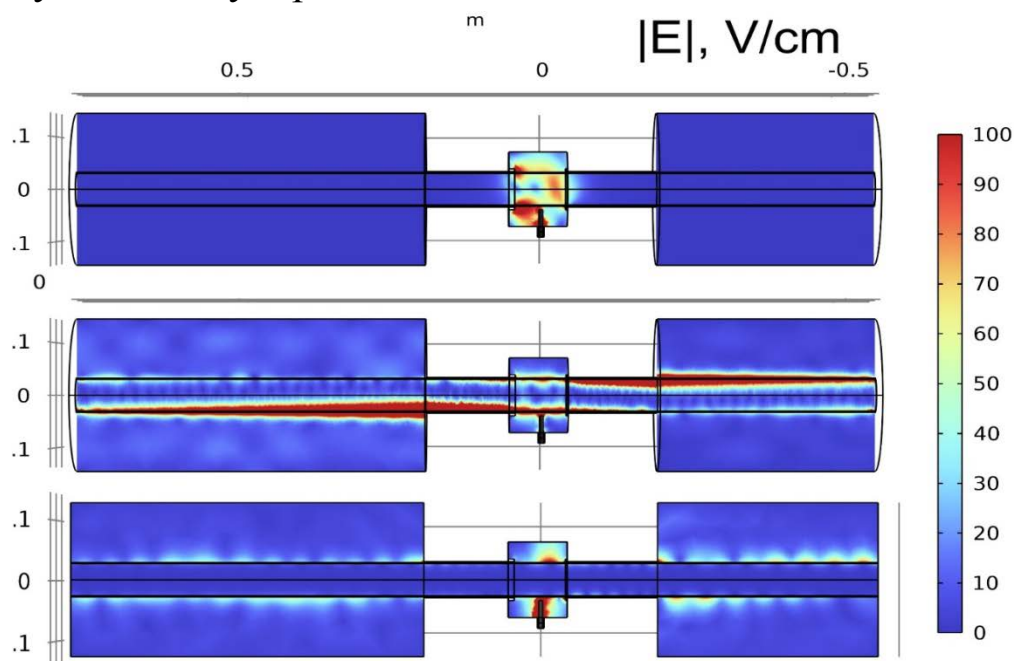


Рис.2. Осевое распределение модуля электрического поля (В/м) поля в пространстве в плоскости возбуждения при одностержневом возбуждении. Плотность электронов в плазме (сверху вниз) $n_e=3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, б) $n_e=1.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, с) $n_e=1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Осевое магнитное поле в окрестности резонатора 785°Гс

Литература

1. Андреев В.В., Артемьев А.В., Барыков И.А., Калашников А.В. Параметры плазменных потоков, генерируемых безэлектродными ВЧ и СВЧ источниками в линейной магнито-плазменной установке. LIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICRAF-2026. 16–20 марта 2026 г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. Москва, 2026. С. 251
2. Двинин С.А., Корнев К.Н., Кодирзода З.А., Солихзода Д.К., Чупров Д.В. Математические модели сверхвысокочастотного разряда в неоднородном магнитном поле. LIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICRAF-2026. 16–20 марта 2026 г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. Москва, 2026. С. 257
3. Dvinin S.A., Korneeva M.A. Restructuring of the system of natural waves in the ECR discharge. // Phys. Plasmas 2026. V. 33, 022105.

4. Dvinin S.A., Korneeva M.A. Numerical modeling of the spatial structure of the electromagnetic field in the ECR discharge in the resonator. // Phys. Plasmas. 2026. V. 33. 022104.

WAVES AND SPATIAL DISTRIBUTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN A MAGNETOACTIVE MICROWAVE DISCHARGE PLASMA

**S. A. Dvinin^{1,2*}, K. N. Kornev¹, Z.A. Qodirzoda³, D.K. Solihzoda³,
D.V. Chuprov²**

¹*Lomonosov Moscow State university, 119899, Moscow, Russian Federation, Leninskiye Gory, 1, building. 2*

²*RUDN university, 117198, Moscow, Russian Federation, Miklukho-Maklaya street, 6,*

³*Tajik National University, 734035, Dushanbe, Tajikistan, Rudaki avenue, 17,
* DvininSA@my.msu.ru*

This paper presents analytical calculations of the transformation of the dispersion characteristics of electromagnetic waves excited in a cylindrical resonator in a magnetoactive plasma and numerical simulations of the electromagnetic field structure using the Comsol Multiphysics package with variations in both the constant magnetic field and the electron density. The plasma parameters used correspond to those of the RAPIRA facility (RUDN University). Both the axial and azimuthal components of the wave vector of the excited waves are taken into account.

Key words: electron cyclotron resonance, ECR discharge, discharge in a resonator, discharge in a magnetic trap, microwave discharge.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИКОНТИНУУМА ВОЛЬФРАМА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

А.В. Демура, Д.С. Леонтьев*, В.С. Лисица, А.А. Маврин

НИИЦ «Курчатовский институт», Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, 123182

** leontievdmitiy@gmail.com*

В работе проведено моделирование спектра вольфрама в низкотемпературной плазме, наблюдаемого в области длин волн 100-300 нм и называемого квазиконтинуумом. Для расчета применена статистическая модель локальной плазменной частоты с распределением электронной плотности в приближении Слэтера. Полученные результаты позволяют качественно воспроизвести поведение спектров вольфрама в данной области длин волн.

Ключевые слова: квазиконтинуум, вольфрам, статистическая модель, низкотемпературная плазма, тяжелые ионы, спектр.

Введение

Вольфрам как конструкционный элемент дивертора и первой стенки широко используется в современных термоядерных установках. Процессы эрозии могут приводить к поступлению ионов вольфрама в плазменный разряд. Большой заряд ядра позволяет ионам вольфрама сохранять значительное количество связанных электронов. Высокая излучательная способность таких ионов сильно влияет на радиационные потери плазмы. Поэтому моделирование спектров радиационных потерь ионов вольфрама является актуальной и важной задачей в термоядерных исследованиях [1-3].

В пристеночной плазме с температурой 1-2 эВ представлены атом и ионы вольфрама низкой кратности, с частично заполненной 5d оболочкой. Поэтому расчеты спектров вольфрама осложняются наличием множества электронных конфигураций. Из-за большого количества линий (число может достигать порядка $10^3 - 10^4$) от каждого иона, представленного при данной температуре в распределении по зарядовым состояниям, в данной области спектра образуются особые участки, называемые квазиконтинуумом [3]. Характерной особенностью такого спектра является наличие резкого обрыва в области малых длин волн. Для моделирования квазиконтинуального спектра применяются различные модели, основанные на использовании усредненных электронных конфигураций (CA-configuration average) [1-2] или расчете огибающих спектра в модели массива неразрешенных переходов (UTA – unresolved transition arrays) [1-2, 4]. В данной работе предлагается использовать статистический подход модели локальной плазменной частоты, который также позволяет строить огибающую массива линий.

Применение статистической модели к расчету квазиконтинуума

В основе статистической модели лежит представление о коллективном возбуждении электронного остова или электронных оболочек внутри иона при столкновениях с заряженными частицами плазмы, преимущественно с электронами [3]. При этом частота коллективного возбуждения предполагается равной плазменной частоте ω_p и определяется через распределение электронной плотности внутри атома или иона $n(r)$

$$\omega_p(r) = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n(r)}{m_e}}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, r – радиус, отсчитываемый от ядра, внутри атома или иона.

В данной работе в качестве электронной плотности выбрано распределение в приближении Слэтера, которое позволяет параметрически определить конкретную оболочку с заданными главным n и орбитальным l квантовыми числами

$$n(r) \equiv n_{\text{Sl}}(r) = N_{\text{Sl}} r^{2k} e^{-2\gamma r}, \quad (2)$$

где константа N_{Sl} нормирует распределение плотности на число электронов на оболочке, а постоянные $\gamma = \sqrt{2m_e I_Z / \hbar^2}$ (I_Z – потенциал ионизации иона) и k задают энергию состояния и структуру волновой функции внешней оболочки иона. Данное распределение обладает максимумом, и, соответственно, позволяет по экспериментальным или другим расчетным данным для различных ионов подобрать такие параметры k и γ , которые определяют максимальную частоту (или минимальную длину волны) обрыва спектра.

Вблизи максимума в точке $r_{\text{max}} = k/\gamma$ слэтеровское распределение для упрощения вычислений можно аппроксимировать гауссовским профилем

$$n_G(r) = \frac{N_G}{(2\pi)^{3/2} \Delta r^3} e^{-\frac{(r-r_{\text{max}})^2}{2\Delta r^2}} = n_{\text{Sl}}(r_{\text{max}}) \cdot e^{-\frac{(r-r_{\text{max}})^2}{2\Delta r^2}}, \quad (3)$$

где N_G – нормировочная постоянная для числа электронов на данной оболочке, $\Delta r = \sqrt{k/2\gamma^2}$ – ширина гауссовского распределения.

Тогда удельные спектральные потери для отдельного иона, которые можно выразить через сечение фотопоглощения $\sigma_{\text{ph}}(\omega)$:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{N_e N_Z d\omega} &= \square \omega \frac{\omega^2}{\pi^2 c^2} \frac{d\sigma_{\text{ph}}(\omega)}{d\omega} = \\ &= \square \omega \int \frac{2e^2}{m_e c^3} \omega^2 n(r) \delta(\omega - \omega_p(r)) d^3 r = \frac{4\square}{c^3} \omega^4 r_\omega^2 \left| \frac{n'(r_\omega)}{n(r_\omega)} \right|, \quad (4) \end{aligned}$$

где r_ω определяется из решения уравнения $\omega = \omega_p(r)$. Тогда, после проведения всех преобразований и интегрирования (4) с ап-

паратной функцией предполагаемого спектрометра, удельные спектральные потери имеют вид

$$\frac{dQ}{N_e N_Z d\omega} = \frac{2\pi}{c^3} \int d\omega' \omega'^4 \Delta r \left[\frac{r_{\max}^2 + 4\Delta r^2 |\ln(\omega'/\omega^*)|}{\sqrt{|\ln(\omega'/\omega^*)|}} \right] \frac{1}{\delta_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\omega-\omega')^2}{2\delta_w^2}}, \quad (5)$$

где $\delta_w = 0.01$ – полуширина аппаратной функции предполагаемого спектрометра. Далее необходимо усреднить их по функции распределения по зарядовым состояниям при данной температуре.

. Результаты

В данной работе проведены расчеты квазиконтинуума вольфрама в интервале излучения 1-10 эВ (100-200 нм) при температуре 1 и 2 эВ, которые являются нижним пределом температуры в районе диверторной плазмы. Данные по ионизационному балансу взяты из работы [1]. Параметры для слэторовского распределения были подобраны для нескольких электронных оболочек в атоме и ионах WI-WIV с использованием базы данных NIST.

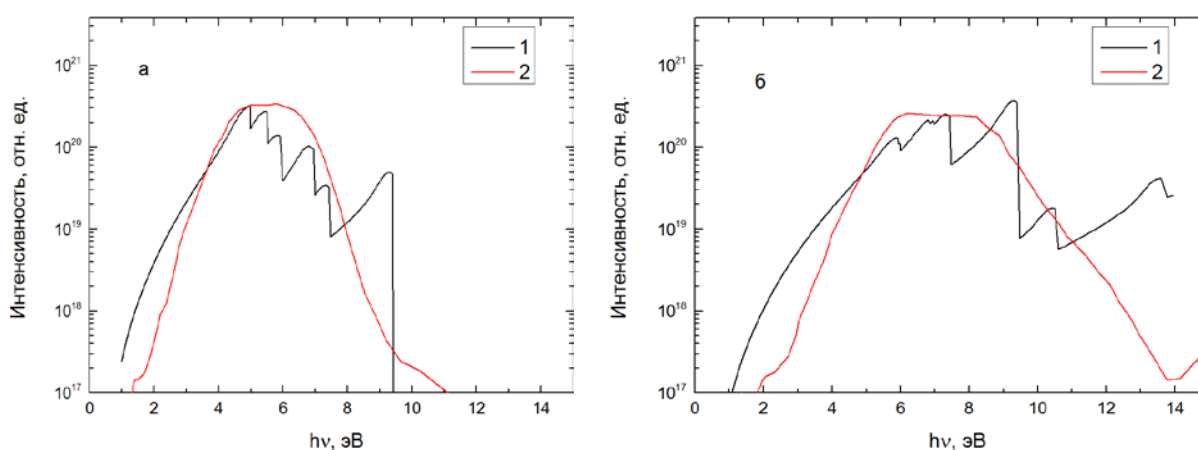


Рис. 1. Квазиконтинуум W при температуре: а) $T_e=1$ эВ. б) $T_e=2$ эВ. 1) – расчет в модели Слэтера (5); 2) – данные [1].

На рисунке 1 представлено сравнение спектров вольфрама, рассчитанных в статистическом подходе, с данными работы [1], полученными в модели CFG-AVE с использованием спектраль-

ного распределения УТА. Данный подход также оперирует с подбором некоторого числа электронных конфигураций. Из рисунков видно, что статистическая модель позволяет воспроизвести форму квазиконтинуума.

Литература

1. Abdallah Jr J., Colgan J., Clark R.E.H. et al. A collisional-radiative study of low temperature tungsten plasma // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. №44. 2011. P. 075701.
2. Peyrusse O., Desgranges C., Forestier-Colleoni P., and Guirlet R. Tungsten ionization and emissivity in tokamak plasma conditions from the configuration average and unresolved transition array approach // Phys. Plasmas. №33. 2026. P. 013302.
3. Demura A.V., Leontyev D.S., Lisitsa V.S., Shurygin V.A. Statistical Model for Quasicontinuum of Heavy Ions in Hot Plasma // Plasma Phys. Rep. Vol. 46. №3. 2020. pp. 241-251.

MODELLING OF TUNGSTEN QUASICONTINUUM IN THE NEAR-WALL REGION OF TOKAMAK PLASMA

A.V. Demura, D.S. Leontyev*, V.S. Lisitsa, A.A. Mavrin

*NRC «Kurchatov Institute», Russia, Moscow, Academic Kurchatov sq., 1,
123182*

** leontievdmitiy@gmail.com*

This work simulates the tungsten spectrum in a low-temperature plasma, observed in the 100-300 nm wavelength range and called quasicontinuum. The statistical model of the local plasma frequency with an electron distribution based on the Slater model was used for the calculations. The obtained results allow us qualitatively to reproduce the tungsten spectrum behavior in this wavelength range.

Ключевые слова: quasicontinuum, tungsten, statistical model, low-temperature plasma, heavy ions, spectrum.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЫ КОРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

В.О. Дряхлов¹, И.Г. Шайхиев¹, М.Ф. Галиханов^{2,*}

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

²Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А

* mgalikhanov@yandex.ru

В работе рассмотрены результаты экспериментов по разделению водонефтяных эмульсий различными полимерными мембранами с приведенными значениями эффективности. Так же представлены результаты по определению смачиваемости ацетат целлюлозных мембран. Дано теоретическое обоснование.

Ключевые слова: коронный разряд, полимерные мембраны, водонефтяная эмульсия, защита окружающей среды.

Введение

Среди физических методов модификации полимерных материалов коронный разряд выделяется как технологичный и эффективный инструмент направленного изменения свойств поверхности. В задачах разделения стойких водонефтяных эмульсий ключевой проблемой остается низкая селективность и быстрое загрязнение стандартных мембран в процессе концентрационной поляризации. Обработка коронным разрядом позволяет создавать на поверхности полимера высокоэнергетические функциональные группы без нарушения его объемной структуры. Это воздействие радикально меняет смачиваемость: гидрофобная поверхность может приобретать гидрофильные свойства, необходимые

для пропускания воды и задержки нефти. Варьируя параметры разряда – напряжение, время обработки – возможно достичь необходимых эксплуатационных характеристики. В результате достигается не только повышение устойчивости к загрязнению, но и увеличение селективности разделения при сохранении проницаемости.

В настоящей работе представлены данные о влиянии режимов обработки коронным разрядом на эффективность разделения модельных водонефтяных эмульсий на различных полимерных мембранах.

Объекты и методы исследования

В продолжение работ [1-5] эксперименты проводились на лабораторной мембранной установке, работающей в тангенциальном режиме. В качестве разделяемой среды использовались модельные эмульсии на основе нефти различного состава с применением ПАВ в качестве стабилизатора: нефть (девонская) – 1-5 %, дисперсионная среда – вода. Использовались мембраны из полисульфонамида (ПСА), полиакрилонитрила (ПАН), ацетата целлюлозы (АЦ) и полиамида (ПА) с размером пор 0,01-0,30 мкм. Для повышения устойчивости к замасливанью фильтры предварительно обрабатывались плазмой коронного разряда в атмосфере воздуха в течение 1-5 мин при напряжении коронирования 5-35 кВ.

Результаты и их обсуждение

На основании экспериментальных данных сформирована сводная таблица 1 по лучшим значениям эффективности разделения водонефтяной эмульсии.

Таблица 1. Лучшие значения эффективности по апробируемым мембранам

Мембрана	Параметры коронного разряда	Вид эмульсии	Эффективность, % (нативная мембрана)
ПСА 0,1 мкм	$U = 25 \text{ кВ}$ $t = 5 \text{ мин}$	ВНЭ, девонская нефть 3%	90,6 (88,0)
ПАН 0,01 мкм	$U = 15 \text{ кВ}$ $\tau = 1,0 \text{ мин}$	ВНЭ, девонская нефть 3%	98,9 (96,3)
ПА 0,2 мкм	$U = 15 \text{ кВ}$ $\tau = 5 \text{ мин}$	ВНЭ, девонская нефть 1,5%	94,7 (75,2)
АЦ 0,2 мкм	$U = 15 \text{ кВ}$ $\tau = 5 \text{ мин}$	ВНЭ, девонская нефть 5%	99,3 (80,0)

На основании представленных данных в таблице 2 показано, что наибольшей эффективностью обладает модифицированная АЦ мембран – 99,3%, из необработанных ПАН фильтр – 96,3%.

Выявленное повышение эффективности в рамках работ по плазменной модификации объясняется повышением гидрофильности фильтров в результате воздействия коронного разряда. Так, например для наиболее эффективной АЦ мембраны краевой угол смачивания дистиллированной водой после модификации снижается с $72,5^\circ$ до $64,6^\circ$ (рисунок 1).

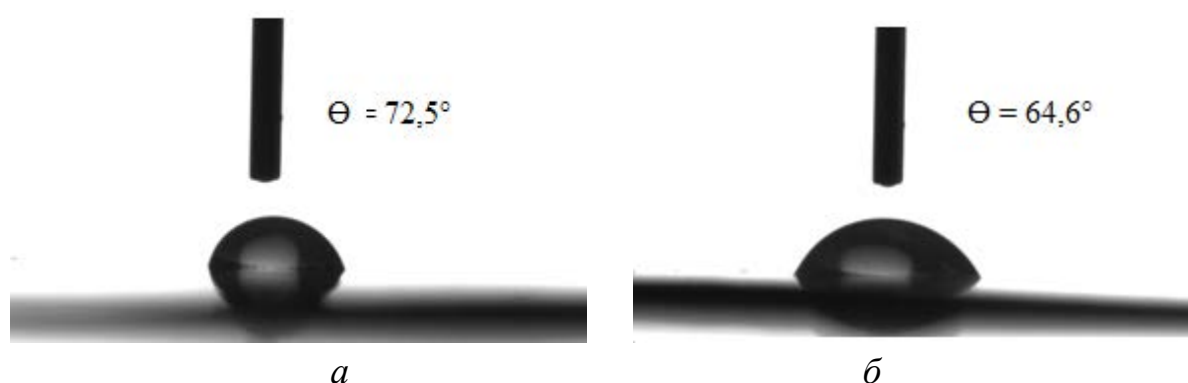


Рисунок 1. Изображения капли дистиллированной воды с соответствующими значениями краевого угла смачивания исходной (а) и коронно-обработанной (б) АЦ мембран.

Образующиеся при коронном разряде ионы, ускоренные электрическим полем, называются ионным ветром, и они, достигая образца, взаимодействуют с полимером. Некоторые из них рекомбинируются на поверхностях материалов, вызывая в них химические изменения, тогда как оставшиеся ионы проникают в объем материала, попадая в ловушки. Некоторые из инжектированных зарядов могут быть высвобождены возбужденными молекулами, образованными коронным разрядом, и перенесены в объем материала во внутреннее электрическое поле, связанное с инжектированным зарядом. Корона переменного тока в воздухе характеризуется высокой концентрацией групп $-O-$, $HO-O-$, H_2O_2 и O_3 и относительно низкой концентрацией $-OH$ групп. Однако, с ростом относительной влажности, содержание $-OH$ групп растет при уменьшении $-O-$ группировок и O_3 . Если происходит зарядка в положительной короне на воздухе, то преобладают ионы типа $(H_2O)_nH^+$, и число n увеличивается с ростом относительной влажности. В случае низкой относительной влажности, доминируют $(H_2O)_nNO^+$ и $(H_2O)_n(NO_2)^+$ группы. В случае зарядки в отрицательной короне на воздухе, превалируют ионы CO_3^- , тогда как при 50% относительной влажности 10 % всех ионов составляют ионы типа $(H_2O)_n$.

Выводы

Таким образом, воздействие вышеназванных заряженных частиц с последующей химической модификацией инициируют на поверхности полимерных мембран процессы окисления и травления, что в совокупности приводит к интенсификации ультраfiltrации водонефтяных эмульсий.

Литература

1. Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О., Фазуллин Д.Д. Мембранная очистка воды, содержащей отработанные смазочно-охлаждающие жидкости // Черные металлы. 2020. № 7. С. 46-50.

2. Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F., Fazullin D.D., Mavrin G.V. Separation of oil emulsion using polyacrylonitrile membranes, modified by corona discharge // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Т. 11. № 5. С. 1160-1164.

3. Bonev B.S., Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О. Применение мембран для обработки флуидов (потоков) 1. морфология полимерных мембран // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 8. С. 181-185.

4. Фазуллин Д.Д., Фазуллина Л.И., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О. Композитные мембраны с поверхностным слоем из ацетата целлюлозы для водоочистки и водоподготовки // *Перспективные материалы*. 2021. № 2. С. 32-40.

5. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Savelyeva A.V., Savelyev S.N., Dryakhlov V.O., Shaikhiev I.G. Sewage treatment from heavy metal ions by the method of deposition, using sulfur-alkaline wastewater as a reagent // *International Journal of Green Pharmacy*. 2017. Т. 11. № 4. С. S831-S835.

THE USE OF CORONA DISCHARGE PLASMA IN THE PROCESSING OF POLYMER MEMBRANES FOR THE SEPARATION OF PETROLEUM EMULSIONS

V.O. Dryakhlov¹, I.G. Shaikhiev¹, M.F. Galikhanov^{2,*}

¹*Kazan National Research Technological University,
68 K. Marx str., Kazan, 420015, Russia*

²*Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia*

** mgalikhanov@yandex.ru*

The paper considers the results of experiments on the separation of water-oil emulsions by various polymer membranes with the specified efficiency values. The results on determining the wettability of cellulose acetate membranes are also presented. A theoretical justification is given.

Key words: corona discharge, polymer membranes, water-oil emulsion, environmental protection.

ОБЪЕМНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ВЧ-РАЗРЯДЕ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

В.С. Желтухин^{1,*}, И.Ш. Абдуллин², А.В. Чинилкин¹

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, 420015, Казань, ул. К.Маркса, 68

²ООО «Плазма-ВСТ», 420081, Казань, ул. Курская, 27, оф. 1000

* vzheltukhin@gmail.com

В работе приведено обоснование физического механизма объемной модификации пористых диэлектрических материалов в ВЧ-разрядах пониженного давления (0,1-1,0 Торр). Изменение характеристик объемных свойств обусловлено динамикой слоя положительного заряда и поверхностного заряда образца.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, пониженное давление, слой положительного заряда, взаимодействие с материалами, пористый диэлектрик, физический механизм, математическая модель, энергия ионов, плотность ионного тока

Введение

В начале 2000-х установлено, что при обработке кожевенных и текстильных материалов в плазме ВЧ-разрядов пониженного давления модификации подвергаются не только не только поверхностных свойства, такие как смачиваемость, гидрофильность, морфология и др., но и характеристики объемных свойств: капиллярность, прочность на разрыв и др. [1]. Ключевым экспериментом, подтвердившим объемное воздействие ВЧ-плазмы явилась обработка пакетов из 3-6 сложенных вместе образцов натуральной кожи или ткани. Исследование образцов показало, что гидрофильность увеличилась как у наружных поверхностей, так и у внутренних. Последующие экспериментальные исследо-

вания различных материалов, включая органические и неорганические, многократно подтвердили это объемный характер обработки. Целью настоящей работы является выяснение и обоснование физического механизма объемной модификации пористых материалов.

Физический механизм модификации

Известно, что поверхность образца в плазме приобретает отрицательный заряд. Это означает, что образец, размещенный в межэлектродном промежутке, становится дополнительным электродом, потенциал которого $V_{fl} = -\frac{kT_e}{2e} \ln\left(\frac{m_i}{\gamma m_e}\right) \approx 6,3 kT_e = 6,3 - 18,9$ эВ. Здесь T_e – электронная температура, m_i, m_e – массы ионов и электронов, γ – постоянная, учитывающая распределение ионов в слое. Кроме того, вследствие колебаний электронного газа в ВЧ электрическом поле, у поверхности образца создается слой положительного заряда (СПЗ) [1]. Потенциал СПЗ в ВЧЕ-разряде пониженного давления составляет 50-100 В, в зависимости от вида газа, давления, вкладываемой в разряд мощности, расхода газа. Поэтому ионы плазмы ускоряются в СПЗ и формируют поток с энергией 50–100 В и плотностью ионного тока 0,5–1.5 А/м².

Ионный поток на поверхность образца постоянен в течение периода колебания ВЧ-поля, в то время как электронный поток к электродам модулируется во времени, так как электроны поступают на поверхность только во время коротких фаз коллапса СПЗ. В течение остальной части периода ВЧ-поля электронный поток к электроду равен нулю, поскольку высокий потенциал пристеночного слоя V_{fl} препятствует попаданию электронов на электрод в течение большей части периода ВЧ-поля ($V_{fl} \geq kT_e$). Вследствие этой динамики плотность поверхностного заряда σ_{fl} изменяется в течение периода ВЧ-поля: $\sigma_{fl} = \sigma_{fl}(t)$. Поверхностный заряд индуцирует в образце электрическое поле $E_\sigma = \sigma_{fl}/4\pi\epsilon_0\epsilon_{обр}r^2$, где

ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_{\text{обр}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала образца, r – расстояние до поверхности образца.

Аналогично, толщина и потенциал СПЗ циклически изменяются во времени, следуя за изменениями потенциала нагруженного электрода.

Обработка материалов в ВЧЕ-разряде пониженного давления производится при размещении образца в середине межэлектродного промежутка, а не на поверхности электрода. Поэтому поверхностный заряд и СПЗ образуются на обеих сторонах образца. При этом в силу того, что напряженность электрического поля – векторная величина, а нормали к противоположащим сторонам образца направлены противоположно друг другу, то потенциалы СПЗ с разных сторон образца изменяются в противофазе друг с другом. Разность потенциалов создает внутри образца переменное электрическое поле напряженностью $E_{sp} = \frac{2(V_{fl,1} - V_{fl,2}) \sin 2\omega t}{\varepsilon_{\text{обр}} h_{\text{обр}}}$.

Здесь $V_{fl,1}, V_{fl,2}$ – мгновенные потенциалы противоположных сторон образца, ω – круговая частота электромагнитного поля, $h_{\text{обр}}$ – толщина образца.

При толщине образца $h_{\text{обр}} \sim 10^{-3}$ м внутри него создается переменное электрическое поле $E_p = E_\sigma + E_{sp} \sim 10^9 - 10^{10}$ В/м. Это электрическое поле поляризует материала образца, вследствие чего на внутренней поверхности пор создается связанный электрический заряд $\sigma'(\omega t, \mathbf{r}_p) = \varepsilon_0(\varepsilon_{\text{обр}} - 1)\mathbf{E}_{sp}(\omega t, \mathbf{r}_p) \cdot \mathbf{n}_p / \varepsilon_{\text{обр}}$ и инициируя автоэлектронную эмиссию электронов. Здесь $\mathbf{r}_p$ – локальная координата точки на поверхности поры, $\mathbf{n}_p$ – нормаль к поверхности поры.

Эмиттированный электрон движется к противоположной стороне поры, приобретая энергию $W_e = e|\Delta\varphi|$, где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов в поре. Достигнув противоположной стороны, электрон может вызвать электронно-стимулированную десорбцию

ионов (ЭСДИ). Эти ионы, в свою очередь, ускоряются к противоположенной стороне поры и приобретают энергию $W_i = e|\Delta\varphi|$. Этой энергии и энергии рекомбинация достаточно для разрыва химических связей в молекулах на внутренней поверхности поры и вторичной ионно-электронной эмиссии (ВИЭ).

Каскад процессов автоэлектронной эмиссии электронов, ЭСДИ и ВИЭ электронов интерпретируется как пробой пористого объема. Бомбардировка внутренней поверхности пор ионами, возникшими в результате ЭСДИ, и их рекомбинация приводит к модификации показателей объемных свойств материала (капиллярность, прочностные характеристики и др.)

Математическая модель

Математическая модель описанного процесса состоит из двух сопряженных задач: система краевых задач описывающая ВЧЕ-разряд пониженного давления с образцом в межэлектродном промежутке и система задач для описания движения частиц в поре внутри образца.

Модель невозмущенного ВЧ-емкостного разряда пониженного давления построена в работе [2], она может быть дополнена путем введения в нее образца заданной толщины. Для описания движения заряженных частиц используется система уравнений

Движение заряженных частиц в электрическом поле описывается системой начальных задач Коши

$$\frac{d\mathbf{v}_{i,e}}{dt} = \pm \frac{e\mathbf{E}_{\text{св}}}{4\pi\epsilon_0 m_{i,e}}, \quad \frac{d\mathbf{r}_{i,e}}{dt} = \mathbf{v}_{i,e},$$

$$\mathbf{v}_{i,e}(0) = \mathbf{v}_{i,e}^0, \quad \mathbf{r}_{i,e}(0) = \mathbf{r}_{i,e}^0,$$

где $\mathbf{v}_{i,e}(x, y, z)$ – вектор скорости иона или электрона, $\mathbf{r}_{i,e}(x, y, z)$ – радиус-вектор, $m_{i,e}$ – массы частиц, t – время, $\mathbf{r}_{i,e}^0, \mathbf{v}_{i,e}^0$ – начальные положение и скорость частиц, знак «+» соответствует иону, знак «–» электрону.

Результаты расчета и заключение

Результаты расчетов показали, что при обработке кожевеного материала толщиной $h_{\text{обр}} = 0,5$ мм в аргоновой плазме ВЧЕ-разряда при $f = 13,56$ МГц, $p = 13,3 - 133$ Па, мощности разряда $0,5-5$ кВт, плавающий потенциал образца составляет $V_{fl} = 50 - 000$ В, электрическое поле $E_p = 3 \cdot 10^9 - 2 \cdot 10^{10}$, энергии заряженных частиц в поре $W_{e,i} = 5 - 9$ эВ. Вместе с энергией рекомбинации ионов основных элементов коллагена энергия воздействия на внутренние поверхности пор составляет $16,3-22,6$ эВ – достаточно для активации коллагена.

Так как результат взаимодействия пористого тела, согласно описанному механизму, зависит от относительной диэлектрической проницаемости материала (для большинства диэлектриков $\epsilon_{\text{обр}} = 3 - 7$), толщины образца, размеров пор и свойств СПЗ, то процессы в объеме пор протекают одинаково для разных материалов. Таким образом, объемная обработка пористых материалов в ВЧЕ-разряде пониженного давления происходит благодаря разности потенциалов СПЗ на противоположных поверхностях образца и динамике отрицательного заряда поверхности, возникающим вследствие колебаний электронного газа в ВЧ-поле.

Литература

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения: Казань, 2000.
2. Zheltulhin V.S., Dubrovin V.T., Chebakova, V.Ju. Radio-Frequency Discharge at Low Pressure: a Non-Local Problem Statement Approach // Procedia Engineering. 2016. No. 150. Pp. 1041 – 1045.

VOLUMETRIC MODIFICATION OF POROUS DIELECTRICS IN RADIO-FREQUENCY DISCHARGE AT INTERMEDIATE PRESSURE

V.S. Zheltukhin^{1,*}, I.Sh. Abdullin², A.V. Chinilkin¹

¹*Kazan National Research Technological University
420015, Kazan, K. Marksa St., 68*

²*Plasma-VST LLC
420081, Kazan, Kurskaya St., 27, office 1000*

** vzheltukhin@gmail.com*

This paper presents a rationale for the physical mechanism of volume modification of porous dielectric materials in low-pressure (0.1-1.0 Torr) RF discharges. Changes in bulk properties are due to the dynamics of the positive charge layer and surface charge of the sample.

Keywords: radio-frequency discharge, intermediate pressure, positive charge sheath, interaction with materials, porous dielectric, physical mechanism, mathematical model, ion energy, ion current density

УДК: 537.52

МЕТОДИКА ВРЕМЯРАЗРЕШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ПОТОКОВ ИОНОВ ИЗ ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПРИ ПОМОЩИ СПЕКТРОМЕТРА ТОМСОНА С ЗАТВОРОМ

Ю.А. Земсков*, И.В. Уйманов

*Институт электрофизики УрО РАН
620105, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106*

** zemskov@iep.uran.ru*

Аннотация статьи. Для анализа ионного состава плазмы короткой (2–5 мкс) вакуумной дуги применялся усовершенствованный спектрометр Томсона с автоматизированной цифровой регистрацией и обработкой сигнала. Также спектрометр был дополнен электростатическим затвором. Затвор имел импульсное управление с регулируемой длительностью импульса и регулируемой задержкой относительно начала разряда. Это позволяло регистрировать выбранные части ионного потока, соответствующие определенным временным промежуткам. При сравнении интенсивностей частичных сигналов определялись дифференциальные интенсивности для различных фракций ионного потока. В результате можно получить данные об эволюции ионного состава плазмы за время горения разряда.

Ключевые слова: вакуумная дуга, ионы, масс-зарядовый состав, временное разрешение, спектрометр Томсона, медь.

Введение

Разрабатываемая в данной работе методика предназначена для анализа плазмы коротких слаботочных разрядов. Основная часть методики - применение спектрометра Томсона. Этот метод

основан на прямой регистрации заряженных частиц и имеет высокую чувствительность. Более подробно особенности данного спектрометра изложены в [1]. В ходе данной работы проводился сравнительный анализ зарядового и энергетического состава ионов катодного материала в плазме вакуумного дугового разряда в различные промежутки времени от начала разрядного процесса. Для этого Томсоновская спектрометрия ионного потока была совмещена с методикой отсечки части этого потока затвором с управляемыми временными параметрами срабатывания.

Установка

Схема основных узлов установки приведена на Рис.1. Эксперимент проводился в высоком вакууме порядка 10^{-6} Па. Разряд происходил между кольцевыми медными электродами, расположенными на расстоянии около 800 мкм. Дуговой разряд питала LC-линия с квазипрямоугольным импульсом длительностью около 3.5 мкс. Ток дуги имел величину около 40 А. Полость анода имела эффективную длину около 50 мм. На ее выходе располагался электростатический экстрактор из двух сеток с расстоянием 1.5 мм между ними и напряжением экстракции около 1.6 кВ.

Ионы, ускоренные в экстракторе, могли попадать в спектрометр после обрезки пучка коллиматором. Между экстрактором и коллиматором был установлен плоскопараллельный электростатический затвор. При подаче напряжения между пластинами затвора ионы получали тангенциальную составляющую скорости, не позволяющую пройти сквозь апертуры коллиматора. Напряжение на затвор подавалось в виде прямоугольных импульсов с регулируемой длительностью и регулируемой задержкой относительно начала разряда.

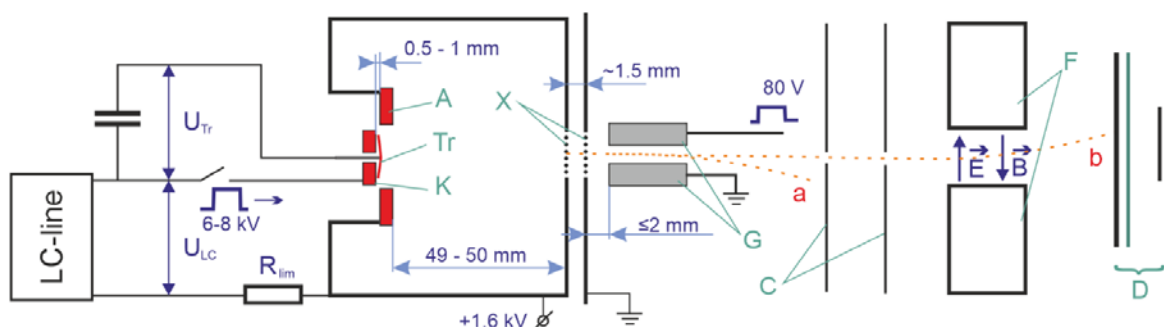


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. А – входное кольцо полого анода, Tr – триггер, К – катод, R_{lim} – токоограничивающий резистор, X – сетки экстрактора ионов, G – пластины электростатического затвора, C – коллиматор, F – полюсные наконечники дискриминатора спектрометра, D – детектор частиц, а – траектория ионов, отклоненных затвором, b – траектория ионов, прошедших в спектрометр.

Методика

Было выполнено несколько серий по несколько десятков разрядов при различных параметрах затвора. В первой части эксперимента импульс затвора запускался одновременно с разрядом. Длительность запирающего импульса увеличивалась между сериями с шагом 1–2 мкс от 1 до 16 мкс. При этом регистрировались только ионы, оказавшиеся у затвора по окончании запирающего импульса. Во второй части эксперимента длительность запирающего импульса была достаточно большой, чтобы отсечь все ионы. Начало импульса было задержано относительно начала разряда. Эта задержка увеличивалась с шагом 0.5–1 мкс от 2 до 10 мкс. В этом случае регистрировались только ионы, возникшие ранее определенного момента.

Дискретизация спектров по энергии определялась разрешением ПЗС-матрицы, и погрешность оценки энергии могла достигать до нескольких десятков эВ в случае высокоэнергетических частиц. Поэтому все дискретные точки, соответствующие различным энергиям, были объединены в группы, охватывающие диапазоны энергий. При обработке данных для каждой такой дискретной точки определялось время дрейфа от разрядника до экстрактора. По этой величине и параметрам затвора определялся

набор характерных времен для разбиения всей длительности разрядного процесса на участки. Разбиения отличались для разных энергий. Для удобства производился пересчет интенсивностей сигнала на произвольные временные диапазоны. По данным об интенсивностях сигнала при различных параметрах затвора определялась интенсивность сигнала, соответствующая каждому временному участку для ионов данной энергии. Отношение интенсивности сигнала на временном диапазоне к его величине дает плотность распределения сигнала. По этим плотностям был выполнен пересчет распределения сигнала на более наглядные равномерные диапазоны времени предполагаемой генерации частиц.

Результаты

Диаграммы распределения интенсивностей сигналов ионов по оценочному времени генерации плазмы приведены на Рис.2. Энергия, приобретаемая в экстракторе, вычтена из измеренных значений.

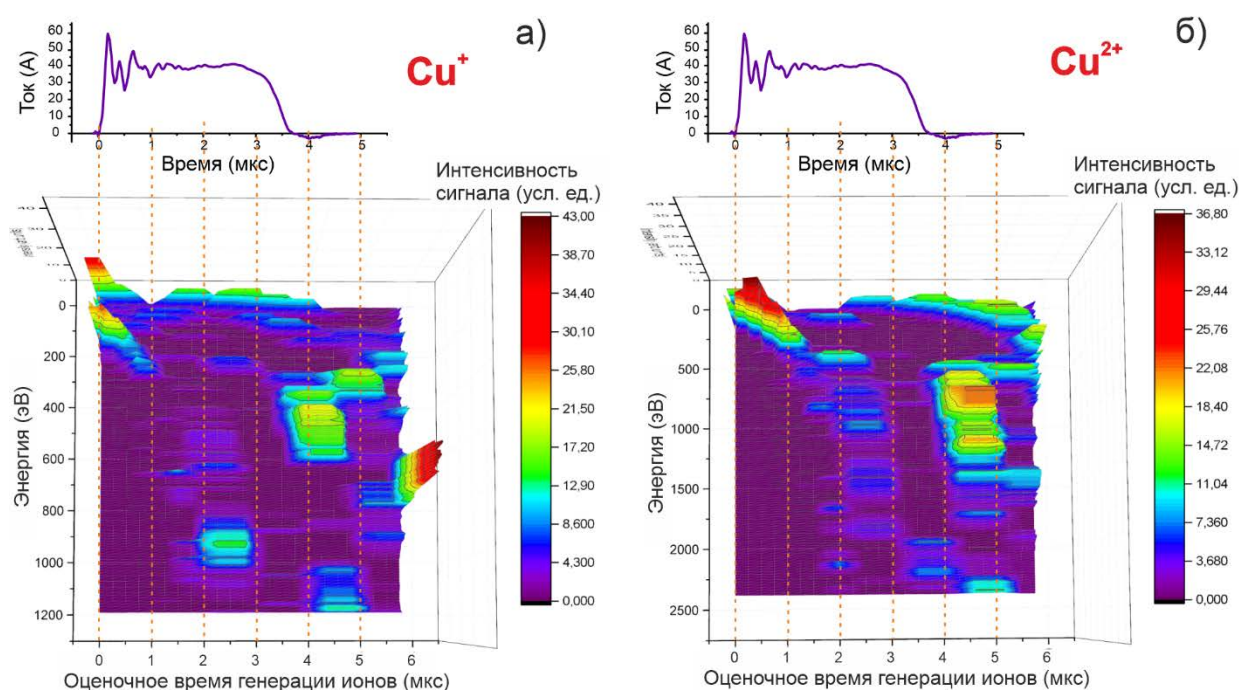


Рис. 2. Пример осциллограммы тока дуги (вверху) и оценки времени генерации для ионов меди с различной энергией и кратностью ионизации (внизу)

Ионы меди с энергией менее 50 эВ были представлены главным образом однозарядной фракцией. Они генерировались в течение всего разряда. Высокоэнергетические потоки ионов имеют выраженный разрыв времени генерации. Первую часть таких ионов можно связать с фазой начала разряда. Вторая же часть с энергиями порядка 400–700 эВ на единицу заряда связана с финальной стадией процесса. Средний заряд высокоэнергетического потока в начальной стадии разряда растет и достигает значения около 2.4 через 1.5 мкс от старта процесса. В то же время средний заряд низкоэнергетической части ионного потока остается практически неизменным 1.5–1.6 до конца импульса (3.5 мкс).

Заключение

Была испытана методика исследования масс-зарядового и энергетического состава ионного потока с временным разрешением. Исследована плазма вакуумной дуги с медным катодом. Показано появление фракций с энергиями до нескольких сотен эВ и средним зарядом до 2.6. Удалось разделить потоки высокоэнергетических ионов, которые можно связать с начальной и конечной стадиями разряда. Генерация таких ионов в начальной стадии, вероятно, связана с неустойчивым режимом горения разряда. В то время как ионы с энергиями до 50 эВ и средним зарядом 1.5–1.6 возникают в течение всего разрядного процесса

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, грант № 23-19-00360-П

Литература

1. Yu.A. Zemskov and I.V. Uimanov, Investigation of Factors Influencing the Charge-state Composition of the Cathode Material Ions in the Plasma of Low-current Vacuum Arc // Proc. 7th Int. Congr. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia, 2020. P. 185-189.

A METHOD OF TIME-RESOLVED ANALYSIS OF ION FLUXES FROM A VACUUM ARC USING A GATED THOMSON SPEC- TROMETER

Yu. A. Zemskov*, I. V. Uimanov

*¹Institute of Electrophysics UB RAS
620105 Yekaterinburg, 106 Amundsen st.*

*e-mail: zemskov@iep.uran.ru

Abstract. An improved Thomson spectrometer with automated digital signal recording and processing was used to analyze the ion composition of short-duration (2–5 μ s) vacuum arc plasma. For this study, the spectrometer was supplemented with an electrostatic gate. The gate had pulse control with adjustable pulse duration and adjustable delay relative to the discharge start. The control accuracy was no worse than 100 ns. The gate allowed for the recording of selected portions of the ion flux corresponding to specific time intervals. By comparing the intensities of various partial signals, differential intensities were determined for various energy and mass-charge fractions of the ion flux. The analysis took into account the ion transit time between the discharge zone and the shutter. This technique allows one to obtain data on the evolution of the plasma's ion composition during the discharge.

Key words: vacuum arc, ions, mass-charge composition, time resolution, Thomson spectrometer, copper.

ЭЛЕКТРЕТНОЕ СОСТОЯНИЕ В ВОЛКНИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

С.В. Зотов¹, М.А. Коваленко¹, В.Ю. Гарбарук¹, В.А. Гольдаде¹,
М.Ф. Галиханов^{2,*}

¹Гомельский Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, 246050, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 32А

²Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, 420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А

* mgalikhanov@yandex.ru

Исследовано электретное состояние в волокнистых материалах, полученных методом meltblowing из смесей полифениленсульфида и полипропилена. Установлено существенное увеличение эффективной поверхностной плотности заряда и максимальных значений термостимулированных токов по сравнению с волокнистыми материалами из исходных полимеров. Методом ИК-спектроскопии обнаружено появление новых полос поглощения в смесевых материалах, свидетельствующее об образовании активных групп, которые могут выступать в качестве энергетических ловушек носителей заряда.

Ключевые слова: смеси полифениленсульфида и полипропилена, meltblowing, поляризация, электретный заряд, ИК-спектры.

Введение

Одним из эффективных и, в то же время, экономически выгодных способов очистки текучих сред от твердых частиц и аэрозолей является использование нетканых полимерных волокнисто-пористых материалов (ПВМ), высокая фильтрующая способность

которых удовлетворяет современным требованиям инженерной экологии [1]. Разнообразие волокнообразующих полимеров позволяет варьировать характеристики получаемых изделий и подбирать решения исходя из требований очистки. Наиболее часто используются полиолефины как распространенные полимеры, несложные в переработке и последующей утилизации [2, 3].

Материалы, полученные методом meltblowing (выдувание расплава), в настоящее время являются основой для масок, респираторов и иных воздушных фильтров, используемых как для индивидуальной защиты, так и для очистки воздуха в помещениях вследствие их высокой пористости, малого диаметра волокна и большой удельной площади поверхности [4].

Повышения эффективности фильтрации полимерными волокнистыми материалами добиваются различными методами, в частности, переводом в электретное состояние обработкой в плазме коронного разряда. Электретные нетканые meltblowing материалы играют все более важную роль в борьбе с загрязнением воздуха из-за их высоких фильтрационных характеристик (вследствие их высокой способности к электростатической адсорбции) и относительно низкого сопротивления потоку [5, 6].

Для очистки сред, характеризующихся высокими температурами или агрессивностью к «классическим» полимерам, используют полимерные материалы более сложного химического строения и повышенной термостойкости, в частности на основе полифениленсульфида [7]. Есть данные, что смеси полимеров могут обладать повышенными электретными характеристиками по сравнению с отдельными полимерами [8]. Поэтому изучение электретного состояния в ПВМ на основе полифениленсульфида и смесей полимеров на его основе представляет научный и практический интерес.

Объекты и методы исследования

В работе использовали листовые материалы (толщина листа 4 мм), полученные методом *meltblowing* (МБ) из смесей полифениленсульфида (ПФС) и полипропилена (ПП) с различным содержанием ПП, масс. %: 0; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15. Средний диаметр волокон измеряли с помощью оптического микроскопа MED D45T (Levenhuk Optics Ltd., США), эффективность фильтрации и коэффициент пропускания определяли на стенде СИГФ-1 (ОДО «Научно-технический центр ЛАРТА», Беларусь). Электреты получали в плазме отрицательного коронного разряда напряженностью 25 кВ/см при комнатной температуре. Электретные свойства образцов оценивали двумя способами: по изменению эффективной поверхностной плотности заряда (ЭППЗ) и по токам термостимулированной деполяризации (ТСД), полученным методом термоактивационной токовой спектроскопии [9]. Полярность и величину ЭППЗ определяли с помощью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1 (ОАО «МНИПИ», Беларусь). Химическую структуру смесевых МБ материалов оценивали методом инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием Nicolet 5700 FT-IR (Thermo Electron Corporation, США).

Результаты и их обсуждение

ЭППЗ (σ) – одна из основных характеристик электретов, которая характеризует как величину поверхностного заряда, так и распределение объёмного заряда по объёму образца. На диаграмме (рис. 1) видно, что обработка в плазме коронного разряда приводит к существенному увеличению ЭППЗ (в 5-6 раз, правые столбцы) у волокнистых МБ композитов на основе ПФС, содержащих ПП, по сравнению с чистыми полимерами, а также по сравнению с технологическим зарядом (левые столбцы). При

этом величина заряда в композитных *МБ* образцах незначительно снижается со временем.

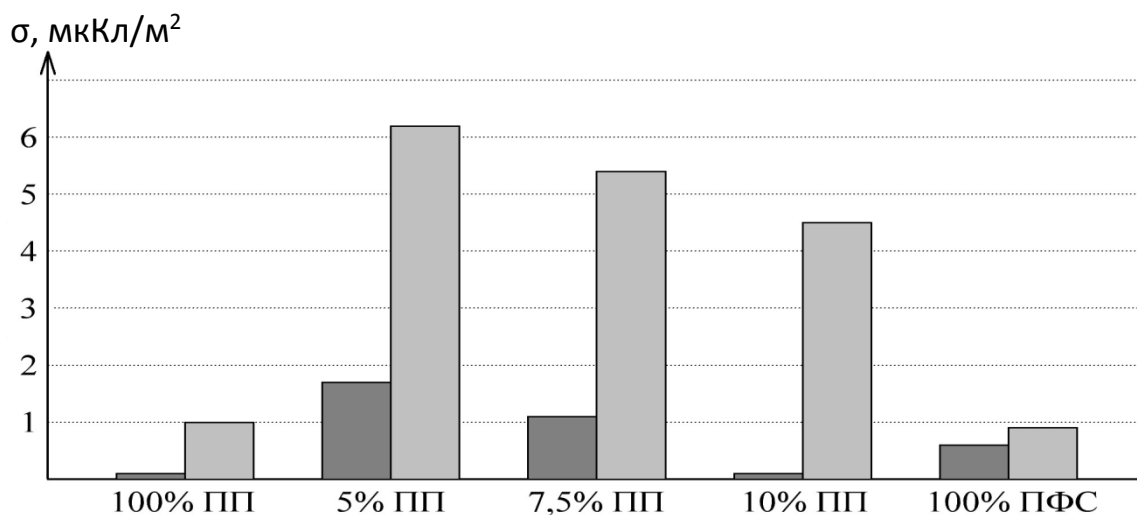


Рисунок 1. Величина ЭППЗ в волокнистых композитах ПФС в зависимости от содержания ПП: левый столбец – до обработки в коронном разряде, правый столбец – после обработки в коронном разряде

На спектрах ТСД (рис. 2, в) наблюдается резкий рост максимальных значений токов (на несколько порядков) у смесевых *МБ* композитов в сравнении с чистыми полимерами (ПФС и ПП, рис 2, а и б). При этом положение основных токовых пиков на температурной шкале примерно соответствует температурам плавления чистых полимеров, а токовый пик смесевых композитов сдвинут в область более высоких температур по отношению к чистому ПП.

На ИК-спектрах смесевых материалов (рис. 3) появляется группа полос поглощения в диапазоне между 2300 и 2400 см⁻¹, отсутствующая на спектрах *МБ* ПП и ПФС. Наблюдается рост оптической плотности этих полос при росте концентрации ПП до 10 %. Они не характерны также для исходных гранул ПП и ПФС. Положение новых полос поглощения соотносят с тройными (ацетиленовыми) или пространственно-затрудненными двойными связями между атомами углерода в цепи [10], хотя однозначной

интерпретации не приводится. Вероятно, в процессе *МБ* смесей происходит перекристаллизация обоих компонентов. Важно, что ПФС является полукристаллическим полимером с «двойственностью плавления кристаллической фазы» [11], что может свидетельствовать о разной кинетике при перекристаллизации ПФС в процессе *МБ*. В результате создаются условия для формирования новой промежуточной мезофазы, сочетающей свойства полимерных компонентов смеси.

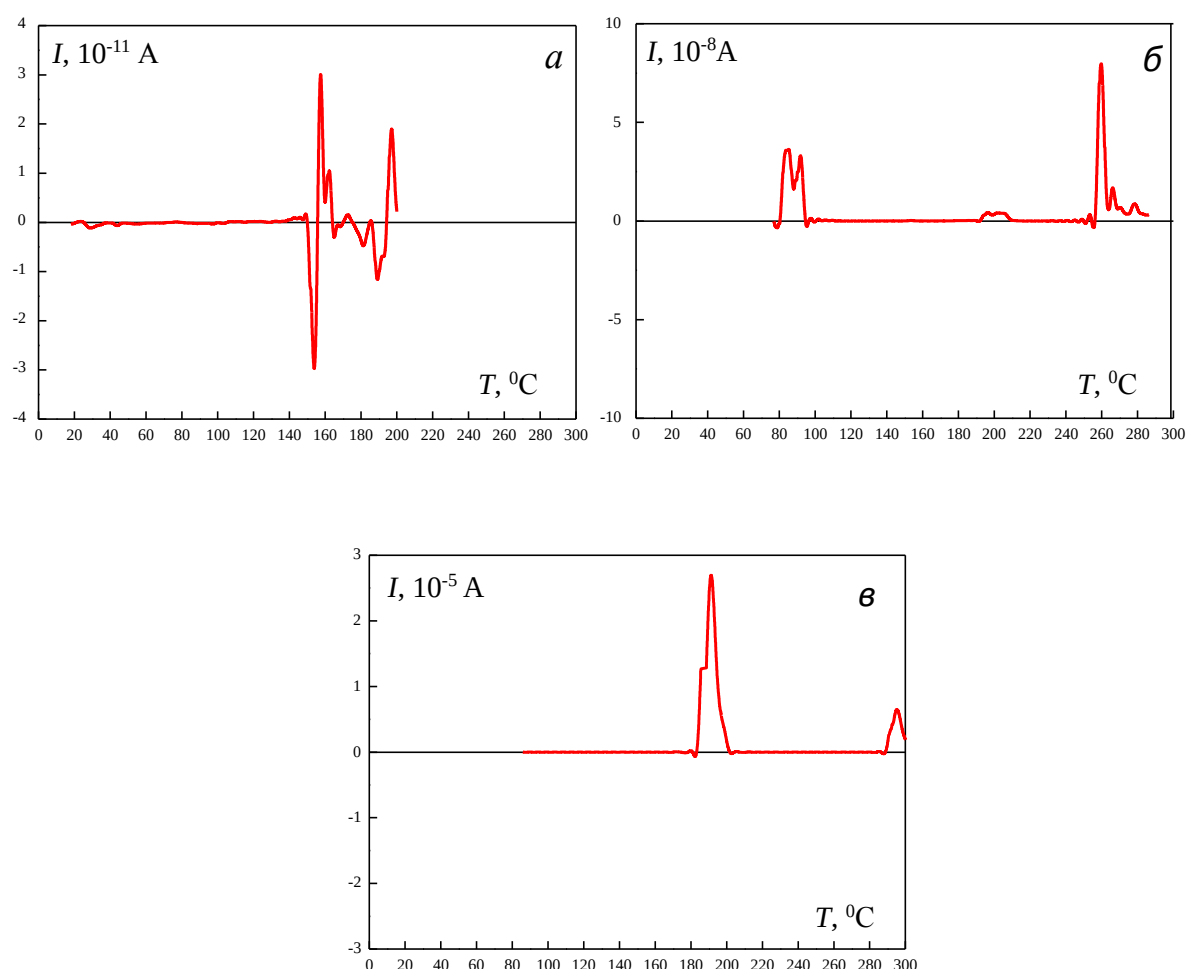


Рисунок 2. Спектры ТСД волокнистых *МБ* материалов: а – ПП; б – ПФС; в – композита ПФС+10%ПП



Рисунок 3. Фрагменты ИК-спектров композитов ПФС+ПП с возникшими полосами поглощения: 1 – 5% ПП; 2 – 10 % ПП

Можно предположить две возможные схемы изменения химического состава смесевых *МБ* волокон:

1) от макромолекул ПП при температурах *МБ* отщепляется водород с формированием ненасыщенных связей (двойных и тройных), водород далее связывается кислородом воздуха и в виде паров воды выводится из системы. Это объясняет рост интенсивности полос поглощения на ИК-спектрах с ростом концентрации ПП в смеси (рис. 2);

2) бензольные кольца ПФС при *МБ* могут подвергаться влиянию термоокисленного расплава ПП или кислорода нагретого воздуха, в результате чего в химической структуре ПФС происходит изменение конфигурации ароматических связей, и по энергии эти связи приближаются к «затрудненным двойным» или даже «тройным» ненасыщенным связям между атомами углерода.

Образование новых связей может служить причиной создания дополнительных энергетических ловушек для носителей заряда, что обуславливает усиление электретоного эффекта в полимерных *МБ* смесях ПФС+ПП и объясняет рост интенсивности максимумов характеристических токовых пиков ТСД.

Выводы

На основе впервые полученных спектров ТСД волокнистых материалов на основе смесей ПП и ПФС проведено сопоставление параметров, характеризующих электретный эффект, с вероятным изменением химического состава в МБ ПВМ. Для них установлено существенное увеличение эффективной поверхностной плотности заряда и максимальных значений термостимулированных токов по сравнению с волокнистыми материалами из исходных полимеров. Методом ИК-спектроскопии обнаружено появление новых полос поглощения в смесевых материалах, свидетельствующее об образовании активных групп, которые могут выступать в качестве энергетических ловушек носителей заряда.

Литература

1. Гольдаде В.А., Зотов С.В., Гарбарук В.Ю. и др. Волокнисто-пористые полимерные материалы для фильтрации воздуха и газов (обзор) // Полимерные материалы и технологии, 2025, Т. 11, № 1. С. 6-25.
2. Cheng S, Muhaiminul A.S., Yue Z, et al. Effect of temperature on the structure and filtration performance of polypropylene melt-blown nonwovens // Autex Res J. 2020. V. 21(2).
3. Pinchuk L., Goldade V., Makarevich A., Kestelman V. Meltblowing: equipment, technology, and polymer fibrous materials. Berlin: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2002, 212 p.
4. Goldade V., Garboruk V., Zotov S. Meltblowing as an effective technology of creating fibrous-porous materials for air and gas filtration // ISJ Theoretical & Applied Science, 2025, vol. 148 (08), pp. 55-66.
5. Thakur R., Das D., Das A. Study of charge decay in corona-charged fibrous electrets. Fibers Polym. 2014. V. 15. P. 1436–1443.
6. Chio H.J., Park E.S., Kim J.U. et al. Experimental study on charge decay of electret filter due to organic solvent exposure // Aerosol Sci. Technol., 2015. V. 49. P. 977-983.
7. Lai Y.-C., Lin Y.-C., Liao Y.-P., et al. Optimizing processing and formulation strategies for enhanced thermal and chemical stability of meltblown polyphenylene sulfide nonwovens // Polymer Eng. & Science. 2026. 1-10.

8. Галиханов М.Ф., Лучихина Т.А. Электретные свойства смесей полиэтилена высокой плотности и полистирола // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79, № 7. С. 1163-1167.
9. Гороховатский Ю.А. Термоактивационная спектроскопия (феноменологическая теория, экспериментальная методика, примеры применения): монография / Ю.А. Гороховатский. – Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2023. 160 с.
10. Сильверстейн Р., Вебстер Ф., Кимл Д. Спектрометрическая идентификация органических соединений: пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 557 с.
11. Ferrara J.A., Seferis J.C., Sheppard C.H. Dual-mechanism kinetics of polyphenylene sulfide (PPS) melt-crystallization // Journal of Thermal Analysis, 1994. Vol. 42. P. 467-484.

ELECTRET STATE IN FIBER MATERIALS BASED ON POLYPHENYLENE SULFIDE

**S.V. Zotov¹, M.A. Kovalenko¹, V.Yu. Garbaruk¹, V.A. Goldade¹,
M.F. Galikhanov^{2,*}**

²*V.A. Bely Metal-Polymer Research Institute of Belarus NAS,
32A Kirov str, Gomel, 246050, Republic of Belarus,*

²*Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia
e-mail: mgalikhanov@yandex.ru*

Abstract: The electret state of fibrous materials obtained by meltblowing blends of polyphenylene sulfide and polypropylene was studied. A significant increase in the effective surface charge density and max values of thermally stimulated currents was found compared to fibrous materials made from the original polymers. IR spectroscopy revealed the appearance of new absorption bands in the blended materials, indicating the formation of active groups that can act as energy traps for charge carriers.

Key words: polyphenylene sulfide and polypropylene blends, meltblowing, polarization, electret charge, IR spectra.

ДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГАЗОВОМ ДИОДЕ С РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Н.М. Зубарев^{1,2,*}, О.В. Зубарева¹, М.И. Яландин^{1,2}

¹Институт электрофизики УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

* nick@iep.uran.ru

Сравниваются условия убегания электронов в воздушном диоде при постоянном напряжении и с учетом конечности крутизны фронта импульса. Предложена модель, учитывающая влияние прикатодной плазменной микрообласти, формирующейся на начальной стадии импульсного пробоя газа. Демонстрируется, что в условиях резко неоднородного распределения электрического поля в промежутке влияние этой области приводит к существенному увеличению порогового для генерации убегающих электронов напряжения. Как следствие, в зависимости напряжения убегания от степени неоднородности поля возникает явно выраженный минимум. В ситуации, когда неоднородность поля обусловлена использованием конического катода, минимум реализуются для конуса с углом раствора $\sim 100^\circ$.

Ключевые слова: убегающие электроны, субнаносекундный пробой газа, резко неоднородное электрическое поле, конический катод.

В работах [1,2] было установлено, что условия генерации убегающих электронов (УЭ) в газе различаются для слабонеоднородных и сильнонеоднородных распределений поля в межэлектродном промежутке. В слабонеоднородном поле ($0.5 < \gamma < 1$ при степенной зависимости $E \propto r^{\gamma-1}$ поля от расстояния до катодного

острия) для убегания достаточно, чтобы локальное поле у катода превышало некоторое критическое значение (270–450 кВ/см для воздуха атмосферного давления [3,4]). В сильнонеоднородном поле ($0 < \gamma < 0.5$) этого условия недостаточно для убегания во всем промежутке. Стартующий от острия электрон, попадая в слабое поле на периферии, может потерять энергию и превратиться в тепловой. Для того чтобы он достиг электрода, оставаясь «быстрым», необходимо выполнение нелокального условия: приложенное напряжение должно превысить некоторый порог, зависящий от ширины зазора и свойств газа. Соответствующие этим условиям пороговые значения напряжения показаны на Рис. 1 как $U_{loc}(\gamma)$ и U_c . Эти результаты относятся к ситуации, когда приложенное к промежутку напряжение постоянно. Если принять во внимание постепенное увеличение напряжения на фронте импульса (с крутизной до 10^{15} В/с), ситуация изменится за счет формирования прикатодной плазмы, экранирующей поле на катодном острие.

В настоящей работе предложена аналитическая модель, учитывающая влияние прикатодной плазменной области на условия генерации УЭ. Для слабонеоднородного поля ее размер сравнительно мал (десятки микрон), а влияние – незначительно. Для сильнонеоднородного поля будет образовываться уже достаточно протяженная (сотни микрон) область плазмы. Поток УЭ формируется на ее внешней границе, когда одновременно выполняются локальное и нелокальное условия убегания. Поле здесь ниже, чем вблизи острия, что приводит к существенному увеличению порогового напряжения убегания (ветвь $U_{nl}(\gamma)$ на Рис. 1). Наши оценки качественно согласуются с результатами экспериментов [5], где было продемонстрировано, что напряжение убегания для тонкой иглы ($\gamma \approx 0.2$) заметно превышает таковое для конуса с углом раствора 98.6° ($\gamma \approx 0.5$).

Важным результатом исследования является демонстрация наличия минимума в зависимости порогового напряжения от показателя неоднородности поля, приходящегося на $0.4 < \gamma < 0.6$. Это соответствует тому, что «оптимальные» условия генерации УЭ реализуются для конуса с углом раствора $\sim 100^\circ$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053-П.

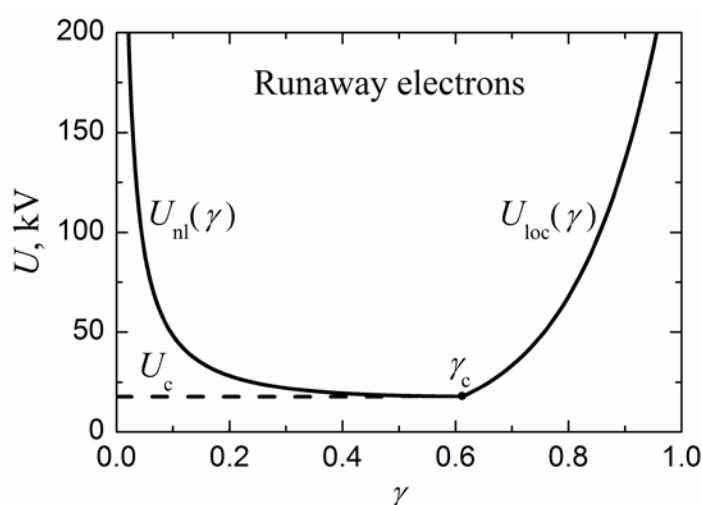


Рис. 1. Зависимость порогового для генерации УЭ напряжения от показателя неоднородности поля (воздух атмосферного давления, зазор 1 см). Штриховая линия $U = U_c$ соответствует постоянному напряжению. Сплошная линия $U = U_{nl}(\gamma)$ – динамическое условие убегания.

Литература

8. Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И. Особенности убегания электронов в газовом промежутке с коническим катодом // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2023. Т. 512. С. 5–10.
9. Kozyrev A.V., Lobanov L.N., Mesyats G.A., Semeniuk N.S., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M., Zubareva O.V. Local and nonlocal conditions for electron runaway in a gas gap with a conical cathode with a variable opening angle // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. Art. no. 103109.
10. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. Импульсный наносекундный электрический разряд в газе // УФН. 1972. Т. 107. С. 201–228.

11. Babich L.P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Arlington, TX: Futurepast, 2003.
12. Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Яландин М.И. Условия генерации убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным электрическим полем: теория и эксперимент // УФН. 2024. Т. 194. С. 853–864.

DYNAMIC CONDITIONS OF ELECTRON RUNAWAY IN A GAS DIODE WITH A SHARPLY INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION

N. M. Zubarev^{1,2,*}, O. V. Zubareva¹, M. I. Yalandin^{1,2}

*¹Institute of Electrophysics UB RAS,
106 Amundsen Str., Ekaterinburg, 620016, Russia*

*²Lebedev Physical Institute RAS,
Leninsky Prospekt 53, Moscow, 119991, Russia*

** nick@iep.uran.ru*

The conditions for electron runaway in an air diode are compared at a constant voltage versus a finite steepness of the pulse leading edge. A model taking into account the influence of the near-cathode plasma microregion formed at the initial stage of pulsed gas breakdown is proposed. It is demonstrated that under conditions of a sharply inhomogeneous electric field distribution in the gap, the influence of this region leads to a significant increase in the threshold voltage for runaway electron generation. As a consequence, a clearly defined minimum arises in the dependence of the runaway voltage on the degree of field inhomogeneity. In a situation where the field inhomogeneity is caused by the use of a conical cathode, the minimum is realized for a cone with an opening angle of $\sim 100^\circ$.

Key words: runaway electrons, subnanosecond gas breakdown, sharply inhomogeneous electric field, conical cathode.

СТРУКТУРА ОБЛАСТЕЙ ЭМИССИИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ: ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Н.М. Зубарев^{1,2,*}, Л.Н. Лобанов¹, К.А. Шарыпов¹, С.А. Шунайлов¹,
М.И. Яландин^{1,2}

¹*Институт электрофизики УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53*

* *nick@iep.uran.ru*

Анализируется влияние давления газа на структуру областей эмиссии убегающих электронов. Поток убегающих электронов формируется в плазменных микрообластях, распределенных по кромке трубчатого графитового катода, и транспортируется без нарушения азимутально-радиальной структуры в однородном ведущем магнитном поле до люминесцентного экрана, расположенного в плоскости анода. Установлено, что структура плазменных областей слабо меняется при давлении, близком к атмосферному, и начинает заметно трансформироваться – увеличивается характерный пространственный масштаб – для давлений 0.1–0.5 атм. Оценки показывают определенную корреляцию между этим масштабом и ионизационной длиной.

Ключевые слова: убегающие электроны, субнаносекундный пробой газа, трубчатый катод, ведущее магнитное поле.

Убегающие электроны (УЭ) играют ключевую роль в инициировании импульсного пробоя газа в субнаносекундном временном диапазоне [1–4]. Как следствие, важно детально понимать физические механизмы генерации УЭ, в частности, где, когда и при каких условиях она происходит.

В настоящей работе исследована структура областей эмиссии УЭ в зависимости от давления газа. Для этого были проведены

эксперименты по получению направленных потоков УЭ в магнитоизолированном диоде, заполненном воздухом с давлением 0.1–1 атм. Для питания использовались импульсы напряжения $-(80\div 200)$ кВ субнаносекундной длительности, генерируемые драйвером РАДАН-303 с блоком компрессии энергии с обостряющим и срезающим разрядниками. Однородная конфигурация магнитного поля с индукцией ~ 4.3 Тл, создаваемого импульсным соленоидом, обеспечивала прохождение трубчатого пучка УЭ от катода до анода (через зазор 30 мм) без нарушения его азимутально-радиальной структуры. Как следствие, структура пучка УЭ, достигающего катода, дает достаточно полную картину зон эмиссии УЭ на катоде.

Поток УЭ формируется в плазменных микрообластях, распределенных по кромке трубчатого графитового катода диаметром 22 мм. Для анализа пространственной структуры потока УЭ фотографировалось (в режиме открытого затвора) свечение люминесцентного экрана СРГ400 с люминофором $Gd_2O_2S:Tb$. Экран устанавливался в плоскости анода: см., например, схемы в работах [5,6]. Снимки свечения люминофора для давлений воздуха $p = 0.1, 0.2, 0.5, 1.0$ атм представлены на Рис. 1. Видно, что поток УЭ состоит из множества отчетливо различных струй, что свидетельствует о наличии дискретных областей эмиссии УЭ на катоде. При изменении давления в диапазоне 0.5–1.0 атм структура зон эмиссии практически остается неизменной, однако она радикально меняется с уменьшением давления от 0.5 до 0.1 атм. Значительно увеличиваются интервалы между центрами эмиссии на кромке катода; растет также характерный размер самих центров. Такое поведение можно интерпретировать как увеличение характерного пространственного масштаба структур. Оценки показывают, что имеется определенная корреляция между этим масштабом и ионизационной длиной $1/\alpha(E_{fe}, p)$, где α – коэффициент ударной ионизации, E_{fe} – пороговая напряженность поля на ка-

тодном острие, при которой инициируется автоэлектронная эмиссия.

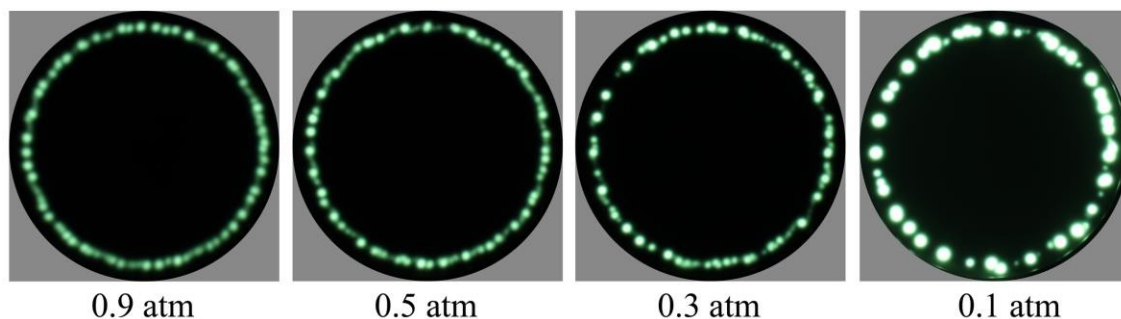


Рис. 1. Свечение люминофора в плоскости анода, вызванное трубчатым потоком УЭ, распространяющимся в однородном магнитном поле с индукцией ~ 4.3 Тл при различных давлениях воздуха. Ширина зазора 30 мм; амплитуда импульса напряжения –100 кВ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053-П.

Литература

1. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. Импульсный наносекундный электрический разряд в газе // УФН. 1972. Т. 107. С. 201–228.
2. Babich L.P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Arlington, TX: Futurepast, 2003.
3. Tarasenko V. Runaway electrons in diffuse gas discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. Art. no 034001.
4. Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Яландин М.И. Условия генерации убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным электрическим полем: теория и эксперимент // УФН. 2024. Т. 194. С. 853–864.
5. Mesyats G.A., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M. Runaway electron flows in magnetized coaxial gas diodes // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2064. Art. no 012006.

Lobanov L.N., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M. Formation of directed wide-aperture flows of runaway electrons in air-filled magnetized diodes // Rev. Sci. Instrum. 2024. V. 95. Art. no 093301

STRUCTURE OF EMISSION REGIONS OF RUNAWAY ELECTRONS: EFFECTS OF GAS PRESSURE

N. M. Zubarev^{1,2,*}, L.N. Lobanov¹, K.A. Sharypov¹,
S.A. Shunailov¹, M. I. Yalandin^{1,2}

¹*Institute of Electrophysics UB RAS, Russia*

²*Lebedev Physical Institute RAS, Russia*

* *nick@iep.uran.ru*

The influence of gas pressure on the structure of runaway electron emission regions is analyzed. The runaway electron flow is formed in plasma micro-regions distributed along the edge of a tubular graphite cathode and transported to a luminescent screen located in the anode plane without disrupting its azimuthal-radial structure in a uniform guiding magnetic field. It has been established that the structure of the plasma regions changes slightly at pressures close to atmospheric, and begins to transform noticeably – the characteristic spatial scale increases – at pressures of 0.1–0.5 atm. Estimates show a certain correlation between this scale and the ionization length.

Key words: runaway electrons, subnanosecond gas breakdown, tubular cathode, guiding magnetic field

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ РАЗРЯД В СИЛЬНО ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПРОМЕЖУТКАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

С.Н. Иванов

*Институт электрофизики УрО РАН
620106, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 106
stivan@iep.uran.ru*

Показано что в диапазоне давлений от $3\div 5$ атм и до нескольких десятков атмосфер физика самостоятельного субнаносекундного разряда развивающегося в газе в однородном электрическом поле в условиях высоких перенапряжений разрядного промежутка совершенно отличается от классических представлений о физике импульсного разряда в газах. Рассмотрены механизмы инициирования и динамика развития таких разрядов. Проведен сравнительный анализ коммутационных характеристик самостоятельного субнаносекундного разряда в зависимости от давления газа с целью практического применения разряда в газовых коммутаторах субнаносекундного диапазона.

Ключевые слова: самостоятельный субнаносекундный разряд в газе, убегающие электроны, механизм инициирования разряда, динамика развития разряда, коммутационные характеристики разряда.

В докладе рассмотрены механизмы инициирования и динамики развития самостоятельного субнаносекундного разряда в сильно перенапряженных газовых промежутках. Под самостоятельным разрядом понимается разряд, развивающийся при отсутствии внешних источников ионизации газа в разрядном промежутке. Ионизационные явления в таком типе разряда развиваются только под действием прикладываемого к разрядному промежутку субнаносекундного импульса высокого напряжения. Исследования

таких разрядов стимулируются как с точки зрения фундаментальных вопросов физики пробоя в газе [1, 2], так и со стороны практических применений [3]. Газовые разрядники пико секундного диапазона в настоящее время широко применяются в различной электрофизической аппаратуре [3]: генераторах пикосекундных электронных пучков, пикосекундных рентгеновских источниках, генераторах мощных пикосекундных микроволновых импульсов, источниках сверхширокополосного радиочастотного излучения, и т.д. Хотя общие принципы достижения субнаносекундной коммутации на момент начала работ описанных в настоящем докладе были в целом понятны, но детальная картина разрядных явлений в газе на стадии запаздывания пробоя при напряжениях в сотни киловольт не была детально исследована. Это стимулировало проведение исследований, краткие результаты которых представлены в докладе.

Основной полученный в этих исследованиях физический результат состоит в том, что в зависимости от давления газа (p) существует три области (см. рис. 1) с различными механизмами инициирования и различной динамикой последующего развития самостоятельного субнаносекундного разряда, развивающемся в изначально однородном электрическом поле в условиях высоких перенапряжений разрядного промежутка. При этом механизмы инициирования разряда и динамика его развития в областях 1 и 3 по давлению (см. рис. 1) на момент начала исследований были известны. А область 2 (см. рис. 1) была выделена в результате проведенных автором доклада исследований, показавших, что разряд в этой области инициируется и развивается совершенно не так, как считалось ранее. Дадим краткое описание разрядов в этих областях:

Область 1. Это самостоятельный субнаносекундный разряд в газе, развивающийся при участии убегающих электронов (УЭ). В среднем электрическом поле разрядного промежутка выполняется классический критерий убегания электронов [1, 4]: $E_{\text{ср}}/p > E_{\text{кр}}/p$

(где $E_{\text{ср}}$ – напряженность среднего электрического поля в разрядном промежутке; $E_{\text{кр}}$ – напряженность электрического поля при которой электроны переходят в режим убегания). Этот тип разряда был известен на момент начала исследований описанных в докладе, но продолжает активно изучаться.

Область 2. Это область, в которой, как было впервые показано в исследованиях проведенных автором доклада, механизмы инициирования и последующая динамика развития разряда совершенно отличаются от классических представлений о физике субнаносекундного газового разряда. Это самостоятельный субнаносекундный разряд в газе, развивающийся при участии УЭ. Но, при этом в среднем электрическом поле разрядного промежутка не выполняется классический критерий убегания электронов [1, 4]: $E_{\text{ср}}/p$ на порядок и более меньше $E_{\text{кр}}/p$. Это абсолютно новый фундаментальный результат в физике субнаносекундного газового разряда. В моих исследованиях показано, что в случае азота верхняя граница области 2 по давлению составляет, как минимум 40 атм. Выше 40 атм мною эксперименты не проводились. В случае водорода верхняя граница области 2 по давлению находится между 50 атм и 60 атм. Из-за ионизации газа УЭ на начальной фазе своего развития разряд зажигается в объемной форме. Причем интенсивность свечения объемной стадии резко нарастает с ростом давления газа. Далее происходит контракция разряда, и образование искрового канала (ИК). Развитие ИК, как правило, происходит и с катода, и с анода. Причем в ряде случаев волна ионизации с анода, сопровождающая развитие ИК, начинается ранее волны ионизации с катода. Ширина сформировавшегося ИК при этом больше, чем типичная ширина ИК в разрядах лавинно-стримерного типа.

Область 3. Это самостоятельный субнаносекундный разряд в газе, развивающийся по лавинно-стримерному типу. Этот тип разряда также был известен на момент начала исследований описанных в докладе и достаточно хорошо изучен. Более того, ранее,

до проведения исследований представленных в докладе, ошибочно считалось, что лавинно-стримерный разряд развивается и в области 2 давлений (см. рис. 1).

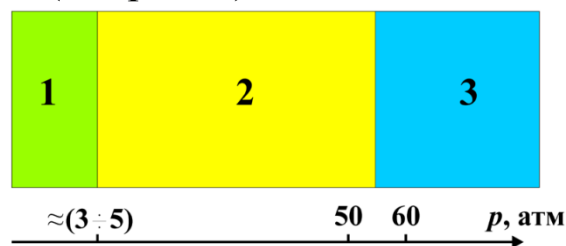


Рис. 1. Области давлений с различными типами самостоятельного субнаносекундного разряда. Область 2 выделена в результате проведенных автором исследований.

С точки зрения практического применения субнаносекундных газовых коммутаторов важнейшими результатами работы являются:

1. Показано [5], что в области 2 давлений (см. рис. 1) возможна коммутация существенно больших токов, чем в области 3 давлений (см. рис. 1), в которой развивается лавинно-стримерный разряд. Но при этом имеет место ограничение по амплитуде коммутируемых напряжений. Это следует учитывать при разработке газовых коммутаторов субнаносекундного диапазона предназначенных для коммутации больших токов или напряжений.

2. Показано [6], что в области 3 давлений (см. рис. 1) существенно увеличиваются импульсные напряжения пробоя, увеличиваются перенапряжения разрядного газового промежутка, и прямо пропорционально росту перенапряжения увеличивается скорость коммутации. Этот диапазон давлений следует использовать при проектировании сверхбыстрых газовых коммутаторов субнаносекундного диапазона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053-П.

Литература

1. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.

2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992. 536 с.
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
4. Babich L.P. High-energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Theory, Experiment and Natural Phenomena. ISTC Science and Technology Series. Volume 2. Futurepast: Arlington, Virginia, 2003. 358 p.
5. Иванов С.Н., Лисенков В.В. Энергетические характеристики самостоятельного субнаносекундного разряда в водороде // Физика плазмы. 2025. Т. 51. № 6. С. 667-678.
6. Ivanov S.N. Investigation of the switching characteristics of high-pressure subnanosecond gas dischargers with the purpose of a sharp increasing of the breakdown voltages and the switching speed // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. V. 31. art. no 055001.

SELF-SUSTAINED SUBNANOSECOND DISCHARGE IN HIGHLY OVERVOLTAGED GAS GAPS AND ITS APPLICATIONS

S.N. Ivanov

*Institute of Electrophysics, Urals Branch, Russian Academy of Sciences
106 Amundsen St., Yekaterinburg, Russia, 620106
stivan@iep.uran.ru*

It is shown that, in the pressure range from 3÷5 atm to several tens of atmospheres, the physics of a self-sustained subnanosecond gas discharge developing in a uniform electric field under conditions of high discharge gap overvoltages differs significantly from classical concepts of pulsed gas discharge physics. The initiation mechanisms and development dynamics of such discharges are examined. A comparative analysis of the switching characteristics of a self-sustained subnanosecond discharge as a function of pressure is conducted, with the aim of practical application of the discharge in gas switches operating in the subnanosecond range.

Key words: self-sustained subnanosecond gas discharge, runaway electrons, discharge initiation mechanism, discharge development dynamics, discharge switching characteristics.

УДК 533.9; 537.527; 537.533.9; 537.56

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО СУБНАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОДОРОДЕ И АЗОТЕ

С.Н. Иванов*, В.В. Лисенков

*Институт электрофизики УрО РАН
620106, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 106
stivan@iep.uran.ru*

В широком диапазоне давлений ($10 \div 60$ атм в водороде, $5 \div 40$ атм в азоте) исследованы энергетические характеристики (потери коммутируемой энергии в разряднике, идущие на световое излучение, ионизацию, возбуждение и нагрев рабочего газа при развитии плазменных процессов; а также мгновенной выделяемой мощности, служащей источником энергии для указанных выше процессов) двухэлектродных газовых разрядников субнаносекундного диапазона. Исследовано влияние убегających электронов на энергетические характеристики разрядников. Выработаны рекомендации для практического применения этих газов в субнаносекундных коммутаторах высокого давления.

Ключевые слова: энергетические характеристики газового разряда, самостоятельный субнаносекундный разряд в газе.

Газовые коммутаторы (ГК) пико секундного диапазона в настоящее время очень широко применяются в различной электрофизической аппаратуре [1]. Важным аспектом применения таких коммутаторов является правильное измерение их реальных параметров, что в субнаносекундном диапазоне (под субнаносекундным диапазоном обычно понимают временной диапазон короче 1 нс, такая терминология в настоящее время является общепризнанной) времен является весьма непростой практической задачей. Для эффективного практического применения самостоятельного субнаносекундного разряда кроме коммутационных характери-

стик (напряжения пробоя в импульсном режиме U_{br} , времени за-
паздывания пробоя t_d , времени коммутации t_{br} и скорости комму-
тации V_{br}) необходимо знать еще и энергетические характери-
стики разряда. А именно: потери коммутируемой энергии в разряд-
нике, которые идут на световое излучение, ионизацию, возбуж-
дение и нагрев рабочего газа при развитии плазменных процес-
сов; и мгновенную мощность, выделяемую в газ, являющуюся
источником энергии для указанных выше процессов. Целью
настоящей работы является исследование энергетических харак-
теристик субнаносекундного самостоятельного разряда в водоро-
де и азоте в широком диапазоне давлений. Азот и водород наибо-
лее широко в настоящее время используются в качестве рабочих
газов в субнаносекундных газовых разрядниках.

Для исследования коммутационных характеристик разрядни-
ков обычно применяют метод рефлектометрии [2-6]. Суть метода
состоит в том, что при помощи емкостного делителя, встроенного
в коаксиальный тракт между генератором импульсов и ГК, и ос-
циллографа позволяющего регистрировать однократные импуль-
сные сигналы (осциллографа реального времени), измеряют вол-
ны напряжения $U(t)$ отраженные от разрядника в режимах холо-
стого хода $U_{xx}(t)$ и пробоя $U_{пр}(t)$. Далее, по методике описанной в
[6, 7], восстанавливается осциллограмма тока разряда $i(t)$, и вы-
числяются энергетические характеристики разряда. Однако ука-
занная методика измерения напряжений и последующего расчета
коммутируемого тока имеет существенный недостаток, приво-
дящий к значительным ошибкам измерения в субнаносекундном
диапазоне времен. Емкостной делитель напряжения и измери-
тельная цепь (аттенюаторы напряжения, измерительные кабели и
т.д.) имеют паразитную (отличную от нуля) индуктивность. В ре-
зультате не удастся корректно измерять производную изменения
тока di/dt в пикосекундных процессах, длительность которых
меньше или соизмерима со временем переходных процессов в
измерительной цепи. В результате на заднем фронте импульсов

$U_{xx}(t)$ и $U_{пр}(t)$ регистрируется выброс напряжения противоположной полярности относительно прикладываемого к ГК напряжения. То есть при измерениях теряется значительная часть заднего фронта импульса, который в реальности должен плавно стремиться к нулевой линии без выброса напряжения противоположной полярности. Для решения этой проблемы нами была разработана и запатентована [8, 9] методика восстановления потерянного при измерениях нижнего участка заднего фронта осциллограммы $U_{пр}(t)$. Меняющееся во времени на стадии коммутации сопротивление плазмы разрядного газового промежутка мы заменяем постоянным резистором на тех участках осциллограммы напряжения, где характерное время ионизации более чем на порядок превышает длительность импульса напряжения прикладываемого к промежутку. Это дало возможность восстановить спад напряжения на разрядном промежутке, измеренного на стадии пробоя, который не удастся корректно зарегистрировать в субнаносекундном диапазоне из-за наличия паразитной индуктивности измерительного тракта. Полученные таким образом осциллограммы напряжения и тока позволили нам рассчитать динамику мощности и полную энергию, введенную в газоразрядную плазму. Расчет проведен для водорода при давлениях в ГК в 10 атм, 40 атм и 60 атм, и для азота при давлениях в ГК в 5 атм и 40 атм.

На разрядный промежуток с однородным распределением электрического поля и одинаковым межэлектродным расстоянием в этих экспериментах подавался один и тот же импульс высокого напряжения. Менялось только давление (p) и тип газа. При давлении в 60 атм в разрядном промежутке развивался лавинно-стримерный разряд. При других давлениях разряд развивался при участии убегающих электронов (УЭ). При этом в среднем электрическом поле ($E_{ср}$) разрядного промежутка не выполняется классический критерий убегания электронов [7, 10]: $E_{ср}/p$ была на порядок и более меньше $E_{кр}/p$ (где $E_{кр}$ – напряженность электрического поля при которой электроны переходят в режим убега-

ния). Было показано, что потери энергии в самостоятельном субнаносекундном разряде, полученные с использованием предложенного нами способа, оказались значительно (почти в два раза) выше потерь энергии, полученных с использованием методики-прототипа. Было показано, что энергетические потери в самостоятельных субнаносекундных разрядах, развивающихся при участии УЭ, и развивающемся по лавинно-стримерному типу практически совпали. При этом механизм выделения мощности в газ оказался принципиально различен. В разрядах, развивающихся при участии УЭ, происходит коммутация значительно большего тока, чем в лавинно-стримерном разряде. Но при этом имеет место ограничение по амплитуде импульсного напряжения пробоя в сравнении с лавинно-стримерным разрядом. Был проведен сравнительный анализ энергетических характеристик разряда в азоте и водороде с целью более эффективного применения этих газов в субнаносекундных ГК.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00053-П.

Литература

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
2. Ivanov S.N. Investigation of the switching characteristics of high-pressure subnanosecond gas dischargers with the purpose of a sharp increasing of the breakdown voltages and the switching speed // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. V. 31. art. no 055001.
3. Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. Пикосекундные пучки убегающих электронов в воздухе // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34-51.
4. Иванов С.Н., Лисенков В.В. Исследование времени формирования самостоятельного субнаносекундного разряда в газах высокого и сверхвысокого давления // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 3. С. 323-332.
5. Ivanov S.N., Lisenkov V.V. Investigation of the Prebreakdown Stage of the Self-Sustained Subnanosecond Discharge in High Pressure Nitrogen // Journal of Applied Physics. 2018. V. 124. art. no 103304.

6. Korolev Yu.D., Bykov N.M. High-Voltage Spark Gap in a Regime of Subnanosecond Switching // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40. № 10. P. 2443-2448.
7. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
8. Иванов С.Н., Лисенков В.В. Способ измерения энергетических характеристик двухэлектродных газовых коммутаторов пикосекундного диапазона методом рефлектометрии // патент № 2818262 от 12 декабря 2023 г.
9. Ivanov S.N., Lisenkov V.V. Methodology for measuring the energy characteristics of two-electrode gas discharge plasma switches in the picosecond range using the reflectometry method // Phys. Plasmas. 2024. V. 31. art. no 103504.
10. Babich L.P. High-energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Theory, Experiment and Natural Phenomena. ISTC Science and Technology Series. Volume 2. Futurepast: Arlington, Virginia, 2003. 358 p.

ENERGY CHARACTERISTICS OF SELF-SUSTAINED SUBNANOSECOND DISCHARGE IN HYDROGEN AND NITROGEN

S.N. Ivanov*, V.V. Lisenkov

*Institute of Electrophysics, Urals Branch, Russian Academy of Sciences
106 Amundsen St., Yekaterinburg, Russia, 620106
stivan@iep.uran.ru*

The energy characteristics of two-electrode gas-filled subnanosecond spark gaps (including losses of switched energy in the spark gap, which are spent on light emission, ionization, excitation, and heating of the working gas during plasma processes; as well as instantaneous released power, which serves as the energy source for the aforementioned processes) were studied over a wide pressure range (10÷60 atm in hydrogen, 5÷40 atm in nitrogen). The influence of runaway electrons on the spark gap energy characteristics was investigated. Recommendations for the practical application of these gases in high-pressure subnanosecond spark gaps were developed.

Key words: energy characteristics of the gas discharge, self-sustained subnanosecond gas discharge.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СВЕЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Иванова А.А.^{1,*}, Мурсенкова И.В.^{1,2}

¹МГУ им. Ломоносова, физический факультет
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Национальный исследовательский университет "МЭИ"
111250, Москва, Красноказарменная улица, д. 14

* iaanniva.phys@gmail.com

Экспериментально исследовано пространственно-временное распределение свечения наносекундного комбинированного объемного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с числами Маха 1.30–1.60 около обтекаемых моделей в канале ударной трубы. При импульсном приложении 25 кВ длительность тока разряда составляла ~500 нс. По данным электронно-оптической и фоторегистрации показано, что свечение объемной фазы однородно в невозмущенном потоке и неоднородно в областях ударных волн, зон отрыва, косых скачков уплотнения. Длительность свечения объемной фазы не превышает 300 нс, тогда как послесвечение локальных зон вблизи газодинамических неоднородностей достигает 700 нс.

Ключевые слова: наносекундный объемный разряд, свечение плазмы, электронно-оптическая регистрация, сверхзвуковое течение, ударная волна

Введение

Разработка плазменных методов воздействия на сверхзвуковые газовые потоки требует исследования развития энерговклада в течениях с неоднородной структурой [1, 2]. В сверхзвуковых потоках ударные волны, косые скачки уплотнения и зоны отрыва существенно изменяют условия формирования разряда и динами-

ку его свечения [3, 4]. Интенсивность, длительность свечения и время его затухания могут заметно различаться в однородных и неоднородных областях потока. Интерес представляет установление связи между структурой сверхзвукового течения и особенностями развития свечения объемного разряда. В настоящей работе экспериментально исследовано пространственно-временное распределение свечения наносекундного комбинированного объемного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха вблизи газодинамических структур.

Экспериментальная установка и параметры течений

Эксперименты проводились на ударной трубе с разрядной секцией прямоугольного сечения 24×48 мм² [2, 4]. Рабочим газом служил воздух при начальном давлении $p_0 = 10\text{--}30$ торр. После разрыва диафрагмы в канале формировалось течение с плоской ударной волной, за которой устанавливался однородный спутный поток с числами Маха 1.30–1.60 плотностью 0.06–0.16 кг/м³. Исследовалось излучение разряда в сверхзвуковых потоках вблизи различных обтекаемых моделей: цилиндров диаметром 5,7 и 7,5 мм с плоским торцом или со сферическим затуплением. Модели располагались в разрядной секции под нулевым углом атаки к набегающему потоку. Квазистационарное обтекание моделей происходит в пределах 200–400 мкс.

Наносекундный комбинированный объемный разряд формировался в схеме с предыонизацией от двух плазменных электродов [5]. На верхней и нижней стенках секции, расположенных на расстоянии 24 мм друг от друга, создавались поверхностные скользящие разряды площадью 100х30 мм², обеспечивавшие предварительную ионизацию объема ультрафиолетовым излучением. Разрядный объем имел протяжённость 100 мм вдоль направления потока. Носовая часть обтекаемой модели располагалась внутри разрядного объема (Рис. 1). При импульсном напряжении ~25 кВ ток разряда достигал ~1 кА, его длительность

составляла ~ 500 нс. Приведенное электрическое поле в потоке составляло 500–1600 Тд.

Свечение комбинированного объемного разряда регистрировалось фотокамерой и электронно-оптической камерой через прозрачные кварцевые стенки разрядной секции [3]. Время экспозиции фотоизображений соответствовало времени излучения разряда. Электронно-оптическая камера K011 работала в режиме девятикадровой регистрации с паузами и экспозицией 100–200 нс.

Результаты

На рис. 1 представлено сравнение свечения разряда в неподвижном воздухе (рис. 1 а, в) и сверхзвуковом потоке (рис. 1 б, г). В неподвижном воздухе свечение объемной фазы является пространственно однородным (рис. 1 а, в). В сверхзвуковом потоке при обтекании цилиндра однородное свечение сохраняется в невозмущенном спутном потоке перед головной ударной волной, тогда как в зоне отрыва и вблизи косых скачков уплотнения формируются локальные области повышенной интенсивности свечения (рис. 1 б, г). В области между головной ударной волной и косыми скачками уплотнения свечение отсутствует. Наблюдаемое свечение связано с распределением приведенного электрического поля E/N , обусловленным неоднородным газодинамическим полем плотности. Длительность свечения объемной фазы разряда, определенная по электронно-оптическим изображениям, достигает 300 нс, тогда как послесвечение поверхностных разрядов, в том числе в зоне отрыва, продолжается до 700 нс.

Амплитуда и форма токового импульса зависят от условий протекания тока в объеме (рис. 1 д, е). В неподвижном воздухе длительность первого полупериода тока составляет 200–300 нс при различных плотностях, а полная длительность ~ 500 –800 нс. В сверхзвуковых потоках с обтекаемой моделью форма токового импульса отличается от наблюдаемой в неподвижном воздухе.

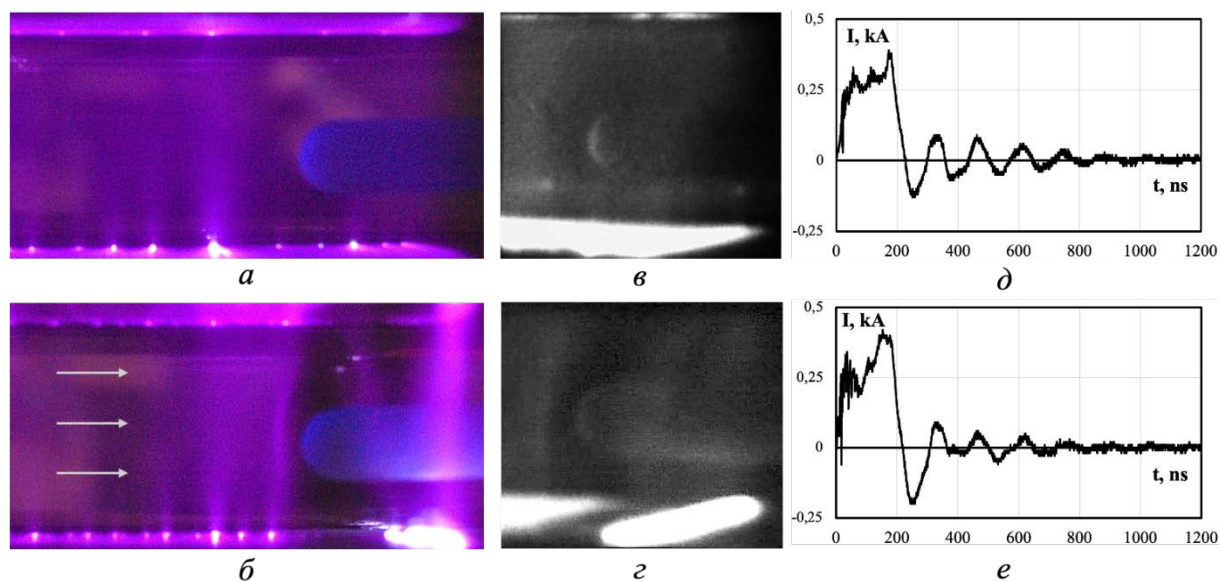


Рис. 1. Свечение и ток разряда в неподвижном воздухе (а, в, д; $\rho = 0.15$ кг/м³) и в сверхзвуковом потоке при обтекании модели (б, г, е; $M = 1.41$, $\rho = 0.12$ кг/м³): фотоизображения (а, б), электронно-оптические изображения (в, г), осциллограммы тока (д, е). Стрелками показано направление потока.

Заключение

Экспериментально показано, что пространственно-временное распределение свечения наносекундного комбинированного объемного разряда в сверхзвуковом потоке определяется газодинамической структурой течения, а именно распределением поля плотности. Полученные результаты важны для разработки методов генерации и локализации плазмы в сверхзвуковых потоках газа, а также для дальнейшего применения разрядов в задачах плазменного управления течением.

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» № 24-2-10-54-1.

Литература

1. Zhang X., Li J. Advancements and challenges of high-speed active flow control: Plasma actuators. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 252 125678 (2025)
2. Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // Журнал технической физики, 88 (5) 684 (2018)
3. Mursenkova I., Ivanova A., Ivanov I., Sysoev N., Karimov A. // Scientific Visualization, 15 (3), 40-49 (2023)
4. Ivanova A., Mursenkova I., Kryukov I. et al. // Physics of Fluids, 37 (3) 036136 (2025)
5. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Давидовский А.М., Христофоров О.Б. // Квантовая электроника, 8 (1), 165–167 (1981)

SPATIOTEMPORAL STRUCTURE OF A PULSED VOLUME DISCHARGE RADIATION IN A SUPERSONIC FLOW

Ivanova A.A.^{1,*}, Mursenkova I.V.^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics
Leninskie Gory, Bldg. 2, Moscow, 119991, Russia*

²*National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
14 Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250, Russia*

*e-mail: iaanniva.phys@gmail.com

The spatiotemporal distribution of the radiation from a nanosecond combined volume discharge in supersonic air flows at Mach numbers of 1.30-1.60 was investigated experimentally. The radiation was studied near streamlined models in the shock-tube test section. For a pulsed applied voltage of 25 kV, the discharge current duration was ~ 500 ns. ICCD and photo recording showed that the radiation of the volume phase is uniform in the homogeneous flow and nonuniform in the regions of shock waves, separation zones, and oblique shock waves. The radiation duration of the volume phase does not exceed 300 ns, whereas the afterglow of local zones near gas-dynamic inhomogeneities reaches 700 ns.

Key words: nanosecond volume discharge, plasma radiation, ICCD recording, supersonic flow, shock wave.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ДВУХЦВЕТНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА МАКЕТЕ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Т.А. Ишков^{1*}, Е.А. Бунин¹, К.Л. Губский², В.А. Жильцов¹

¹ НИЦ "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

² НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., 31

* ishkov_ta@nrcki.ru

В работе обоснована применимость лазерного двухцветного волоконного интерферометра для диагностики плазмы на макете безэлектродного плазменного ракетного двигателя. Метод позволяет определять абсолютное значение концентрации электронов в условиях сложной геометрии установки, что выгодно отличает его от зондовых и стандартных оптических методов. Приведены схема интерферометра, оценка чувствительности и область рабочих параметров. **Ключевые слова:** волоконный интерферометр, двухцветный интерферометр, диагностика плазмы, концентрация электронов, безэлектродный плазменный ракетный двигатель, геликонный источник, ионно-циклотронный резонансный нагрев, магнитное сопло, лазерная интерферометрия, оптическая диагностика.

В НИЦ «Курчатовский институт» активно разрабатывается широкая база стендов для испытания безэлектродных плазменных ракетных двигателей. Существует ряд установок с мощностью до 100 кВт [1-3]. В данный момент сооружается экспериментальный стенд ПЕРСТ для исследования двигателей с мощностью до 300 кВт [4].

Основными элементами макета являются геликонный источник холодной плазмы [5], блок ионно-циклотронного резонансного нагрева [6], и магнитное сопло, в котором происходит преобразование вращательной энергии ионов в энергию продольного движения и происходит срыв плазмы с линий магнитного поля.

В настоящий момент на стендах применяется широкий набор диагностических средств [1, 2], однако исследования проводятся только в области магнитного сопла. Исследования в области геликонного источника и блока ИЦР нагрева с применением контактных методов затруднено в связи с ограничениями зондовых диагностик, а применение бесконтактных методов ограничено геометрией установки и накладывает жесткие требования к габаритам используемого оборудования. Применение лазерного двухцветного волоконного интерферометра позволит проводить измерения в условиях сложной геометрии и определять абсолютное значение концентрации электронов. Это откроет возможности для исследования процессов в ранее недоступных областях геликонного источника и блока ИЦР нагрева.

В работе приводится краткое сравнение стандартных решений с их волоконным аналогом. Приведена схема интерферометра. Показаны ожидаемые параметры плазмы в различных областях установок. Приведена оценка чувствительности интерферометра и соответствующая ей область рабочих параметров.

Литература

1. Бунин Е. А. и др. Корпускулярные и зондовые измерения параметров плазменного потока в магнитном сопле на стенде Е-1 //LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 2025. 207 с.
2. Брагин Е. Ю., и др. Разработка диагностического комплекса для исследования плазменных процессов в магнитном сопле макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 4. С. 129-142.
3. Янченков С.В. и др. Ионно-циклотронный нагрев на стенде ПС-1 — ма-

кете безэлектродного плазменного ракетного двигателя//LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 2025. 216 с.

4. Павлушин Н. В. и др. Конструктивные особенности стенда испытания безэлектродного плазменного двигателя ПЕРСТ. // Вестник РВО. 2024. № 1.
5. Господчиков Е. Д., Тимофеев А. В. О возбуждении геликонов токовыми антеннами //Физика плазмы. 2017. Т. 43. №. 6. С. 538-547.
6. Тимофеев А. В. О ВЧ-нагреве неоднородной столкновительной плазмы в условиях ИЦР //Физика плазмы. 2015. Т. 41. №. 11. С. 946-954.

ESTIMATION OF SENSITIVITY AND APPLICABILITY RANGE OF A FIBER-OPTIC TWO-COLOR INTERFEROMETER FOR PLASMA PARAMETERS DIAGNOSTICS ON A PROTOTYPE OF AN ELECTRODELESS PLASMA THRUSTER

T. A. Ishkov^{1,*}, E. A. Bunin¹, K. L. Gubskiy², V. A. Zhiltsov¹

¹National Research Centre "Kurchatov Institute", 123182, Moscow, Akademika Kurchatova Square 1

National Research Nuclear University MEPhI, 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31

** ishkov_ta@nrcki.ru*

The applicability of a laser two-color fiber-optic interferometer for plasma diagnostics on a prototype of an electrodeless plasma thruster is justified in this work. The method allows determination of the absolute electron density under the conditions of complex installation geometry, which offers significant advantages over probe and conventional optical diagnostic methods. The interferometer scheme, sensitivity estimation, and the range of working parameters are presented.

Key words: fiber-optic interferometer, two-color interferometer, plasma diagnostics, electron density, electrodeless plasma thruster, helicon source, ion-cyclotron resonance heating, magnetic nozzle, laser interferometry, optical diagnostics.

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

Кавыршин Д.И.^{1,2,3,*}, Федорович С.Д.^{1,3}, Будаев В.П.^{1,3},
Лукашевский М.В.^{1,3}, Чан К.В.¹, Соин Д.М.¹,
Голов Я.А.^{1,3}, Кириллова Е.А.^{1,3}, Гогиначвили А. Т.¹,
Рогозин К.А.^{1,3}

¹ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1

²ОИВТ РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

³НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

* dimakav@rambler.ru

В открытой магнитной плазменной ловушке ПЛМ-М, созданной в НИУ «МЭИ», проведены исследования по определению режимов эффективной генерации и ускорения плазменных потоков с применением геликонной антенны для высокочастотного нагрева и ускорения плазмы. Для диагностики параметров плазмы использовались электрические зонды Ленгмюра и средства оптической эмиссионной спектроскопии. Определён диапазон рабочих давлений плазмообразующих газов (гелий и аргон), при котором параметры потока плазмы, включая удельный энерговклад и число Маха, максимальны. Получены зависимость числа Маха от давления газа в различных режимах разряда. Измерен импульс истекающего из зоны энерговклада плазменного потока.

Ключевые слова: плазменная установка ПЛМ-М, мультикасповая магнитная ловушка, стационарный плазменный разряд, геликонная антенна, диагностика плазмы, спектроскопия, электрический зонд, электронная температура плазмы, концентрация плазмы, магнито-плазмодинамические ускорители.

Введение

Магнитоплазмодинамические ускорители (МПДУ) рассматриваются как одно из перспективных направлений в области развития тяговых систем для освоения космического пространства [1]. Потоки плазмы, истекающие из открытых магнитных ловушек вдоль оси разряда, способны обеспечивать импульс–тягу, которая может быть использована в транспортных космических системах. Для генерации и нагрева плазмы в таких магнитных ловушках применяются электромагнитные волны, генерируемые с помощью геликонной антенны – так называемый геликонный тип плазменного разряда. Разработка и создание высокоэффективной, надежной и масштабируемой системы генерации геликонного разряда представляют собой актуальную научно-техническую задачу, обусловленную уникальным сочетанием характеристик создаваемой плазмы и широчайшим спектром потенциальных применений. Плазменные источники аналогичной конструкции рассматриваются как перспективная основа для создания нового поколения высокоэффективных электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), таких как геликонные плазменные двигатели или в качестве высокопроизводительных и долговечных источников ионов для гибридных систем [2,4].

Постановка задачи и результаты экспериментов

Целью данной работы являлось экспериментальное определение параметров плазмы и характеристик потока частиц при генерации плазменного потока в стационарной плазменной установке ПЛМ-М [3,6] при помощи геликонного разряда как отдельно, так и в сочетании с разрядом постоянного тока, создаваемым в катод-анодном зазоре разрядной камеры мультикасповой магнитной ловушки, расположенной непосредственно вверх по потоку перед областью геликонного нагрева, что обеспечива-

ло предварительную ионизацию поступающего газа. Схема установки представлена на рисунке 1. Такая конфигурация представляется перспективной для генерации и ускорения потоков плазмы при условии возбуждения геликонных волн, увлекающих плазму в направлении вдоль оси цилиндрического разряда, см. [4, 5].

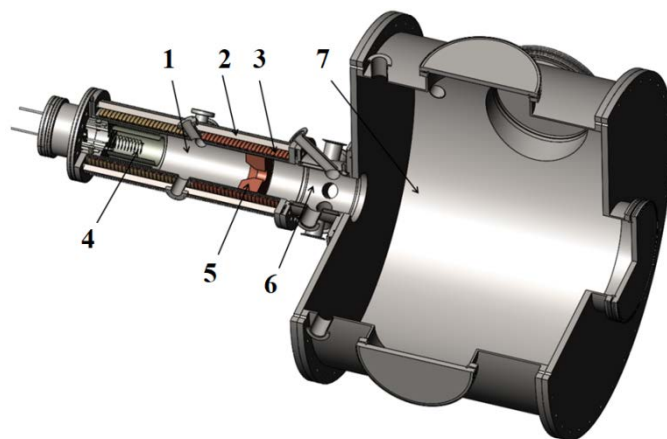


Рис. 1. Основные компоненты установки ПЛМ-М: 1 — разрядная камера, 2 — постоянные магниты, 3 — катушка соленоида продольного магнитного поля, 4 — катод, 5 — анод, 6 — секция высокочастотного плазменного нагрева, 7 — камера, имитирующая условия открытого космоса.

В проведенных экспериментах исследовалась плазма в трех режимах:

- 1) режим генерации плазмы в катод-анодной области - катод-анодный разряд;
- 2) режим генерации плазмы с помощью геликонной антенны - разряд геликонного типа;
- 3) комбинированный режим с разрядом геликонного типа совместно с катод-анодным разрядом - комбинированный режим.

Целью таких сравнительных исследований является поиск оптимальных условий для генерации и ускорения плазменных

потоков, истекающих из области магнитного удержания плазмы в ресиверный объем.

Проведенные на ПЛМ-М эксперименты продемонстрировали существование оптимального диапазона рабочих давлений $2 \div 3$ Па при комбинированном режиме включения геликонной антенны совместно с катод-анодным разрядом. Обнаруженные закономерности подтверждают перспективность использования комбинированного разряда для генерации потоков плазмы высокой концентрации со сверхзвуковой скоростью с числом Маха до 1,3. Получены зависимость числа Маха от давления плазмообразующего газа в различных режимах разряда в ПЛМ-М. Формирование сверхзвукового потока ($M > 1$) при комбинированном разряде обусловлено действием продольного магнитного поля соленоида, которое выполняет функцию магнитного сопла. Ионы, ускоренные в расширяющемся магнитном поле, приобретают направленную скорость, превышающую ионно-звуковую. Аналогичный механизм ускорения плазмы до сверхзвуковых скоростей наблюдался в экспериментах по разработке плазменных двигателей на основе геликонных источников [7]. Измеренная сила тяги потока гелиевой плазмы, истекающего из области магнитного удержания мультикасповой ловушки в свободный вакуумный объем ресивера в установке ПЛМ-М, достигала 1,0 мН.

Полученные данные демонстрируют эффективность геликонного разряда в мультикасповой конфигурации для создания направленных потоков плазмы с высокой скоростью частиц, что актуально для создания плазменных двигателей, технологий плазменной обработки поверхностей, испытанием материалов термоядерного реактора, инжекторов плазмы для термоядерных установок. Установка ПЛМ-М может использоваться для отработки технологий и перспективных конструкций МПДУ.

Работа выполнена при поддержке Госзадания FSWF-2025-0001.

Литература

1. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. Плазменные двигатели и будущее космонавтики // Природа. –2017. – №12. – С. 33-44.
2. Andreescu A.-M.T. et al. Development and Testing of a Helicon Plasma Thruster Based on a Magnetically Enhanced Inductively Coupled Plasma Reactor Operating in a Multi-Mode Regime // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, -8308.
3. Будаев В. П., Федорович, С. Д., Дедов А.В. и др. Испытания вольфрамовой облицовки дивертора в плазменной установке ПЛМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2024. – Том 47, № 2. – С. 49-57.
4. Chen F. F. Helicon discharges and sources: a review // Plasma Sources Science and Technology – 2015. – Vol. 24, No.1. – pp. 1-25.
5. Кузьмин Е. И., Шиховцев И. В. Геликонный источник плотной плазмы для линейных плазменных установок // Физика плазмы. – 2021. – Том 47, № 6. – С. 507–517.
6. Budaev, V. P. The PLM Plasma Device for Tests of Tungsten with Powerful Stationary Heat Plasma Loads / V. P. Budaev, S. D. Fedorovich, Yu. V. Martynenko, M. V. Lukashevsky, M. K. Gubkin, A. V. Karpov, A. V. Lazukin, E. A. Shestakov, D. I. Kavyrshin, and K. S. Rogozin // Physics of Atomic Nuclei. - 2019.- Vol. 82, No. 9, - P. 1281–1291.
7. M. Inutake et al. Development of supersonic plasma flows by use of a magnetic nozzle and an ICRF heating // Physics, Engineering. – 2004.

CREATION AND RESEARCH OF STATIONARY PLASMA FLOWS IN THE PLM-M INSTALLATION

D.I. Kavyrshin^{1,2,3,*}, S.D. Fedorovich^{1,3}, V.P. Budaev^{1,3}, M.V. Lukashevsky^{1,3}, Q.V. Tran¹, D.M. Soin¹, Y.A. Golov^{1,3}, E.A. Kirillova^{1,3}, A.T. Goginashvili¹, K.A. Rogozin^{1,3}

¹*National Research University “MPEI,”*

Russia, 111250, Krasnokazarmennaya 14, build. 1, Moscow

²*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Russia, 125412, Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow*

³*National Research Center Kurchatov Institute,
Russia, 123182, Pl. Akademika Kurchatova 1, Moscow*

*e-mail: dimakav@rambler.ru

Research was conducted in the PLM-M open magnetic plasma trap, developed at the National Research University "MPEI," to determine the modes for

efficient generation and acceleration of plasma flows using a helicon antenna for high-frequency plasma heating and acceleration. Electric Langmuir probes and optical emission spectroscopy were used to diagnose plasma parameters. The operating pressure range of the plasma-forming gases (helium and argon) at which plasma flow parameters, including specific energy input and Mach number, are maximized was determined. The dependence of the Mach number on gas pressure in various discharge modes was determined. The momentum of the plasma flow escaping from the energy input zone was measured.

Key words: PLM-M plasma installation, multicusp magnetic trap, stationary plasma discharge, helicon antenna, plasma diagnostics, spectroscopy, electric probe, plasma electron temperature, plasma concentration, magnetoplasmadynamic accelerators.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙНЫХ СИСТЕМ ВЧ-РАЗРЯДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Р.Р. Каюмов^{1,*}, И.И. Гайсин¹, И.Ш. Абдуллин², А.Ф. Гайсин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский тех-
нический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

² ООО "ПЛАЗМА-ВСТ"

420081, Республика Татарстан, г. Казань, Курская ул, д. 27

*ilsyr.gaysin@gmail.com

В данной работе исследовано влияние воздействия высокочастотного разряда (ВЧ-разряда) со струйным течением электролита при пониженном давлении на шероховатость материала.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, пониженное давление, шероховатость, плазменная обработка, плазма, модификация поверхности.

Введение

Струйные ВЧ-разряды в жидкой плазмообразующей среде привлекают внимание исследователей как перспективный инструмент для обработки металлических поверхностей. При пониженных давлениях существенно снижается пробивное напряжение, расширяется зона плазмы и увеличивается эффективность энергоклада. Настоящая работа посвящена изучению режимов горения ВЧ-разряда в диапазоне $P = 10^3 - 10^5$ Па исследованию вольт-амперных характеристик (ВАХ) и влиянию конструкции индуктора на морфологию плазмы, а также оценке эффективно-

сти плазменно-электролитной обработки (ПЭО) поверхности меди М1[1].

Экспериментальная установка

Для исследований применялась двухъярусная установка (рис. 1). Рабочий электролит — водный раствор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ концентраций 3% и 6%. Диаметр струи $d = 1,0\text{--}1,5$ мм, длина межэлектродного промежутка $L = 15\text{--}40$ мм, напряжение источника $U_{\text{уст}} = 1,0\text{--}2,5$ кВ, скорость истечения $v = 0,18\text{--}0,95$ м/с. Исследовались пять конфигураций: а) открытый струйный разряд; б) струя в разрядной камере; в) с кольцевым короткозамкнутым индуктором; г) с незамкнутым кольцевым индуктором; д) с трёхвитковым соленоидом[2].

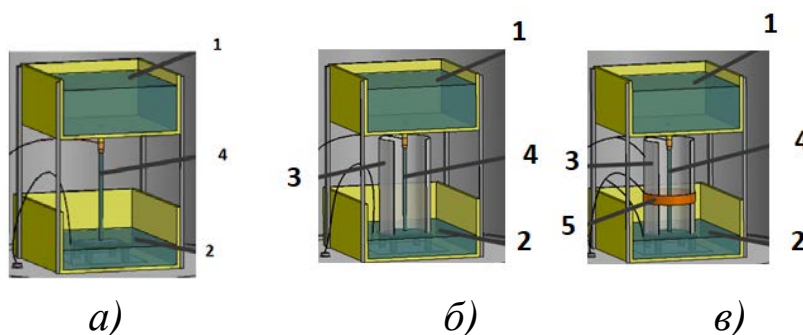


Рис. 1. Варианты экспериментальной установки: а) открытый струйный разряд; б) струя в разрядной камере; в) с кольцевым индуктором.

Режимы горения разряда и вольт-амперная характеристика

При снижении давления от $8 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^3$ Па выявлены два характерных режима горения: переходный и объёмный. Режим ($P = 8 \cdot 10^4$ Па) характеризуется точечным светящимся очагом диаметром 1–3 мм с относительно низким током разряда $I_p < 1,2$ А. При дальнейшем снижении давления ($P = 5 \cdot 10^4 \text{--} 1 \cdot 10^4$ Па) происходит расширение плазменного канала — переходный режим. При $P \leq 1 \cdot 10^3$ Па формируется объёмный разряд куполообразной формы диаметром более 30 мм с белооранжевой плазмой и токами I_p до 2,84 А[3].

Таблица 1. Характерные режимы разряда (электролит 3% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)

d, мм	L, мм	P, Па	U _{уст} , кВ	I _а , А	U _р , кВ	I _р , А	Режим горения
1,5	15	$8 \cdot 10^4$	2,5	0,55	0,77	1,12	Разряд
1,5	15	$1 \cdot 10^4$	2,5	0,50	0,78	2,64	Объёмный
1,5	30	$1 \cdot 10^3$	2,5	0,40	0,94	2,84	Объёмный
1,5	40	$1 \cdot 10^3$	2,0	0,25	0,68	1,68	Переходный
1,0	30	$1 \cdot 10^3$	2,0	0,30	0,60	1,68	Объёмный
1,0	30	$1 \cdot 10^3$	1,5	0,20	0,54	0,12	яразряд

Вольт-амперные характеристики разряда при различных давлениях представлены на рис. 2. С уменьшением давления ВАХ существенно изменяет характер: при $P = 8 \cdot 10^4$ Па зависимость $I_r(U_{\text{разр}})$ близка к линейной (омическое поведение), тогда как при $P = 1 \cdot 10^3$ Па наблюдается резкий нелинейный рост тока. Максимальный разрядный ток $I_r = 2,84$ А при $U_r = 0,94$ кВ достигнут при $P = 1 \cdot 10^3$ Па, $d = 1,5$ мм, $L = 30$ мм, $U_{\text{уст}} = 2,5$ кВ[4].

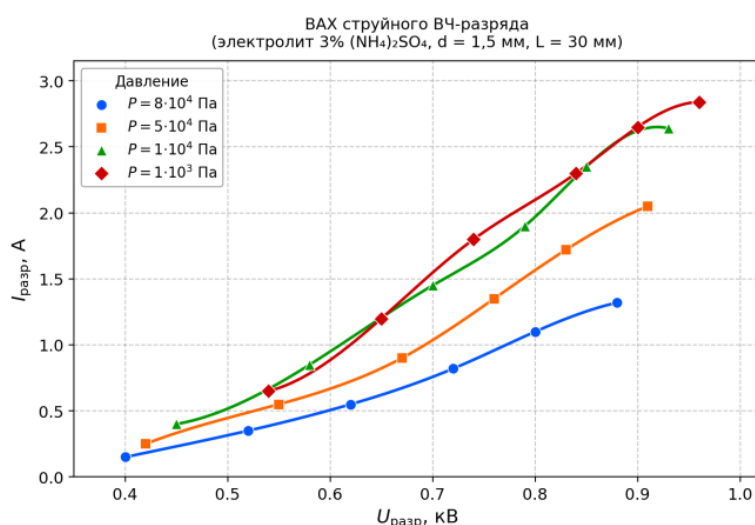


Рис. 2. ВАХ струйного ВЧ-разряда (3% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $d=1,5$ мм, $L=30$ мм).

Влияние режимов ВЧ-разряда

Режимы ВЧ-разряда определяют формы разряда. Трёхвитковый соленоид стабилизирует плазменный канал и снижает порог объёмного режима; кольцевой короткозамкнутый концентрирует поле у сопла (I_p до 1,76 А); незамкнутый обеспечивает равномерный прогрев при меньших токах ($I_p = 0,12$ А).

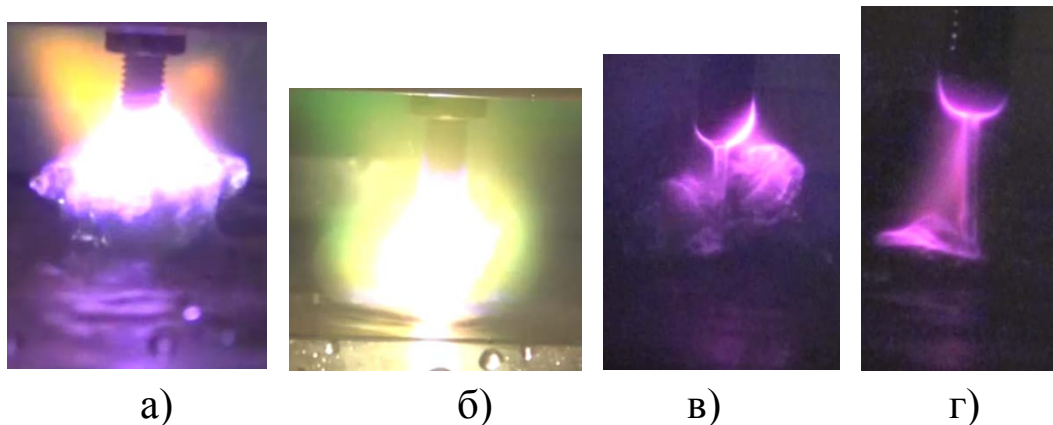
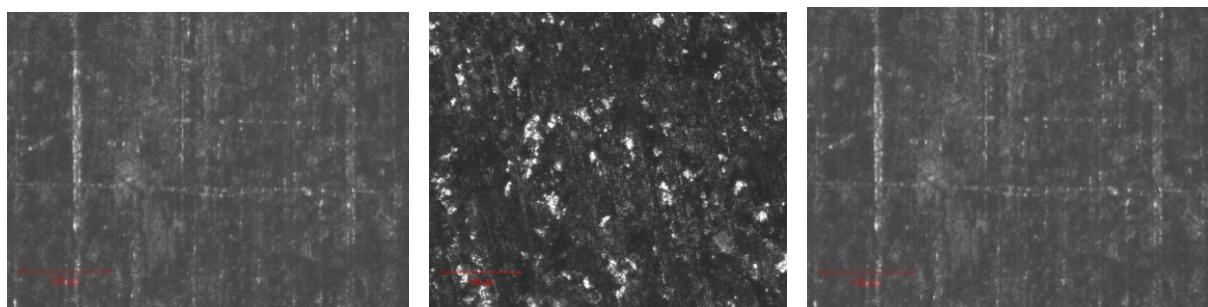


Рис. 3. Формы ВЧ-разряда при различных параметрах давления:
а) Разряд при ($P = 8 \cdot 10^4$ Па); б) расширенный канал ($P = 8 \cdot 10^4$ Па); в) объёмный разряд ($P \approx 1 \cdot 10^3$ Па); г) объёмный разряд ($P \approx 1 \cdot 10^3$ Па).

Обработка поверхности меди М1 струйным ВЧ-разрядом

Обработка М1 проведена при $P = 1 \cdot 10^3$ Па: в первой серии — раствор 3% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 5\% \text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($d = 1$ мм, $L = 30$ мм, $U_{\text{уст}} = 1,5$ кВ, незамкнутый индуктор); во второй — 3% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($d = 1,5$ мм, $L = 40$ мм, $U_{\text{уст}} = 2,5$ кВ, замкнутый индуктор).



а) Исх. М1 б) М1 после обр. +NiSO₄ в) М1 после обр. без Ni

Рис. 4. Поверхность меди М1 до и после плазменно-электролитной обработки: а) исходная поверхность; б) после обработки с NiSO₄ ($\Delta H = +16,80\%$); в) после обработки без никеля ($\Delta H = +12,75\%$).

Таблица 2. Результаты обработки М1 ($t = 5$ мин, $P = 1 \cdot 10^3$ Па)

Электролит	d, мм	L, мм	U _р , кВ	I _р , А	ΔHV , %
3%+5% NiSO ₄	1,0	30	0,54	0,12	+16,80%
3% (NH ₄) ₂ SO ₄	1,5	40	0,69	1,76	+12,75%

Добавление NiSO₄ обеспечивает осаждение никелевого покрытия и прирост микротвёрдости +16,80% против +12,75% при чистом электролите (HV_{0,2}). Более высокий ток при замкнутом индукторе (I_р = 1,76 А) не компенсирует отсутствие металлического источника в электролите[6,7].

Заключение

Снижение давления от $8 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^3$ Па переводит струйный ВЧ-разряд в объёмный, увеличивая ток с 0,12 до 2,84 А; ВАХ нелинейны при $P \leq 1 \cdot 10^3$ Па. Конфигурация индуктора определяет форму разряда. Никельсодержащий электролит при $P = 1 \cdot 10^3$ Па обеспечивает прирост HV_{0,2} до +16,80%[8].

Литература

6. Особенности сверхвысокочастотного разряда между медным штыревым электродом и технической водой / Э. Е. Сон, Р. Ш. Садриев, А. Ф. Гайсин [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 6. – С. 961. – DOI 10.7868/S0040364414060167.
7. Ахатов, М. Ф. Влияние состава электролита на электрический разряд в жидкости / М. Ф. Ахатов, Р. Р. Каюмов, Ф. М. Гайсин // Физика низкотемпературной плазмы - ФНТП-2017 : Сборник тезисов Всероссийской (с международным участием) конференции, Казань, 05–09 июня 2017 года. – Казань: "Отечество", 2017. – С. 79.
8. Propagation of a Liquid Inorganic Discharge on the Surface of Materials / M. F. Akhatov, R. R. Kayumov, R. K. Galimova, Z. Ya. Yakupov // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86, No. 12. – P. 2748-2750. – DOI 10.1134/s1063778823100010.
9. Каюмов, Р. Р. Плазменно-электролитные разряды в процессах взаимодействия с поверхностью твердого тела / Р. Р. Каюмов, И. Ш. Абдуллин, А. Ф. Гайсин // Химия высоких энергий. – 2026. – Т. 60, № 2. – С. 191-199. – DOI 10.7868/S3034608826020062.
10. Каюмов, Р. Р. Струйная обработка поверхности стали высокочастотным индукционным разрядом пониженного давления в жидкой плазмообразующей среде / Р. Р. Каюмов, И. Ш. Абдуллин, А. Ф. Гайсин // Физика и химия обработки материалов. – 2026. – № 1. – С. 15-24. – DOI 10.30791/0015-3214-2026-1-15-24.
11. Исследование теплового баланса в системе «металлический электрод - плазменная парогазовая оболочка - электролит» / Н. Ф. Кашапов, Л. Н. Кашапов, В. Ю. Чебакова, Р. Н. Кашапов // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 12. – С. 84-88. – DOI 10.17513/snt.40608.
12. Струйный ВЧ-разряд пониженного давления в системе с жидким (неметаллическим) электродом / Р. Р. Каюмов, И. Ш. Абдуллин, А. Ф. Гайсин, С. Ю. Петряков // Физика плазмы. – 2025. – Т. 51, № 12. – С. 1420-1429. – DOI 10.31857/S0367292125120092.
13. Гайсин, И. И. Модификация материалов низкотемпературным ВЧ-разрядом со струйным течением электролита / И. И. Гайсин // Физика и применение низкотемпературной плазмы : Материалы Региональной студенческой конференции с международным участием, Казань, 28–29 апреля 2025 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2025. – С. 97-99.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HF PLASMA JET SYSTEMS FOR PROCESSING METAL SURFACES AT LOW PRESSURES

R.R. Kayumov^{1,*}, I.I. Gaisin¹, I.Sh. Abdullin¹, A.F. Gaisin¹

*¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI»
420111, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, st. K. Marx, 10*

*² LLC "PLAZMA-VST"
420081, Republic of Tatarstan, Kazan, Kurskaya st., 27
* ilsyr.gaysin@gmail.com*

This paper examines the effect of high-frequency discharge (HF discharge) with a jet flow of electrolyte at reduced pressure on material roughness.

Key words: high-frequency discharge, reduced pressure, roughness, plasma treatment, plasma, surface modification.

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ РАЗРЯДА НА ПАРАМЕТРЫ СГУСТКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**А.А. Козлов*, В.Е. Завалова, А.В. Козлов, В.П. Полищук,
Ю.В. Карпушин, А.Н. Гусев, М.В. Протасов**

*Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2*

** alexk5577@yandex.ru*

Представлены результаты измерений концентрации и температуры электронов в сгустке плазмы водорода, сформированного в инжекторе импульсного плазменного ускорителя, в зависимости от энерговклада в разряд, горящем в продольном магнитном поле. Источником энергии разряда являлся емкостной накопитель, запасенная энергия изменялась от 5 до 60 кДж. Измерения проводились тройным зондом Ленгмюра на разных расстояниях от сечения напуска газа. Показано, что увеличение энергии свыше 30 кДж не сопровождалось увеличением концентрации электронов.

Ключевые слова: многоканальный инжектор, импульсный плазменный ускоритель, сгусток плазмы, тройной зонд Ленгмюра.

Введение

Работа посвящена исследованию процессов формирования сгустка водородной плазмы в многоканальном инжекторе (МКИ), являющимся начальным участком импульсного плазменного ускорителя (ИПУ). Основная цель работы - получение в ИПУ стабильного сгустка плазмы с максимально возможными значениями массы и энергосодержания. Источником энергии в МКИ является емкостной накопитель (ЕН); конструкция МКИ позволяет использовать до шести клапанов напуска газа. В работе [1]

представлены значения концентрации n_e и температуры электронов T_e , измеренные спектральными методами и тройным зондом Ленгмюра (ТЗЛ). В [1] использовался один клапан напуска МКИ; энергия W_0 , запасенная в ЕН, достигала 4 кДж; максимальное значение индукции продольного магнитного поля B_m , осциллирующего в плазменном объеме, равнялось ~ 5 Тл. Магнитное поле стабилизировало границы сгустка плазмы и увеличило n_e с $\sim 10^{13}$ до $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$.

В работе [2] исследовалось влияния энергии ЕН на значения n_e и T_e с тремя клапанами МКИ, внешнее магнитное поле отсутствовало. Эти эксперименты показали, что концентрация n_e была примерно пропорциональна энергии W_0 , достигавшей 64 кДж. Энергия, выделившаяся в разряде, составляла 20-30% от энергии ЕН.

В данной работе исследовано влияние внешнего магнитного поля и энергии разряда на параметры плазмы в МКИ при трёх клапанах напуска.

Схема и условия проведения эксперимента

Конструкция МКИ, электрическая схема установки и схема проведения эксперимента пояснены на рисунке 1; подробно установка описана в работах [1, 2]. Дуговой разряд получал энергию от ЕН1, напряжение зарядки которого U_0 изменялось от 10 до 35 кВ, а энергия W_0 - от 5 до 62 кДж. Осциллограмма тока разряда имела вид затухающей синусоиды с полупериодом ~ 28 мкс (рисунок 2); максимум тока был примерно пропорционален U_0 (или $\sim W_0^{1/2}$). ЕН2 использовался для создания внешнего магнитного поля; время нарастания тока в соленоиде составляло 90 мкс, максимальная индукция в плазменном объеме равнялась ~ 2 Тл.

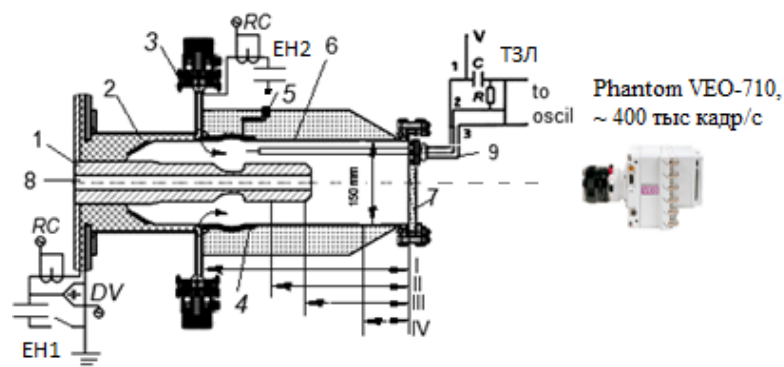


Рисунок 1 - Схема эксперимента: 1- катод, 2 – изолятор, 3 – электро-
динамический клапан, 4 — соленоид, 5 – токоподвод соленоида, 6 – анод;
7 – смотровое окно, 8 – выход к вакуумному насосу, 9 - ТЗЛ, RC- пояс
Роговского; DV – делитель напряжения

Параметры плазмы измерялись ТЗЛ, который устанавливался на разных расстояниях от смотрового окна (см. рисунок 1), в сечениях: I – 366 мм (у выхода клапанов), II - 195 мм, III - 165 мм (у края катода), IV - 100 мм. Проводилась скоростная видеосъемка плазменного сгустка.

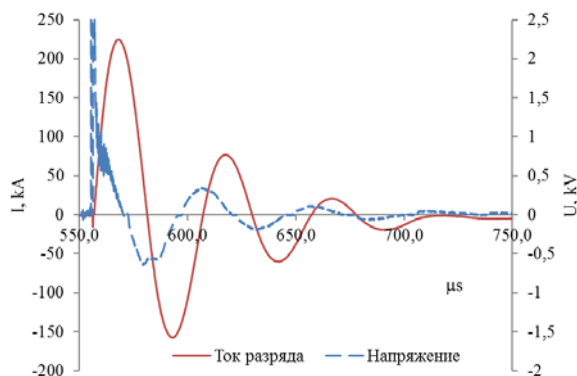


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения ($U_0 = 17$ кВ, $W_0 = 15$ кДж)

Разряд зажигался по следующей методике: сначала открывались клапаны напуска, затем через $\sim 0,1$ мс подавалось напряжение от EH1 и EH2 на электроды и соленоид соответственно. После того, как концентрация молекул водорода n_m вблизи клапанов достигала $\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [1], происходил пробой и возникал дуговой

разряд. При трёх открытых клапанах за время горения разряда концентрация молекул водорода увеличивалась на ~50%.

Результаты экспериментов

На рисунке 3 показано изменение концентрации и температуры электронов во время горения разряда у выхода клапанов (сечение I, рисунок 1) для трех режимов (1 - $W_0=5$ кДж; 2 - $W_0=15$ кДж; 3 - $W_0=30$ кДж). Время отсчитывается от момента запуска клапанов МКИ. Максимальная концентрация n_e составляла $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$ ($W_0=50$ кДж) и слабо менялась в диапазоне исследований от энергии $W_0=15$ кДж, когда максимум тока равнялся 210 кА, (рисунок 2), а индукция внешнего магнитного поля B_m составляла ~2 Тл. Видно, что динамика концентрации электронов повторяет осциллограмму тока, в то время как температура электронов максимальна в начале пробоя. На рисунке 4 приведена концентрация электронов в разных сечениях МКИ для $W_0=30$ кДж.

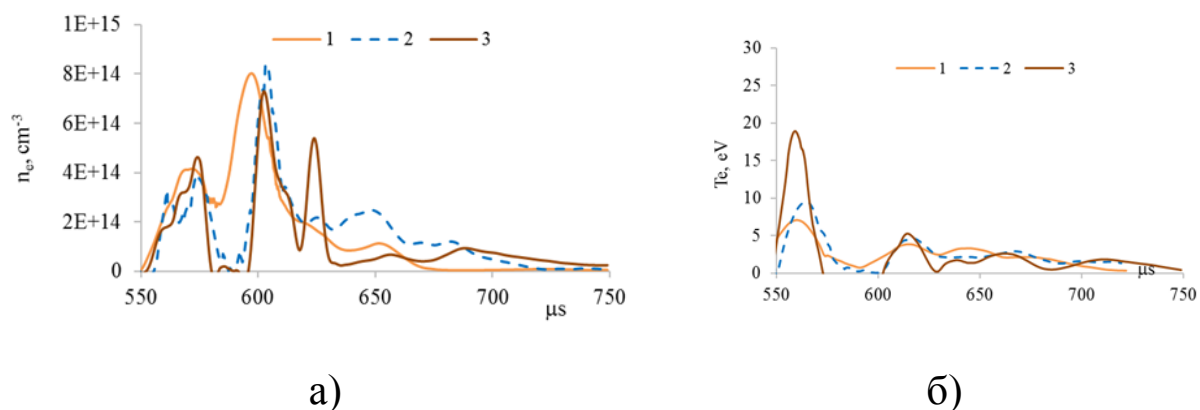


Рисунок 3 – Концентрации n_e и T_e в сечении I

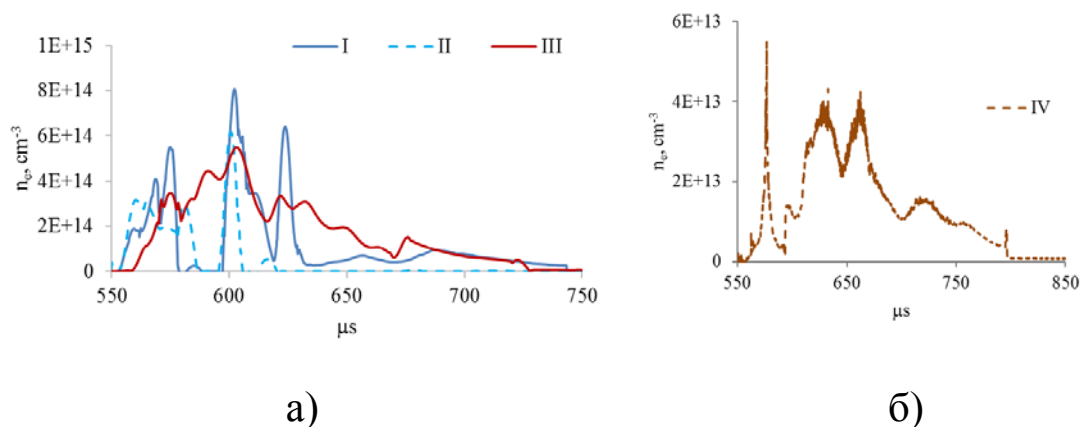


Рисунок 4 – Изменение концентрации электронов в плазме в разных сечениях МКИ

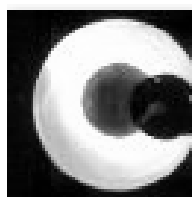
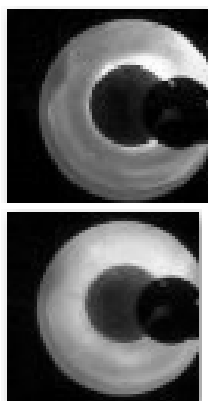
а) в сечениях I, II, III; б) в сечении IV

На рисунке 5 приведены кадры скоростной видеосъёмки плазменного сгустка при разных значениях энергии W_0 при наличии внешнего магнитного поля.

Сравнение полученных результатов с данными [2] показывает, что осциллирующее внешнее магнитное поле с индукцией $B_m \sim 2$ Тл оказывало заметное влияние на свойства плазмы, образующейся при ионизации водорода с концентрацией $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Это проявилось в том, что:

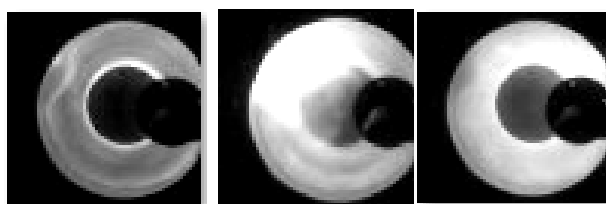
- сгусток сохранял форму тороида в течение всего времени разряда при электрической энергии накопителя ЕН1 до W_0 до 15 кДж;
- концентрация электронов увеличилась за время горения разряда до $(0,5 \div 1) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ по сравнению со значениями в отсутствие магнитного поля $\sim (0,3 \div 1) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ при одной и той же энергии ЕН1. Показано, что увеличение энергии свыше 30 кДж не сопровождалось увеличением концентрации электронов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).



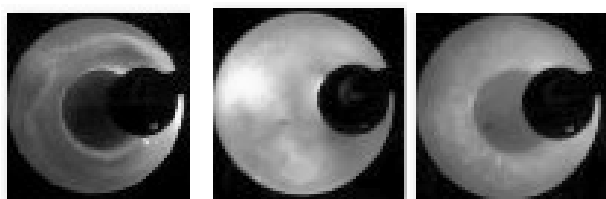
До 15 кДж тороидальная форма сгустка сохранялась в течение всего времени его существования до рекомбинации.

а)



15-30 кДж наблюдалось возмущение внутренней границы тороида и выход плазмы за пределы центрального электрода, затем плазма возвращалась к прежним границам и комбинировалась.

б)



Свыше 45 кДж: через ~5 мкс от начала разряда плазма заполняла весь объем МКИ, затем поджималась к границам и рекомбинировала

в)

Рисунок 5 – Динамика сгустка плазмы при разной энергии ЕН1

Литература

1. Завалова В. Е., Козлов А.В., Полищук В.П. и др. // Физика плазмы. 2025. №1, с. 104–114. DOI: 10.31857/S0367292125010109.
2. Kozlov A.A., Zavalova V.E. et al. // 11th Intern. Conference on Plasma Physics and Plasma Technology (PPPT-11). Minsk. 15-19 Sept. 2025.

DISCHARGE ENERGY INFLUENCE ON THE HYDROGEN PLASMA BUNCH PARAMETERS AT THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD

**A.A. Kozlov*, V.E. Zavalova, A.V. Kozlov, V.P. Polishchuk,
Yu.V. Karpushin, A.N. Gusev, M.V. Protasov**

*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
125412, Moscow, Izhorskaya St., Bldg. 13, Building 2*

*Email: alex5577@inbox

The results of measurements of the electron concentration and temperature in a hydrogen plasma bunch formed in the injector of a pulsed plasma accelerator are presented, depending on the energy input to the discharge burning in a longitudinal magnetic field. The discharge energy source was a capacitive storage, with the stored energy varying from 5 to 60 kJ. Measurements were conducted using a triple Langmuir probe at various distances from the gas inlet cross-section. It was shown that increasing the energy above 30 kJ was not accompanied by an increase in the electron concentration.

Key words: multichannel injector, pulsed plasma accelerator, plasma bunch, triple Langmuir probe.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИАЦИОННО–МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Кузенов, С.В. Рыжков*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1,

** svryzhkov@bmstu.ru*

Pulsed radiation-magnetogasdynamic (RMGD) systems are high-brightness plasma sources of radiation and shock wave generators (A.F. Aleksandrov, A.A. Rukhadze, 1974), systems of magneto-inertial fusion (MIF) (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983; S.F. Garanin, 2012; E. A. Azizov et al., 2001; V. A. Gasilov, S. V. Zakharov, V.P. Smirnov, S.Yu. Guskov, N.V. Zmitrenko et al., 2018), plasma accelerators (L.Ya. Minko, 1970; A.I. Morozov, 2006; A.I. Vasin, A.S. Koroteev, A.S. Lovtsov et al., 2012), pulsed plasmodynamic systems for controlling high-speed gas flows, as well as systems for plasma-assisted ignition and combustion of fuel mixtures, etc.

Импульсные радиационно–магнитогазодинамические (РМГД) системы – это высокяркостные плазменные источники излучения и генераторы ударных волн (А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе, 1974), системы магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983; С.Ф. Гаранин, 2012; Э.А. Азизов и др., 2001; В.А. Гасилов, С.В. Захаров, В.П. Смирнов, С.Ю. Гуськов, Н.В. Змитренко и др., 2018), плазменные ускорители (Л.Я. Минько, 1970; А.И. Морозов, 2006; А.И. Васин, А.С. Коротеев, А.С. Ловцов и др., 2012), импульсные плазмодинамические системы управления высокоскоростными потоками газа, а также системы плазменно-стимулированного поджига и горения топливных смесей и т.д.

Важный вклад в изучение физических процессов, протекающих в импульсных РМГД системах, внесли исследования, вы-

полненные Ю.П. Райзером, А.И. Морозовым, А.Ф. Александровым, А.А. Рухадзе, В.Е. Фортовым, С.Т. Суржиковым, В.Б., Розановым, А.М. Андриановым, В.С. Камельковым, И.Б. Тимофеевым, Л.Я. Минько, К.Л. Степановым и др.

В докладе представлен обзор теоретических работ научного коллектива МГТУ им. Н.Э. Баумана за последние 20-25 лет по физико-математическому моделированию различных РМГД систем, включая магнитоплазменный компрессор, импульсные источники нейтронов и частиц, установки МИТС и электроразрядные плазменные источники излучения высокой спектральной яркости и ударных волн [1-13].

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), проекты № FSFN-2024-0011 и № FSFN-2024-0022.

ЛИТЕРАТУРА

6. Kuzenov V.V., Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. A preliminary assessment of the usability of magnetoplasma compressors in scientific and technical applications // *Symmetry*. 2024. V. 16. P. 1200.
7. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Particle-Laden and Droplet-Laden Two-Phase Flows Past Bodies (A Review) // *Symmetry*. 2023. V. 15. P. 388.
8. V.Yu. Khomich, V.A. Yamshchikov, V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, E.V. Shakhmatov. Plasma Actuators for Controlling Aerodynamic Flows (Review) // *Technical Physics Letters*. 2025. V. 51. P. 262-269.
9. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. *Computational Thermal Sciences*. 2021. V. 13. P. 45-56.
10. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Particle-Laden Two-Phase Boundary Layer: A Review // *Aerospace*. 2025. V. 12 (10). P. 894; <https://doi.org/10.3390/aerospace12100894>.
11. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Compact (small-sized) neutron sources: a Review // *Technical Physics*. 2025. V. 70. P. 428–450.

12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Polyanskiy A.G. Evaluation of plasma dynamic parameters of a multi-layer MIF target under exposure to external broadband radiation // *Applied Sciences*. 2025. V. 15 (20). P. 11155.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Small-sized plasma generators - sources of high-energy particle and neutron fluxes (review) // *Fusion Science and Technology*. 2025. V. 81. P. 789-799.
14. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Physical Modeling of Structure and Dynamics of Concentrated, Tornado-like Vortices (A Review) // *Aerospace*. 2024. V. 11. P. 800.
15. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. 2019. V. 15. P. 543.
16. Polyanskiy A.G., Ryzhkov S.V. Models of Compact Neutron and Particle Sources under the Action of Laser Radiation // *AIP Conference Proceedings*. 2025. V. 3177. P. 060005.
17. Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematical Modeling of Structure and Dynamics of Concentrated Tornado-Like Vortices: A Review // *Mathematics*. 2023. V. 11. P. 3293.
18. N.V. Batrak, N.G. Kopaleishvili. *High Temperature Material Processes*. 2022. V. 26. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022046478

MODELING OF PULSED RADIATION-MAGNETOGASDYNAMIC SYSTEMS

Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V.

* *svryzhkov@bmstu.ru*

Pulsed radiation-magnetogasdynamic (RMGD) systems are high-brightness plasma sources of radiation and shock wave generators (A.F. Aleksandrov, A.A. Rukhadze, 1974), systems of magneto-inertial fusion (MIF) (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983; S.F. Garanin, 2012; E. A. Azizov et al., 2001; V. A. Gasilov, S. V. Zakharov, V.P. Smirnov, S.Yu. Guskov, N.V. Zmitrenko et al., 2018), plasma accelerators (L.Ya. Minko, 1970; A.I. Morozov, 2006; A.I. Vasin, A.S. Koroteev, A.S. Lovtsov et al., 2012), pulsed plasmodynamic systems for controlling high-speed gas flows, as well as systems for plasma-assisted ignition and combustion of fuel mixtures, etc.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ИОННЫЙ ТОКИ ИОННО-ЗВУКОВЫХ СОЛИТОНОВ

С.В. Кузнецов

*Объединенный институт высоких температур РАН
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
svk-IVTAN@yandex.ru*

На основе кинетического подхода для описания электронной компоненты бесстолкновительной неизотермической плазмы проведено исследование ее нелинейного движения в виде ионно-звукового солитона. Установлено, что в ионно-звуковых солитонах наряду с движением ионов и потоком захваченных электронов также существует ток пролетных электронов, который обратен по знаку к току захваченных электронов. Показано, что во всем диапазоне скоростей ионно-звукового солитона эти токи сопоставимы по величине. Совокупное движение ионов плазмы и токов пролетных и захваченных электронов обеспечивает такой баланс перемещения зарядов плазмы, что после прохождения солитона плазма остается квазинейтральной.

Ключевые слова: неизотермическая бесстолкновительная плазма, ионно-звуковой солитон, захваченные электроны, пролетные электроны, смещение ионов, квазинейтральность плазмы.

Впервые существование ионно-звуковых солитонов в бесстолкновительной неизотермической ($T_e \gg T_i$) плазме было теоретически предсказано в работах Сагдеева [1,2]. Для обнаружения данного нелинейного движения неизотермической плазмы оказалось достаточным использовать модель, в которой относительно электронов считается, что они имеют распределение Больцмана по энергии в потенциальном поле солитона, а ионная компонента плазмы описывается уравнениями холодной гидродинамики. Было установлено, что ионно-звуковой солитон пред-

ставляет собой уединенную потенциальную волну в виде всплеска с положительными значениями потенциала, которая распространяется по плазме без изменения своей формы со скоростью больше тепловой скорости ионов и меньше тепловой скорости электронов.

Взаимодействие электрического поля солитона с ионами, как было найдено позднее [3], приводит к возникновению однонаправленного ионного тока. В результате после прохождения солитона ионы оказываются смещенными на некоторое расстояние по направлению его движения. Строгое решение вопроса, касающегося электронных токов в области солитона, в модели Сагдеева оказалось затруднительным, и требует кинетического подхода для исследования движения электронной компоненты плазмы с учетом перемещения солитона.

В настоящем докладе представляются результаты [4–6] аналитического исследования одномерного нелинейного движения бесстолкновительной неизотермической плазмы в виде ионно-звукового солитона, в котором для описания электронной компоненты плазмы применяется кинетический подход на основе уравнения Власова с учетом, в отличие от работы [7], движения солитона.

Впервые обнаружено, что в лабораторной системе координат, наряду со смещением ионов плазмы в направлении распространения солитона [3] и переносом солитоном захваченных электронов [8], существует поток пролетных электронов, направленный в противоположную сторону. Физической причиной появления тока пролетных электронов является отсутствие симметрии по скоростям в функции распределения электронов вследствие движения солитона. В результате электронов, нагоняющих солитон, меньше, чем электронов, которых нагоняет солитон. В итоге возникает ток пролетных электронов в направлении противоположном току захваченных электронов и сопоставимый с ним по величине.

Показано, что токи пролетных и захваченных электронов обеспечивают такое интегральное смещение отрицательного заряда через любое поперечное сечение плазмы, перпендикулярное направлению распространения солитона, которое полностью компенсирует смещение положительного заряда ионов в плазме, так что плазма после прохождения солитона остается квазинейтральной. Учет тока пролетных электронов является необходимым для правильной интерпретации экспериментальных данных, получаемых при исследовании электронных токов, протекающих в области ионно-звуковых солитонов, например, при обработке измерений, производимых спутниками в космической плазме.

Литература

1. Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. Нелинейные колебания разреженной плазмы (I) // Ядерный синтез. 1961. Т. 1, № 2, С. 82-100.
2. Сагдеев Р.З. Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме // Вопросы теории плазмы / Ред. Леонтович М.А. М.: Атомиздат. 1964. Вып. 4. С. 20.
3. Трухачев Ф.М., Васильев М. М., Петров О. Ф. Солитонные токи (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 563-583.
4. Кузнецов С. В. Электронные токи ионно-звукового солитона // Вестник ОИВТ РАН. 2024. Том 13, С. 4-8,
5. Кузнецов С.В. Уединенная ионно-звуковая волна в бесстолкновительной неизотермической плазме. // Теплофизика высоких температур, 2025. Т. 63. №4. С. 465-474.
6. Кузнецов С.В. Ионно-звуковой солитон Сагдеева с захваченными электронами. // Теплофизика высоких температур, 2025. Т. 63. №5. С. 558-566.
7. Гуревич А.В. Распределение захваченных частиц в потенциальной яме в отсутствие столкновений // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. № 3. С. 953-964.
8. Трухачев Ф.М., Томов А.В., Могилевский М.М., Чугунин Д.В. Электрические токи, индуцированные в плазме ионно-звуковыми солитонами: учет захваченных электронов // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 11. С. 87-96.

ELECTRONIC AND ION CURRENTS OF ION-ACOUSTIC SOLITONS

S.V. Kuznetsov

*Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, Russia 125412
svk-IVTAN@yandex.ru*

Based on a kinetic approach to describe the electronic component of a collisionless nonisothermal plasma, a study of its nonlinear motion in the form of an ion-acoustic soliton has been carried out. It has been established that in ion-acoustic solitons, along with the movement of ions and the flow of trapped electrons, there is also a current of passing electrons, which is reversed in sign to the current of trapped electrons. It is shown that these currents are comparable in magnitude over the entire range of ion-acoustic soliton velocities. The combined motion of plasma ions and currents of passing and trapped electrons ensures such a balance of movement of plasma charges that after passing through the soliton, the plasma remains quasi-neutral.

Keywords: non-isothermal collisionless plasma, ion-acoustic soliton, trapped electrons, passing electrons, ion displacement, plasma quasi-neutrality..

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ AR/HE АКТИВНОЙ СРЕДЫ ЛАЗЕРА НА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМАХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ С ДВУХЧАСТОТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

Р.А. Курамшин^{1,2,*}, А.П. Торбин^{1,2}, П.А. Михеев¹,
М.В. Загидуллин¹

¹Самарский национальный исследовательский университет,
443086, Россия, Самара, ул. Московское шоссе, 34

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
443011, Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

*kuramshinr2001@mail.ru

Представлены результаты численного исследования лазера на метастабильных атомах аргона с непрерывной двухволновой оптической накачкой. Накачка на дополнительной длине волны предназначена для компенсации потерь с уровня $1s_4$. Кинетическое моделирование показало, что добавление вспомогательной накачки интенсивностью 50 Вт/см² увеличивает среднюю удельную выходную мощность с 11,2 до 130 Вт/см³. Эффективность преобразования накачки в лазерное излучение составила около 65%, а отношение мощности тепловыделения к мощности генерации минимально при интенсивности вспомогательной накачки в 50 Вт см⁻².

Ключевые слова: лазер, метастабильное состояние, инертный газ, наносекундный импульсно-периодический разряд, моделирование.

Введение

Лазер на метастабильных атомах инертных газов (ЛОНИГ) представляет собой перспективный тип газового лазера с оптической диодной накачкой, являющийся химически инертной альтернативой лазеру на парах щелочных металлов. Метастабильные

атомы аргона Ar^* нарабатываются с помощью наносекундного импульсно-периодического разряда. Оптическая накачка на длине волны 811,5 нм переводит атомы из метастабильного нижнего лазерного уровня $1s_5$ на уровень $2p_9$, после чего, за счёт столкновений с He, заселяется верхний лазерный уровень $2p_{10}$. В результате возникает инверсия населённостей и происходит лазерная генерация на переходе $2p_{10} \rightarrow 1s_5$ с длиной волны 912,3 нм. Основной проблемой, ограничивающей выходную мощность, является обеднение нижнего лазерного уровня из-за перехода атомов на уровень $1s_4$ с последующими потерями через спонтанное излучение в основное состояние. Целью работы является численное исследование активной среды ЛОНИГ с дополнительной оптической накачкой перехода $1s_4 \rightarrow 2p_7$ на длине волны 810,4 нм, компенсирующей потери возбуждённых состояний. Выбор данного перехода для вспомогательной накачки обусловлен его высоким сечением поглощения и близостью длины волны к основной накачке, что упрощает техническую реализацию источника диодной накачки.

Модель

Для решения поставленной задачи была разработана кинетическая модель, включающая возбужденные уровни $1s_5$, $1s_4$, $2p_6$ – $2p_{10}$ атома аргона. В модели учтены переходы столкновительного тушения, спонтанного излучения, оптической накачки и лазерной генерации. Константы скорости энергообменных процессов, необходимые для моделирования столкновительных процессов, были впервые измерены нашей группой в недавней работе [1]. Система дифференциальных уравнений для населённостей уровней решалась в квазистационарном приближении с условием просветления переходов накачки и генерации, что позволило рассчитать предельные значения удельной мощности генерации. Более подробное описание модели приведено в работе [2].

Результаты

Результаты моделирования показали, что без вспомогательной накачки средняя за период удельная мощность лазерной ге-

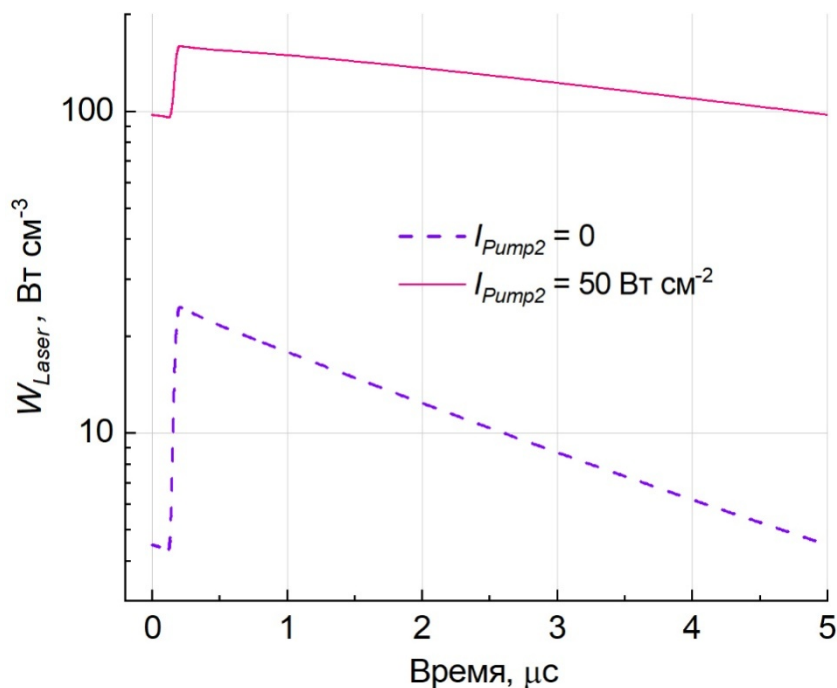


Рисунок 1 – Предельно возможная удельная мощность лазерной генерации W_{Laser} в отсутствие и при наличии вспомогательной накачки I_{Pump2} перехода $1s_4 \rightarrow 2p_7$

нерации составляет 11,2 Вт/см³, причём за период разряда она падает более чем в пять раз. На рис.1. продемонстрировано, что при добавлении вспомогательной накачки интенсивностью 50 Вт/см² средняя удельная мощность генерации возрастает почти в 12 раз, достигая примерно 130 Вт/см³, а ослабление генерации в течение периода становится сопоставимым с падением концентрации метастабильных атомов в отсутствие оптической накачки.

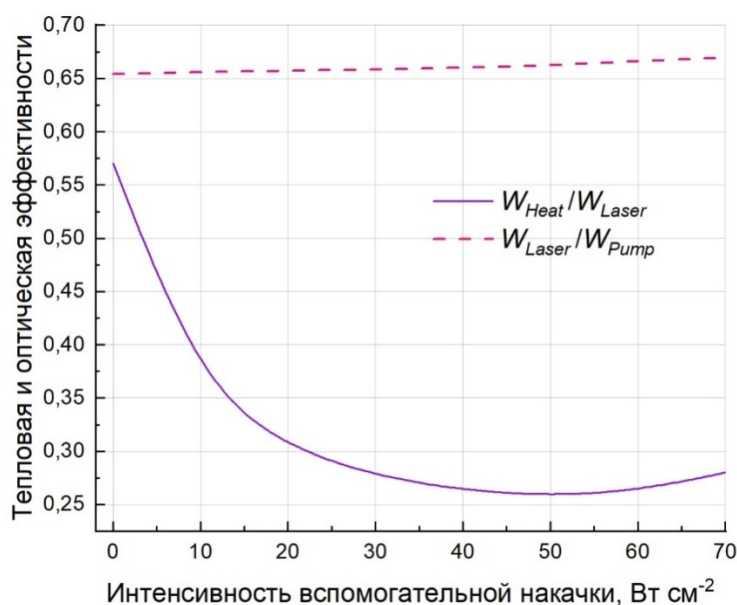


Рис. 1. Зависимость тепловой эффективности $W_{\text{Heat}}/W_{\text{Laser}}$ и оптической эффективности $W_{\text{Laser}}/W_{\text{Pump}}$ от интенсивности вспомогательной накачки

На рис. 2 представлены зависимости оптической эффективности и отношения мощности тепловыделения к предельно возможной удельной мощности лазерной генерации от интенсивности вспомогательной накачки. Эффективность преобразования накачки в лазерное излучение остаётся практически постоянной, а отношение $W_{\text{Heat}}/W_{\text{Laser}}$ имеет слабо выраженный минимум при $\text{Int}_{\text{Pump}2} = 50 \text{ Вт см}^{-2}$. Однако, в реальных условиях НИПР в районе минимума может оказаться неустойчивым из-за большой абсолютной величины тепловыделения

Важно отметить, что из-за неточного знания константы скорости столкновительной передачи энергии из состояния $1s_4$ в $1s_5$ полученные результаты носят преимущественно качественный характер и требуют дальнейшего экспериментального уточнения.

В нашей группе с недавнего времени так же проводится экспериментальное исследование системы ЛОНИГ с вспомогательной накачкой. Описание экспериментальной установки и результаты работы будут приведены в докладе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00392, <https://rscf.ru/project/25-22-00392/>.

Литература

1. Торбин А. П., Курамшин Р. А., Чернышов А. К. и Михеев П. А. Особенности энергообмена между 2р-состояниями аргона в активной среде лазера на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой // Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – №. 4. – С. 201-203.
2. Загидуллин М. В., Курамшин Р. А., Михеев П. А., Торбин А. П. Моделирование активной среды лазера на метастабильных атомах аргона с двухчастотной оптической накачкой при просветлении переходов накачки и генерации // Вестник Самарского университета. Естественно-научная серия. – 2025. – Т. 31. – №. 4. – С. 116-126.

KINETIC MODEL OF THE AR/HE ACTIVE MEDIUM OF A DUAL-WAVELENGTH OPTICALLY PUMPED RARE GAS LASER

R.A. Kuramshin^{1,2,*}, A.P. Torbin^{1,2}, P.A. Mikheyev¹, M.V. Zagidullin¹

¹*Samara National Research University,*

443086, Russia, Samara, Moskovskoe Sh., 34

²*Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS,*

443011, Russia, Samara, Novo-Sadovaya Str., 221

** kuramshinr2001@mail.ru*

We present the results of numerical studies of a continuous-wave dual-wavelength optically pumped metastable argon laser. The additional pump wavelength is intended to compensate for losses from the $1s_4$ level. Kinetic modeling shows that adding an auxiliary pump with an intensity of 50 W/cm² increases the average specific output power from 11.2 to 130 W/cm³. The efficiency of converting pump power into laser radiation is about 65%, and the ratio of heat release to laser power is minimized at an auxiliary pump intensity of 50 W/cm².

Key words: laser, metastable state, inert gas, nanosecond repetitively pulsed discharge, modeling.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

В.М. Лелевкин

Кыргызско-Российский Славянский университет, Кыргызстан,
720000, г. Бишкек, ул. Киевская 44,
lelevkin44@mail.ru

На основе уравнений магнитной газовой динамики разработаны математические модели электрической дуги, трансформаторного плазмотрона, высокочастотного, сверхвысокочастотного и оптического разрядов. В качестве примера приводятся результаты численного расчета течения и нагрева газа электрическими разрядами в зависимости от силы тока, мощности электромагнитного поля, расхода газа и геометрии канала.

Ключевые слова: электрическая дуга, трансформаторный плазмотрон, высокочастотный разряд, сверхвысокочастотный разряд, оптический разряд.

Введение.

В настоящее время широко применяются электродуговые нагреватели газа, уникальные по своим характеристикам высокочастотные и оптические плазмотроны, генерирующие спектрально чистую, не загрязненную материалом электродов, плазму.

Математическое моделирование электрических разрядов позволяет установить физику взаимодействия плазмы с электромагнитными полями, определить области изменения управляющих параметров, таких как сила тока, подводимая мощность электромагнитного поля, расход газа, геометрия канала и электродов, при которых реализуются оптимальные режимы работы плазмотронов.

Математическое моделирование.

Благодаря фундаментальным исследованиям В.А. Грановского, Ю.П. Райзера, С.В. Дресвина, Л.С. Полака и др., разработаны и применяются равновесная, химически неравновесная и двух температурная модели плазмы [1-2]. Характеристики плазмы электрических разрядов определяются МГД уравнениями, основанными на законах сохранения: энергии, движения (Навье-Стокса), массы и Максвелла [1-4].

Равновесная модель плазмы. МГД уравнения в рамках равновесного приближения плазмы имеют следующий вид [2-3]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial h}{\partial t} + (\rho \vec{V} \cdot \nabla) h &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_E - \phi_e + \vec{V} \cdot \nabla p + 2\eta \dot{S}^2 - \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \vec{V})^2, \\ \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\rho \vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} &= -\nabla \left(p + \frac{2}{3} \eta \nabla \cdot \vec{V} \right) + 2\nabla \cdot (\eta \dot{S}) + \vec{F}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e. \end{aligned}$$

Особенности в моделировании различных типов электрических разрядов проявляются при решении уравнений Максвелла, в задании источников тепла и электромагнитных сил, действующих на плазму:

1. Дуга постоянного тока: $Q_E = \vec{j} \cdot \vec{E} = \sigma E^2$, $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$; 2. Оптический разряд:

$Q_E = k_\omega \Phi$, $\vec{F} = 0$; 3. Электрические разряды в электромагнитных полях:

$$Q_E = \langle \vec{j} \cdot \vec{E} \rangle = \frac{1}{4} (\vec{j} \cdot \vec{E}^* + \vec{j}^* \cdot \vec{E}) = \frac{1}{2} \sigma E^2, \quad \vec{F} = \langle \vec{j} \times \vec{B} \rangle = \frac{\sigma}{4} (\vec{E} \times \vec{B}^* + \vec{E}^* \times \vec{B}).$$

Двух температурная модель плазмы. При низких давлениях, в областях подачи холодного газа, вблизи стенок канала и электродов наблюдается отклонение плазмы от равновесного состояния: температура электронов превышает температуру тяжелых частиц (молекул, атомов, ионов), ионизация не уравновешивается рекомбинацией. Уравнение энергии решается для электронов и тяжелых частиц, взаимодействующих посредством соударений, а

система МГД уравнений дополняется уравнением непрерывности для электронного газа [2-3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e k T_e \right) + \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} n_e k T_e \vec{V}_e \right) = Q_E + \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T_e) - B_{ea} (T_e - T) - \varphi_e - U_I \dot{n}_e,$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_a + n_i) k T + \frac{5}{2} \nabla \cdot (n_a + n_i) k T \vec{V} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + B_{ea} (T_e - T), \quad \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \vec{V}_e) = \dot{n}_e.$$

Коэффициенты плазмы задаются функциями T_e , T , p с учетом частот и сечений столкновений электронов с тяжелыми частицами [1-3].

Решение МГД уравнений проводится методами конечных разностей и контрольного объема на пространственных разнесенных сетках [3]. С развитием ЭВМ численные методы решения становятся необходимыми инструментами исследования плазмы электрических разрядов.

Рассмотрим на примерах результаты расчета физических процессов, протекающих при нагреве газа в дуговых, высокочастотных и оптических плазмотронах [3-4].

Электродуговые плазмотроны.

Развитие плазменных технологий в 1960 - 1980 годы стимулировало интенсивные экспериментальные и теоретические исследования электродуговых плазмотронов (С.В. Дресвин [2], М.Ф. Жуков, Б.А. Урюков, А.С. Аньшаков, Ф.Г. Рутберг, Г.Ю. Даутов, Е. Пфендер и др).

В ИВТ РАН Э.И. Асиновским, Е.П. Пахомовым, И.М. Ярцевым разработаны каскадные дуги, горящие в цилиндрическом канале. Экспериментальные исследования характеристик плазмы согласуются с результатами расчета [3] (рис.1).

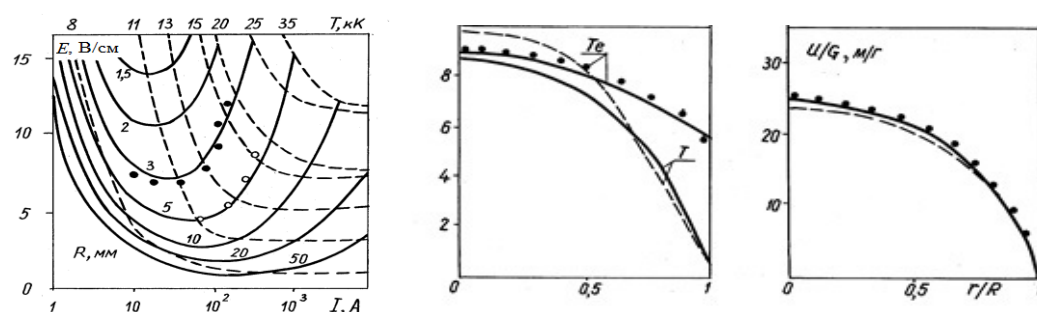


Рис.1. Воль-амперные характеристики, температура и скорость плазмы в каскадной дуге (- - ЛТР, --- ЧЛТР, ... эксперимент, $I = 75$ А, $G = 1$ г/с, $d = 3$ см)

Генераторы плазмы в электромагнитных полях.

Начиная с работ Г.И. Бабата большое развитие получили безэлектродные генераторы низкотемпературной плазмы: низкочастотные (НЧ), высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ) и оптические разряды (ОР).

НЧ плазмотроны трансформаторного типа разработаны С.В. Дресвиным [2], Н.Н. Рыкалиным, И.М. Улановым и др., для получения «спектрально чистой» низкотемпературной плазмы мощностью до ~ 1000 кВт. В результате проводимых расчетов [3] получено, что в сечении плазмотрона температура практически равновесна и смещается к центру кривизны тора, а электромагнитные силы формируют вихревую газодинамическую картину течения плазмы.

ВЧИ плазмотроны разработаны и исследованы С.В. Дресвиным [2], В.М. Гольдфарбом, И.Ш. Абдулиным и др. Численный анализ показал [3], что в центральном сечении области индуктора формируется тороидальное ядро плазмы с температурой $\sim 10,3$ К, на оси $\sim 8,9$ К ($\omega = 72,8$ МГц, $R = 3$ см). Под действием электромагнитных сил плазма ускоряется от ядра ВЧИ разряда и в канале реализуется режим протекания газа через осевую область.

СВЧ плазмотроны (радиального типа, «Фиалка», в круглых волноводах и т.д.), разработаны Г.В. Лысовым, А.А. Бобровым, В.Н. Троицким, Ю.А. Лебедевым, В.Д. Русановым и др. Как следует из результатов расчета [3], в СВЧ разрядах $T_e \gg T$ (плазма не равновесна) и возможны три режима горения: диффузный (не устойчивый), переходный и контрагированный (устойчивый).

Коаксиальный СВЧ разряд МИФ-1 конструкция ИОФ РАН им. Прохорова (И.А. Косый, С.И. Грицинин и др). Расчеты [4] показали, что в СВЧ разряде ($\omega = 15,4 \text{ ГГц}$, $R_o = 0,75 \text{ мм}$, $R = 13 \text{ мм}$, $Q = 1 \text{ кВт}$) наблюдаются две характерные области: 1. Высокотемпературная (проводящее ядро плазмы), где концентрация электронов выше критической и идет затухание электромагнитной волны на расстояниях скин-слоя; 2. Низкотемпературная (не проводящий плазменный факел или «шуба»), в которой распространяется электромагнитная волна. В направлении переднего фронта СВЧ разряда, из-за уменьшения размеров ядра, возрастает электромагнитное поле и происходит **самофокусировка излучения** (рис.2, а).

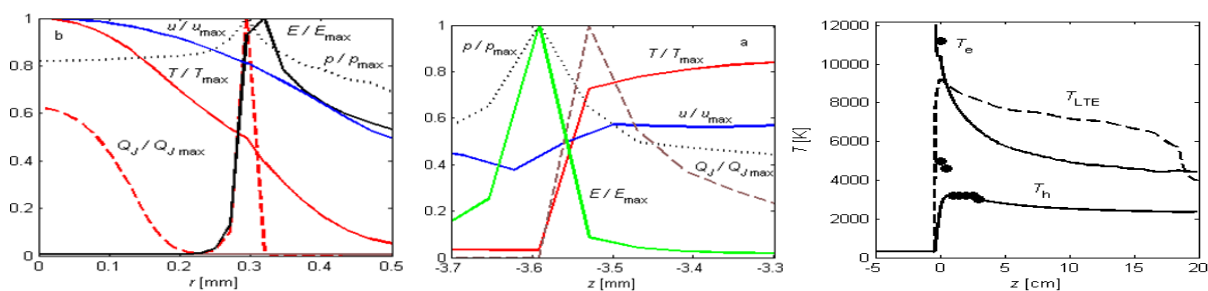


Рис. 2. Характеристики СВЧ разряда: $p_{\max} = 315 \text{ Па}$; $u_{\max} = 197 \text{ м/с}$;
 $T_{\max} = 9016 \text{ К}$;

$E_{\max} = 20 \text{ кВ/см}$; $Q_{j\max} = 196 \text{ кВт/см}^3$ (пунктир), эксперимент (точки), сечение $z = 0$ (b)

Реализуются большие значения напряженности электрического поля $\sim 61 \text{ кВ/см}$ с выделением огромного количества тепла $\sim 16,7$

кВт/мм^3 и интенсивной ионизации газа. Поток газа оказывает динамическое воздействие на передний фронт СВЧ разряда, через который протекает $\sim 1\%$ от подводимого расхода, а остальное количество газа обтекает разряд. Неравновесность плазмы (рис.2) качественно изменяет газодинамическую картину течения: от режима «обтекания» переднего фронта СВЧ разряда, наблюдается режим «протекания» газа через разряд, причем количество газа возрастает с увеличением температурной неравновесности плазмы $T/T_e < 1$.

В оптических разрядах (исследования [1] Ю.П. Райзера, С.Т. Суржикова, В.Е. Семенова, А.Л. Вихарева, А.Г. Литвак и др.) реализуются высокие температуры, малые пространственные размеры ($\Phi = 1,5 \text{ кВт}$, $T > 20 \text{ кК}$, $r < 1 \text{ мм}$) и возможность быстрой пере локализации разряда в пространстве. В оптическом плазмотроне разряд, в виде тонкой "плазменной иглы" ($r \sim 0,2 \text{ мм}$), находится в области фокуса [3]. Увеличение скорости поперечного потока газа, приводит к интенсивному охлаждению разряда и уменьшению его размеров.

Заключение.

Из приведенных результатов следует, что в настоящее время математическое моделирование является равноправным методом исследования электрических разрядов наряду с экспериментом. Согласие результатов расчета и эксперимента подтверждает эффективность применения МГД уравнений для исследования различных типов электрических разрядов и нагрева газа в плазмотронах. Для предварительных оценок характеристик плазмы широко используются каналовые, интегральные и другие аналитические модели.

ИИ плазмы газовых разрядов. Следующим шагом в развитии и применении электрических разрядов – создание искусственного интеллекта. Сейчас для этого имеются все условия: существует большая база данных (экспериментальная и теоретическая) по коэффициентам плазмы различных газов в широком

интервале температур и давлений, разработаны математические модели расчета плазмотронов с различными геометрическими размерами, конструкциями, подводом газа, электрического тока и мощности электромагнитного излучения.

Пример применения ИИ: для реализации плазмохимического процесса необходима определенная температура плазмы, тепловые и газодинамические потоки. ИИ проводит серию расчетов и находит требуемые параметры для получения данных условия. Результаты анализируют технолог, научный сотрудник и применяют их на практике. В результате отпадает большой объем исследований при проведении теоретических расчетов, конструирования плазмотронов и выбора оптимальных режимов работы данного технологического процесса.

Литература:

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
2. Дресвин С.В., Иванов Д.В. Физика плазмы. С-Пб.: изд-во Политехн. ун-та. 2013. – 544 с.
3. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Моделирование и расчет электрических разрядов. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, серия Б. Том X1-5 «Прикладная химия плазмы». Москва, изд-во ЯНУС-К, 2006. С. 437 - 501.
4. Грицинин С.М., Давыдов А.М., Косый И.А., Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М. Микроволновой разряд в коаксиальном канале (численный анализ). Физика плазмы РАН. (2013). **39**. № 7, С. 655 - 667.

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRIC DISCHARGE PLASMA

V.M. Lelevkin

Kyrgyz-Russian Slavic University, Kyrgyzstan
720000 Bishkek, 44 Kiyevskaya Str., e-mail:
lelevkin44@mail.ru

Based on the equations of magnetic gas dynamics, mathematical models of an electric arc, a transformer plasmotron, high-frequency, microwave, and optical discharges have been developed. As an example, the results of numerical calculations of gas flow and gas heating by electric discharges are presented, depending on the current strength, electromagnetic field power, gas flow rate, and channel geometry.

Key words: electric arc, transformer plasmatron, high-frequency discharge, ultra-high-frequency discharge, optical discharge

ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ПРИ ВВОДЕ В МЕЖДУЭЛЕКТРОДНУЮ ОБЛАСТЬ СМЕСИ ЭТИЛЕНА И КИСЛОРОДА

Е.А. Ливерко^{1,*}, В.А. Шахатов¹, В.Д. Кобцев²

¹ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора
Н.Е. Жуковского»

140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1

²ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени
П.И. Баранова»

111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2

* info@tsagi.ru

Аннотация статьи. Работа посвящена оптической спектроскопии разряда постоянного тока в воздушном потоке при вводе в междуэлектродную область смеси этилена и кислорода. Определен его спектральный состав излучения. Создано программное обеспечение для обработки спектров испускания и разработана расчетная модель для определения газокINETической температуры частиц в разряде. Выполнена проверка модели путем сравнения температур, определенных с использованием созданной модели и моделей существующих оптических методов в условиях пламени горелки.

Ключевые слова: разряд постоянного тока, газокINETическая температура, оптическая спектроскопия, этилен, азот, кислород, воздушный поток.

Введение

Актуальность работы связана с задачами создания систем теплозащиты и плазменной аэродинамики летательных аппаратов при условиях их полета с высокими значениями температуры

торможения потока (до 3000 K) и широким изменением значения числа Рейнольдса (до 10^5). Цель работы состоит в определении газокинетической температуры частиц T (молекул, атомов и их ионов) в разряде постоянного тока в воздушном потоке при вводе в междуэлектродную область смеси этилена и кислорода. Объектами исследования являются спектры испускания разряда, создаваемого в модельной камере сгорания аэродинамической трубы (АДТ), и пламени коммерческой горелки.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для исследования разряда постоянного тока в смеси этилена с кислородом включает:

- электроразрядный модуль, состоящий из источника питания разряда (до 10 кВ и силы тока до 2 А) для инициации и поддержания в донной и дальней областях между электродами разряда;
- оптическую систему, содержащую спектральный прибор (HR4000CG-UV-NIR, Ocean Optics, со спектральным разрешением 0.75 нм), эталонные источники линейчатого и сплошного спектров.

Электроды модуля (анод и катод) помещаются в воздушный поток на оси модельной камеры сгорания АДТ. Массовый расход ввода через анод этилена и кислорода составляет 0.85 г/с и 2.72 г/с, соответственно. В эксперименте, спектральная плотность интенсивности излучения исследуемых источников усредняется по всему объёму (диаметром 10 и длиной 40 мм), занимаемому разрядом, и по времени экспонирования спектров испускания 10 с.

Экспериментальная установка для исследования спектров испускания ламинарного диффузного пламени состоит из горелки Вольфхарда – Паркера и спектрального прибора (TRIAx 550, Jobin Yvon) со спектральным разрешением 0.09 – 0.13 нм. Спек-

тры испускания измеряются на разных высотах 10 и 20 мм от среза щелей горелки при давлении 1 атм. в обогащенной метаново-воздушной горючей смеси.

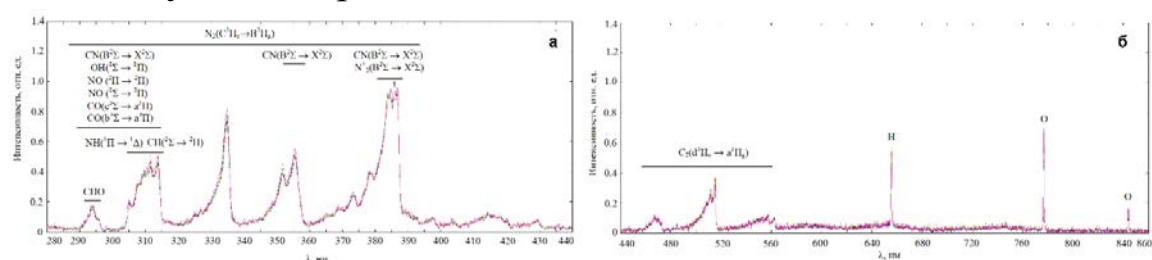


Рис. 1. Полученные спектры испускания разряда

Аппаратные функции приборов аппроксимируются функцией Гаусса. Температуры T электрического разряда и пламени горелки находятся посредством метода неразрешенной вращательной и частично разрешенной колебательной структуры молекул.

Результаты и обсуждение

Спектр испускания разряда в диапазоне длин волн от 291 до 320 нм имеет сложный спектральный состав. В нём, возможно, канты полос принадлежат следующим электронно-колебательным переходам (см. рис. 1) [1]: фиолетовой системы $CN(B^2 \rightarrow X^2)$; системы 3064 А $OH(2\Sigma \rightarrow 2\Pi)$; системам $CO(c^3\Sigma \rightarrow a^3\Pi)$ и 5В $CO(b^3\Sigma \rightarrow a^3\Pi)$; γ – системы $NO(2\Sigma \rightarrow 2\Pi)$ и β – системы $NO(2\Pi \rightarrow 2\Pi)$; второй положительной системы $N_2(C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi)$; системы А паров колановой кислоты CHO ; системы 3142 Ангстрема $CH(2\Sigma \rightarrow 2\Pi)$; системы 3240 Ангстрема $NH(1\Pi \rightarrow 1\Delta)$; системы Свана $C_2(d^3\Pi_u \rightarrow a^3\Pi_g)$. Канты полос, в диапазонах длин волн 321.74 – 565.39 нм, имеют, преимущественно, фиолетовое оттенение и представляют интерес для диагностики температуры T разряда.

Условия появления систем химических соединений C_2 , N_2 , CO , N_2^+ и CN близки к соответствующим условиям разряда (в донной и дальней областях течения ионизованного газа между

электродами). Это подтверждается сопоставлением измеренных и рассчитанных спектров испускания для условий электрического разряда, приведенным на рис. 2. Значения вращательной температуры T_{rot} , определенные по кантам полос секвенций соединений C_2 , N_2 и CN , лежат в диапазоне от 2000 К до 3000 К. Допускается, что наблюдаемое различие в значениях T_{rot} обусловлено пространственным неоднородным распределением параметров (температуры T , статического давления, концентраций электронов и химических соединений, электрического поля и т.д.) разряда. Времена жизни верхних излучающих электронных состояний данных соединений (от 3.5×10^{-7} до 8×10^{-7} с) больше, чем время поступательно – вращательной релаксации (от 2×10^{-9} до 5×10^{-9} с), но меньше, чем время пребывания молекул в области разряда (от 3×10^{-5} до 7×10^{-5} с). Это является основанием для предположения, что T_{rot} совпадает со значением T в области разряда.

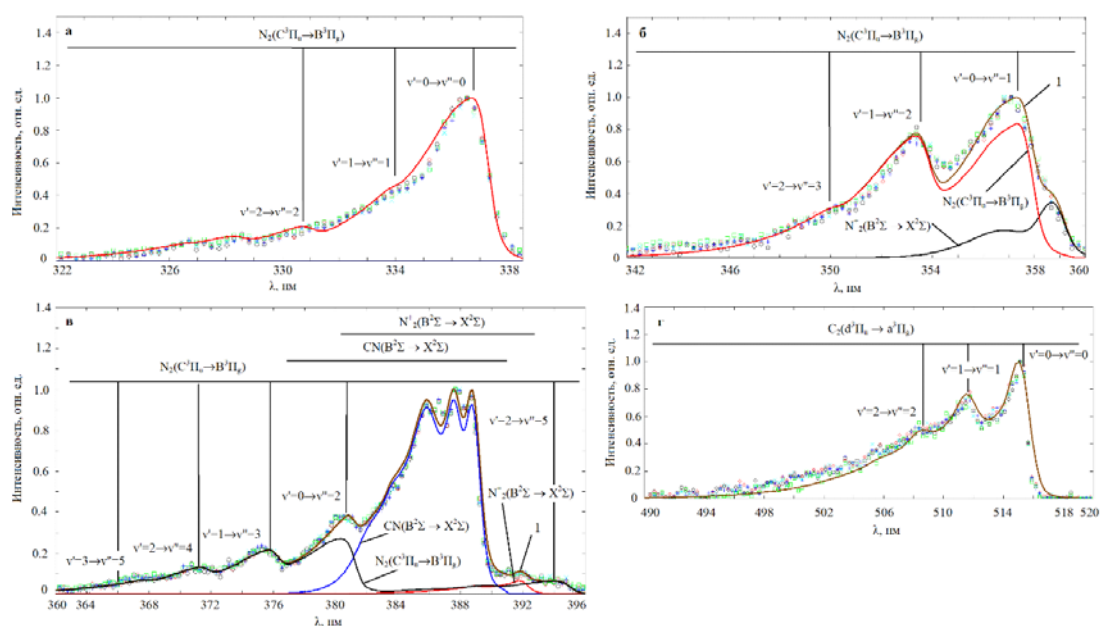


Рис. 2. Сравнение измеренных (символы) и рассчитанных (сплошные кривые) спектров испускания, 1 – суммарный спектр

В диапазоне длин волн больше, чем 565.39 нм (см. рис.1б), спектральный состав излучения разряда представлен атомными

линиями водорода H ($\lambda = 656.28$ нм) серии Бальмера и кислорода O ($\lambda = 777.194, 777.4166, 777.539$ нм и $844.625, 844.636, 844.676$ нм).

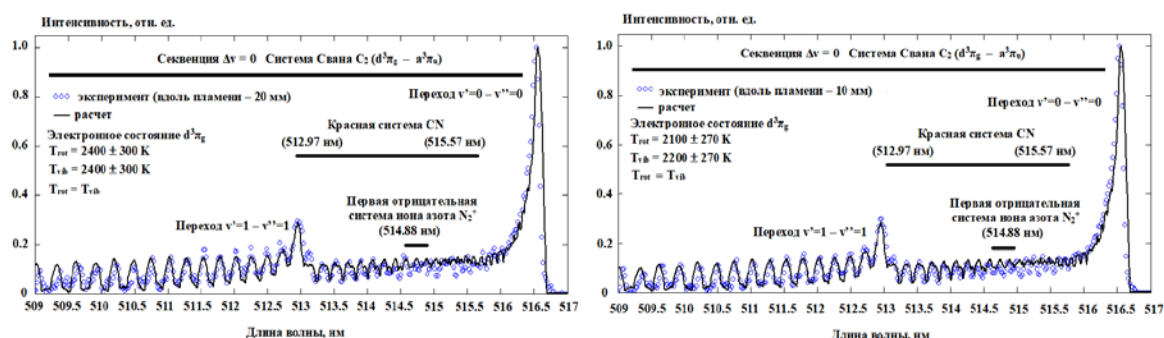


Рис. 3. Результаты проверки модели в условиях пламени горелки

Рис.3 иллюстрирует результаты проверки модели определения температуры T , разработанной в данной работе, в условиях пламени горелки по кантам полос системы Свана $C_2(d^3\Pi_a - a^3\Pi_g)$. Значения T пламени от 2100 К до 2400 К (с погрешностью 12%) находятся в согласии с результатами её определения посредством спектроскопии когерентного антистоксового рассеяния света 2100 ± 150 К и оказываются несколько больше значения, полученного с использованием диодно – лазерной абсорбционной спектроскопии 1600 ± 150 К [2].

Заключение

Таким образом, в спектре испускания разряда постоянного тока в воздушном потоке при вводе в междуэлектродную область смеси этилена и кислорода в диапазоне длин волн от 290 нм до 860 нм наблюдаются: атомные линии водорода H и кислорода O; канты полос дикарбона C_2 , молекулы азота N_2 и её иона N_2^+ , цианида CN, метин CH, оксиды углерода CO и азота NO, гидроксильного радикала OH, нитрена NH. Значения T , опреде-

ленные по кантам полос секвенций соединений C_2 , N_2 и CN , лежат в диапазоне от 2000 К до 3000 К.

Литература

1. Пирс Р., Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. М.: Издательство иностранной литературы, 1949г. 247 с.
2. Лигер В.В., Мироненко В.Р., Курицын Ю.А., Большов М.А. Термометрия открытого пространственно неоднородного пламени с использованием диодной лазерной абсорбционной спектроскопии // Квантовая электроника, 2018. Том 48. № 11. С.1055-1061.

OPTICAL SPECTROSCOPY OF AN ELECTRIC DISCHARGE IN AN AIR STREAM WHEN A MIXTURE OF ETHYLENE AND OXYGEN IS INTRODUCED INTO THE INTERELECTRODE REGION

E. A. Liverko^{1,*}, V. A. Shakhmatov¹, V.D. Kobtsev²

¹«Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI)», Federal Autonomus Institution

Russia, Zhukovsky, Zhukovsky st., 1

²«Central Institute of Aviation Motors», Federal Autonomus Institution

Russia, Moscow, Aviamotornaya st., 2

* info@tsagi.ru

Abstract. The work is devoted to optical spectroscopy of a DC discharge in an air stream when a mixture of ethylene and oxygen is introduced into the interelectrode region. Software has been developed for processing emission spectra and a computational model has been developed for determining the gas kinetic temperature of particles in a discharge. The model was verified by comparing the temperatures determined using the created model and models of existing optical methods under the conditions of a burner flame.

Key words: DC discharge, gas kinetic temperature, optical spectroscopy, ethylene, nitrogen, oxygen, air flow

УДК 539.1

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ КАДМИЯ С ВОДОРОДОМ

В.В. Мазаева*, С.А. Яковлева

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д.48

** veronika.mazaeva2000@mail.ru*

В работе представлены результаты теоретического исследования неупругих процессов при столкновениях ионов кадмия с водородом в системе CdH^+ . С использованием подхода Борна-Оппенгеймера и строгих квантово-химических расчетов адиабатических потенциалов и матричных элементов неадиабатической связи методом Нумерова и методом токов вероятности были рассчитаны вероятности и сечения переходов между тремя нижними синглетными состояниями Σ -симметрии. Полученные данные могут быть использованы в дальнейших теоретических исследованиях в области атомных столкновений.

Ключевые слова: водород, кадмий, неадиабатические переходы, неупругие процессы, метод токов вероятности, метод Нумерова, сечения, константы скоростей.

Введение

Характеристики неупругих процессов столкновений атомов и ионов, такие как сечения и константы скоростей, важны для определения свойств газовых и плазменных сред. Экспериментальное исследование таких столкновений, особенно для нейтральных частиц или столкновений, происходящих при низких энергиях, затруднено. Таким образом, именно теоретические расчеты позволяют получить информацию о характеристиках не-

упругих процессов столкновений атомов и ионов, что обуславливает актуальность нашего исследования.

Целью данной работы является исследование неупругих процессов, происходящих при столкновениях положительных ионов кадмия с атомами и отрицательными ионами водорода, а также расчеты сечений и констант скоростей процессов, связанных с переходами между различными молекулярными состояниями системы.

Теоретическая часть

Для исследования неупругих процессов, происходящих при столкновениях атомов и ионов, применяется подход Борна-Оппенгеймера, основной идеей которого является разделение электронной и ядерной подсистем.

В рамках подхода Борна-Оппенгеймера решение электронной задачи позволяет получить адиабатические потенциальные энергии и матричные элементы неадиабатической связи.

Для исследований неадиабатической ядерной динамики необходимо решить систему связанных уравнений для ядерных радиальных волновых функций различных адиабатических состояний системы. В нашей работе для решения этих уравнений используются следующие подходы:

1. Метод Нумерова в адиабатическом представлении для расчетов R -матрицы, связывающей функции и их производные. По известной R -матрице определяется матрица рассеяния S , с помощью которой проводятся вычисления вероятностей и сечений неупругих процессов.
2. Метод прыгающих токов вероятности [1, 2] для вычисления вероятностей переходов из заданного начального состояния в выделенное конечное в рамках модели Ландау-Зинера.

Результаты

Адиабатические потенциальные энергии квазимолекулы CdH^+ , а также матричные элементы неадиабатической связи были рассчитаны строгими квантово-химическими методами *ab initio* в работе [3]. На рисунке 1 приведены потенциальные кривые и радиальные матричные элементы для трех нижних синглетных состояний Σ -симметрии: основного $X^1\Sigma^+$ и двух возбуждённых $A^1\Sigma^+$ и $3^1\Sigma^+$.

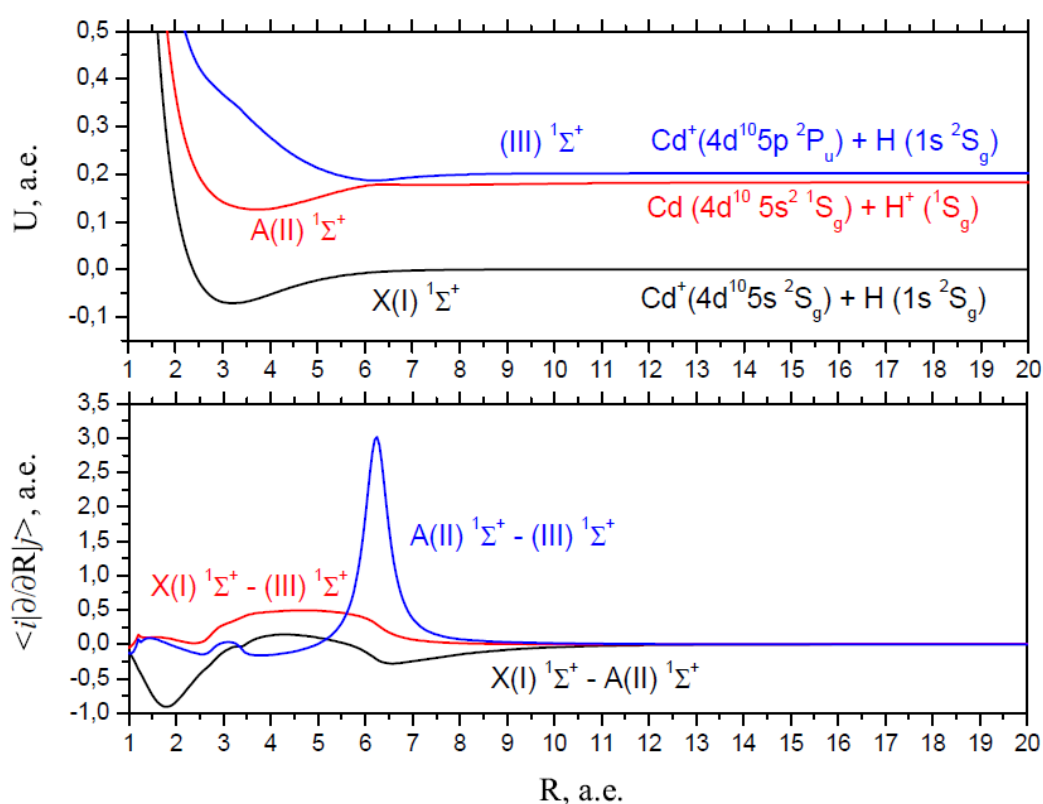


Рисунок 2. Адиабатические потенциальные энергии и радиальные матричные элементы трех нижних синглетных состояний Σ -симметрии квазимолекулы CdH^+

В работе методом Нумерова рассчитаны вероятности процессов, связанных с переходами между этими тремя молекулярными состояниями системы CdH^+ . Сечения неупругих процессов, происходящих при столкновениях ионов кадмия с атомами и ионами

водорода, рассчитаны для диапазона энергий столкновения от 0,0001 до 100 эВ.

Также в работе определены параметры Ландау-Зинера для областей неадиабатичности, соответствующих максимумам радиальных матричных элементов. С использованием этих параметров методом токов вероятности рассчитаны сечения неупругих процессов.

Проведено сравнение сечений, полученных различными методами для оценки их точности. Сечения, рассчитанные разными методами, приведены на рисунке 2.

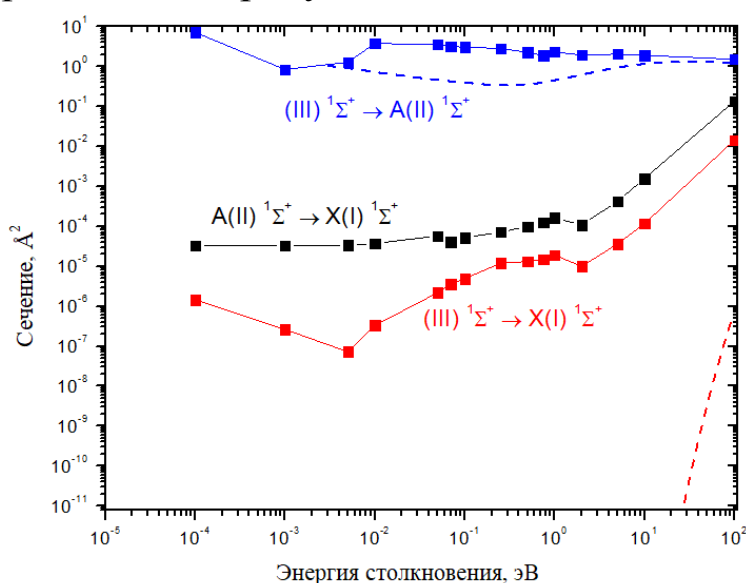


Рисунок 3. Сравнение сечений, рассчитанных методом Нумерова, с сечениями, рассчитанными методом токов вероятности квазимолекулы CdH^+

Оба метода являются эффективными для описания неупругих процессов в системе CdH^+ . Полученные данные могут быть использованы в дальнейших теоретических исследованиях в области атомных столкновений.

Литература

1. Belyaev A. K. Model approach for low-energy inelastic atomic collisions and application to $\text{Al} + \text{H}$ and $\text{Al}^+ + \text{H}^-$ / A. K. Belyaev // Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics. – 2013. – Vol. 88. – Art. 052704.

2. Воронов Я. В. Теоретические исследования неупругих столкновений атомов и ионов различных химических элементов с атомами и ионами водорода: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: специальность: 1.3.3. – теоретическая физика / Я. В. Воронов, научный руководитель А. К. Беляев; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена». – Санкт-Петербург, 2023. – 214 л.
3. Zhang X., Liang G., Li R., Shi D., Liu Y., Liu X., Xu H., Yan B. Multireference configuration interaction study on the potential energy curves and radiative lifetimes of low-lying excited states of CdH^+ cation / X. Zhang, G. Liang, R. Li, D. Shi, Y. Liu, X. Liu, H. Xu, B. Yan // Chemical Physics. – 2014. – Vol. 443. – P. 142–148.

INVESTIGATION OF INELASTIC PROCESSES IN COLLISIONS OF CADMIUM IONS AND HYDROGEN

V.V. Mazaeva*, S.A. Yakovleva

*Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moika Emb., Saint Petersburg, 191186*

* *veronica.mazaeva2000@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of a theoretical study of inelastic processes in collisions of cadmium ions with hydrogen atoms and negative hydrogen ions in the CdH^+ system. Using the Born–Oppenheimer approach and rigorous quantum-chemical calculations of adiabatic potentials and nonadiabatic coupling matrix elements, the probabilities and cross sections for transitions between the three lowest singlet states of Σ -symmetry were calculated by the Numerov method and the probability current method. The obtained data can be used in further theoretical studies in the field of atomic collisions.

Key words: hydrogen, cadmium, nonadiabatic transitions, inelastic processes, probability current method, Numerov method, cross sections, rate constants.

УДК 533.9

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. А. Майстренко^{1,2}

¹Государственный научный центр Российской Федерации

«Исследовательский центр имени М.В.Келдыша»

125438, Россия, Москва, Онежская ул., д. 8

*²Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)*

141701, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский

Переулок 9

master030198@mail.ru

Исследование струй плазмы электроракетных двигателей важно для расчета эффективности двигателей и для определения воздействия струи плазмы двигателя на бортовые устройства космических аппаратов. Существующие средства диагностики не могут обеспечить требуемую точность в интересующем рабочем диапазоне параметров плазмы. Подход к измерениям, представленный в данном докладе, позволяет расширить рабочий диапазон параметров плазмы и позволяет проводить измерения с погрешностью меньшей 2% плотности ионного тока, энергоспектра ионов и доли двухзарядных ионов в плазме холловских двигателей.

Ключевые слова: Холловский двигатель, диагностика плазмы, зонд с задерживающим потенциалом, фильтр Вина.

Применимость электроракетных двигателей растет и всё большую актуальность приобретают задачи, связанные с диагностикой плазмы таких двигателей. В работе представлено моделирование и экспериментальная верификация нового подхода к измерению распределения ионов по энергиям и доли двухзарядных ионов.

Существующие методы измерения [1,2,3] требуют соответствия геометрических размеров зондов параметрам исследуемой плазмы, что делает невозможным корректные измерения одним зондом в различных условиях, например в центре струи электроракетного двигателя и на периферии струи того же двигателя. В данной работе представлен принципиально новый апертурный зонд, который использует двухэлектродную осесимметричную ионно-оптическую систему для отсекаания электронов и фокусировки ионного пучка. Это позволяет зонду работать одинаково точно независимо от радиуса Дебая рассматриваемой плазмы в диапазоне плотностей ионного тока от 10^{-4} до 100 А/м^2 . Новый апертурный зонд, представленный в данном докладе, позволяет восстанавливать энергетический спектр ионов в расширенном на шесть порядков рабочем диапазоне концентраций плазмы по сравнению с традиционным трехсеточным зондом и обладает максимальной погрешностью определения энергетического пика в 1.5%. Также в данной работе рассмотрена применимость зонда типа фильтра Вина для исследования доли двухзарядных ионов в пучке плазмы холловских двигателей. Рассчитан и экспериментально верифицирован фильтр Вина, который может работать с чувствительностью к доле двухзарядных ионов в 0.2% в плазмах с энергией ионов от 100 до 2000 эВ. В работе представлено моделирование работы зондов в плазме и результаты экспериментального тестирования зондов в диапазоне концентраций плазмы от 10^{12} до 10^{18} м^{-3} при электронной температуре 1-5 эВ. Эксперименты, проведенные в струях различных ЭРД с энергией ионов до 2000 эВ и плотностью ионного тока до 50 А/м^2 , доказали работоспособность и превосходство зондов по измерению доли двухзарядных ионов и энергоспектра ионов.

Литература

1. C. Groll, "Development of a plasma diagnostic system," Ph.D. thesis (Delft University of Technology, 2016).
2. S.W. Kim Plume study of a 1.35-kW SPT-100 using an E×B probe DOI:10.2514/2.3897.
3. I. H. Hutchinson, Principles of Plasma Diagnostics (Cambridge University, 2002), 2nd ed.

DEVELOPMENT OF THE ADVANCED PROBE DIAGNOSIS SYSTEM FOR THE ELECTRIC PROPULSION PLUME DIAGNOSIS

D.A. Maystrenko^{1,2}

¹State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center"

8, Onezhskaya Str., Moscow, 125438, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology

Institutskiy Pereulok 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

master030198@mail.ru

The study of plasma plumes from electric propulsion rocket engines is important for calculating the efficiency of the engines and for determining the impact of the engine plasma plume on the onboard devices of spacecraft. The existing diagnostic methods cannot provide the required accuracy in the specified range of plasma parameters. The measurement approach presented in this report allows for an extended range of plasma parameters and provides measurements with an error of less than 2% for the ion current density, ion energy spectrum, and the fraction of double charged ions in the plasma of Hall Thrusters.

Key words: Hall thruster, plasma diagnosis, retarding potential analyzer, Wien filter

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО МЕХА

К.И. Максимова, И.И. Латфуллин*, Г.Р. Рахматуллина

¹ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологи-
ческий университет»

420015, Казань, ул. К. Маркса, 68

*lilatfullin@gmail.com

В работе представлены результаты исследования влияния высокочастотных емкостного и индукционного разрядов пониженного давления на характеристики акриловых эмульсий. Акриловые эмульсии, модифицированные в высокочастотном индукционном разряде пониженного давления, испытаны как додублирующие реагенты для повышения физико-механических характеристик меховой овчины. Установлено, что применение акриловых эмульсий, модифицированных в высокочастотном индукционном разряде, позволяет повысить прочностные характеристики, сохранив при этом пластические свойства кожаной ткани.

Ключевые слова: акриловые эмульсии, высокочастотный емкостной разряд, высокочастотный индукционный разряд, меховая овчина, физико-механические характеристики.

Введение

Развитие меховой индустрии обусловлено внедрением новых технологий и применением реагентов, позволяющих изменять комплекс характеристик меха для достижения необходимых показателей качества материала. Одними из самых востребованных реагентов для повышения качества меха являются полимерные соединения, среди которых особое место занимают акриловые

полимеры. Существенным недостатком применения полимеров является их неравномерная диффузия и, как следствие, неравномерное распределение в объеме кожаной ткани. В результате характеристики меха по топографическим участкам могут отличаться. На диффузию и распределение полимерных наполнителей в объеме кожаной ткани меха существенную роль оказывает их размер частиц. Для регулирования характеристик полимеров и жидких сред известно применение плазменной модификации [1-6]. В работе исследовано влияние акриловых эмульсий, модифицированных в высокочастотных разрядах пониженного давления, на физико-механические характеристики меховой овчины. Меховая овчина является одним из самых распространенных и востребованных среди населения видов меха. Однако, данный вид меха отличается наличием скрытых сырьевых пороков в виде расслаивания кожаной ткани, что приводит к сниженным физико-механическим показателям меха.

Экспериментальная часть

Для изменения характеристик акриловых эмульсий двух марок: LP и ТХ проводили их модификацию в высокочастотном емкостном (ВЧЕ) и высокочастотном индукционном (ВЧИ) разрядах пониженного давления. Схема установки и методика модификации представлена в работе [7]. Характеристики акриловых эмульсий: распределение размеров частиц, индекс полидисперсности (PDI), полидисперсность и Z-средний размер частиц оценивали методом динамического светорассеяния. Угол рассеивания составлял 173° . Погрешность измерения размера частиц составляет $\pm 2\%$.

Обработка акриловой эмульсии LP в ВЧЕ-разряде проводилась при следующих параметрах: мощность разряда (W_{ep}) составляла 700 Вт, продолжительность модификации (τ) – 10 минут,

давление в вакуумной камере (p) – 55 Па. В качестве плазмообразующего газа выбран инертный газ аргон, расход которого составлял 0,04 г/с.

Обработка акриловых эмульсий LP и ТХ в ВЧИ-разряде проводилась при следующих параметрах: $W_{up} = 0,1$ кВт, продолжительность $\tau = 20$ минут, $p = 5$ кПа, расход эмульсии 1,6 мл/с.

В таблицах 1, 2 представлены характеристики акриловых эмульсий, модифицированных в высокочастотных разрядах.

Таблица 1 – Характеристики акриловой эмульсии LP

Эмульсия	Диапазон распределения размеров частиц, нм	PDI	Полидисперсность, нм	Z-средний размер частиц, нм
Контрольная эмульсия LP	78,8-458,7	0,124	65,4	185,5
Модифицированная в ВЧЕ-разряде	91,3-396,1	0,049	42,6	192,4
Модифицированная в ВЧИ-разряде	78,8-458,7	0,147	74,3	194,1

Акриловые эмульсии LP и ТХ применяются для додубливания мехового полуфабриката. Додубливание – процесс дополнительного структурирования кожаной ткани, в результате которого повышается ее термостойкость, плотность лицевого слоя, а также физико-механические показатели. Для дальнейших исследований выбраны акриловые эмульсии, модифицированные в ВЧИ-разряде. Концентрация акриловых эмульсий в процессе додубливания меховой овчины составляла 10 г/дм³.

Таблица 2 – Характеристики акриловой эмульсии ТХ

Эмульсия	Диапазон распределения размеров частиц, нм	PDI	Полидисперсность, нм	Z-средний размер частиц, нм
Контрольная эмульсия ТХ	58,8-955,4	0,510	456,9	639,9
Модифицированная в ВЧИ-разряде	58,8-825,0	0,516	209,3	291,5

Физико-механические характеристики меховой овчины оценивались по следующим показателям: предел прочности при появлении трещин лицевого слоя ($\sigma_{лс}$), относительное удлинение при появлении трещин лицевого слоя ($\epsilon_{лс}$), предел прочности при растяжении (σ), относительное удлинение (ϵ) и модуль упругости. Модуль упругости исследовали в диапазоне 2-5 МПа, так как согласно ГОСТ образцы меха должны выдерживать нагрузку 4,9 МПа. В таблице 3 представлены результаты физико-механических испытаний.

Таблица 3 Физико-механические показатели меховой овчины, обработанной эмульсиями, модифицированными в ВЧИ-разряде

Показатель	Контрольный образец	Исходная эмульсия LP	Эмульсия LP, модифицированная в ВЧИ-разряде	Исходная эмульсия TX	Эмульсия TX, модифицированная в ВЧИ-разряде
σ _{лс} , МПа	6,6	9,3	7,4	12,2	12,8
ε _{лс} , %	62,7	82,9	69,0	72,5	75,5
σ, МПа	11,9	9,6	12,6	13,0	13,0
ε, %	105,8	90,0	107,0	85,1	79,0
Модуль упругости, Па	12,3	11,0	15,4	14,0	15,3

Согласно полученным результатам, предел прочности при появлении трещин лицевого слоя увеличивается на 12,1 %-93,9 % по сравнению с контрольным образцом в случае применения модифицированных эмульсий LP и TX соответственно. Значение предела прочности при растяжении образца меховой овчины, обработанного акриловой эмульсией LP, модифицированной в ВЧИ-разряде, превышает на 31,3 % по сравнению с образцом, обработанным исходной акриловой эмульсией. Модуль упругости образца меховой овчины, обработанного акриловой эмульсией LP, модифицированной в ВЧИ-разряде, повышается на 40 % по сравнению с образцом, обработанным исходной акриловой эмульсией.

Таким образом, модифицированные в ВЧИ-разряде акриловые эмульсии позволяют повысить физико-механические характеристики меховой овчины, не снижая при этом пластических свойств. испытаний меховой овчины.

Литература

1. Yanling C. et al. Non-thermal plasma assisted polymer surface modification and synthesis: A review // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2014. Vol. 7. №. 2. P. 1-9.
2. Liston E. M., Martinu L., Wertheimer M. R. Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review // Journal of adhesion science and technology. 1993. Vol. 7. №. 10. P. 1091-1127.
3. Nemani S. K. et al. Surface modification of polymers: methods and applications // Advanced Materials Interfaces. 2018. Vol. 5. №. 24. P. 1801247.
4. Смирнов С. А., Титов В. А., Рыбкин В. В. Влияние внешних факторов на параметры низкотемпературной плазмы при обработке в ней полимерных материалов // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. №. 3-4. С. 52-59.
5. Gaisin A. F. et al. Electrophysical and thermal processes under discharge burning conditions with a liquid (nonmetallic) cathode // High Temperature. 2023. Vol. 61. №. 4. P. 445-452.
6. Kayumov R. R. et al. Electrical discharge between a metal cathode and a liquid non-metal anode // Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50. №. 1. P. 115-121.
7. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казан. Ун-та, 2000. 348 с.

USING MODIFIED FILLING REAGENTS FOR HIGH-QUALITY FUR PRODUCTION

K. I. Maksimova, I. I. Latfullin*, G. R. Rakhmatullina

Kazan National Research Technological, University 68 Karl Marx Str., Kazan, Russia

**lilatfullin@gmail.com*

The paper presents the research results of the influence of radio-frequency capacitively coupled and induction coupled discharges at intermediate pressure on the characteristics of acrylic emulsions. Modified acrylic emulsions in the radio-frequency induction coupled discharge at intermediate pressure tested as retanning agents to improve the physical and mechanical properties of fur sheepskin. It has been established the use of acrylic emulsions modified in a radio-frequency induction coupled discharge allows to increase the strength characteristics, while maintaining the plastic properties of the leather tissue.

Key words: acrylic emulsions, radio-frequency capacitively coupled discharge, radio-frequency induction coupled discharge, fur sheepskin, physical and mechanical characteristics

УДК: 537.563.22

РАСЧЕТ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ В АЗОТЕ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ю.И. Мамонтов

*Институт электрофизики УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
mamontov@iep.uran.ru*

С помощью метода Монте-Карло определены зависимости кинетических коэффициентов для электронов в азоте от напряженности электрического поля. Проанализировано влияние вариации набора сечений рассеяния Итикавы на результаты расчета. Показано, что даже двадцатипроцентная вариация сечения ионизации молекулы азота приводит к изменению частоты убегания электронов на несколько порядков. Наилучшее согласие расчета с литературными данными достигнуто при увеличении полного сечения рассеяния на 20 процентов, а сечения ионизации – на 5 процентов.

Ключевые слова: ионизационный коэффициент Таунсенда, подвижность электронов, коэффициент диффузии электронов, частота убегания электронов

Введение

Расчет кинетических коэффициентов для электронов в газе в электрическом поле является одним из первых этапов построения моделей газовых разрядов. Для импульсных разрядов при больших перенапряжениях наиболее важными оказываются ионизационный коэффициент Таунсенда α , подвижность μ , коэффициенты поперечной D_T и продольной D_L диффузии, а также частота перехода электронов в режим непрерывного ускорения ν_{esc} (далее – частота убегания). Поэтому необходима достоверная информа-

ция об этих коэффициентах в зависимости от приведенной напряженности поля E/p . В работе проводится анализ Монте-Карло алгоритма, разработанного для расчета кинетических коэффициентов. Особое внимание уделяется анализу используемых сечений взаимодействия электронов с нейтральными частицами газа (азот атмосферного давления). Также приводятся результаты расчета кинетических коэффициентов в полях, существенно превышающих пробивную напряженность электрического поля.

Краткое описание модели

Алгоритм для расчета кинетических коэффициентов реализован с помощью метода Монте-Карло. В рамках одноэлектронного приближения моделируется эволюция ансамбля электронов в молекулярном азоте при различных значениях приведенной напряженности поля E/p . На каждом шаге по времени (5×10^{-16} с) решается две основных задачи: интегрирование уравнений движения электронов и расчет столкновений электронов с частицами газа. Интегрирование уравнений движения реализовано с помощью схемы Бориса второго порядка точности. Столкновения рассчитываются в рамках метода нуль-столкновений, основанном на наборе сечений Итикавы [1]. При определении угла рассеяния электрона в каждом столкновении используются два набора дифференциальных сечений рассеяния электронов: для возбуждения синглетных [2,3] и триплетных [4] уровней молекулы азота. При ионизационных столкновениях сначала с помощью формулы Опала [5] определяется энергия вторичного электрона, а затем находятся углы рассеяния θ_j налетающего и вторичного электронов: $\cos \theta_j = \sqrt{\varepsilon_j / (\varepsilon - \varepsilon_i)}$, где ε_j – энергия первичного ($j = 1$) или вторичного ($j = 2$) электрона, ε – энергия налетающего электрона, ε_i – потенциал ионизации молекулы. Моделирование продолжается до увеличения числа моделируемых электронов в 1000 раз (начальное число электронов – 10000). После этого рассчитыва-

ются коэффициенты α , μ , D_T , D_L , v_{esc} . Частота убегания v_{esc} рассчитывается по методике, приведенной в [6].

Результаты вычислений

Обнаружено, что при использовании исходных сечений [1] вычисление подвижности электронов μ дает значения, заметно превышающие экспериментальные данные при хорошем качественном согласии зависимостей (см. Рис. 1). Аналогично – для результатов расчета коэффициентов диффузии. Для коэффициента α наиболее существенные отклонения наблюдаются в области $E/p > 220$ кВ/(см·атм), где расчетные α оказываются заметно меньше экспериментальных значений. Обнаружено, что результаты расчета коэффициентов оказываются наиболее чувствительны к величине сечения ионизации σ_i , а также к величине полного сечения σ_{tot} рассеяния электрона на молекуле азота. При увеличении σ_{tot} на 20% и одновременном увеличении σ_i на 5% происходит существенная коррекция рассчитываемых значений кинетических коэффициентов: для рассчитанных подвижности μ и коэффициента α обнаружено хорошее количественное согласие с экспериментальными данными. Также наблюдается удовлетворительное (до 10% отклонения) согласие величины D_L/μ с экспериментальными данными и аналитическими оценками [9]. Увеличение σ_i еще на 15% приводит к еще лучшему согласию результатов расчета и литературных данных. Однако обнаружено, что варьирование σ_{tot} и σ_i заметно влияет на порог убегания электронов при полях $E/p > 200$ кВ/(см·атм) и чрезвычайно сильно влияет на величину частоты убегания v_{esc} . Так, при $E/p = 310$ кВ/(см·атм) величина v_{esc} при исходных значениях σ_{tot} и σ_i отличается от v_{esc} , рассчитанной при увеличении сечений на 20%, почти на 4 порядка величины. По мнению автора, наиболее корректные значения коэффициентов были получены при увеличении σ_{tot} на 20%, а σ_i – на 5%. Использование исходных сечений неадекватно уменьшало

порог убегания электронов и завышало величину ν_{esc} . Напротив, одновременное увеличение σ_{tot} и σ_i на 20% сильно затрудняло убегание электронов, хотя при этом наблюдалось хорошее согласие остальных кинетических коэффициентов с литературными данными.

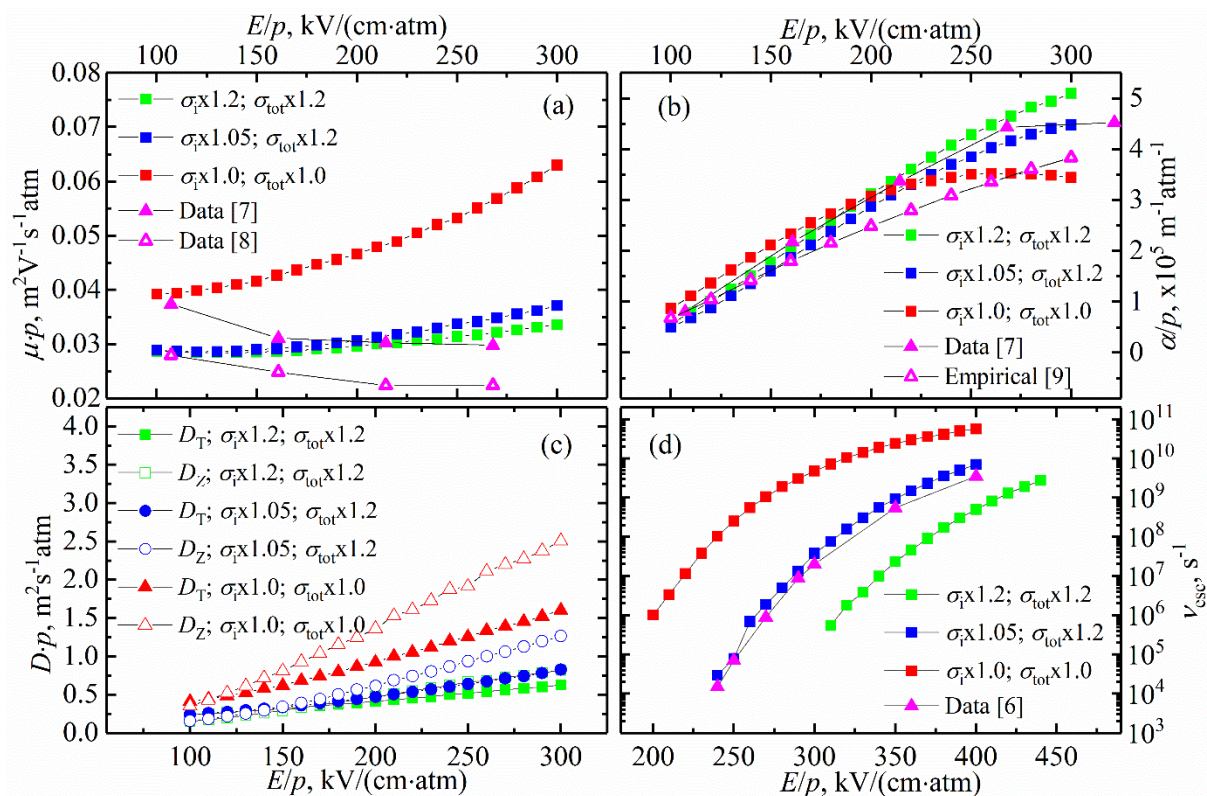


Рис. 1. Результаты расчета кинетических коэффициентов: а) – подвижность μ , б) – коэффициент α , в) – коэффициенты диффузии D_T и D_L , д) – частота убегания ν_{esc} .

Заключение

Разработан Монте-Карло алгоритм для вычисления значений кинетических коэффициентов для электронов в молекулярном азоте. Проведен анализ влияния варьирования полного сечения и сечения ионизации [4] молекулы азота на величины рассчитываемых коэффициентов. Показано, что такое варьирование сильно влияет на порог убегания электронов. При этом хорошее согласие прочих значений коэффициентов с литературными данными может наблюдаться одновременно с неадекватно заниженной частотой

той убегания электронов. Оптимальные результаты расчета коэффициентов получены при одновременном увеличении полного сечения рассеяния электрона на 20% и сечения ионизации на 5% относительно их исходных значений [1]. Влияние применяемого набора сечений на результаты расчетов необходимо учитывать при построении численных моделей газовых разрядов.

Литература

1. Itikawa Y. Cross Sections for Electron Collisions with Nitrogen Molecules // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2006. Vol. 35. No. 1. P. 31 – 53.
2. Shyn T.W. et al. Angular Distribution of Electrons Elastically Scattered from N₂ // Phys. Rev. A. 1972. Vol. 6. No. 3. P. 1002 – 1012.
3. DuBois R.D., Rudd M.E. Differential cross sections for elastic scattering of electrons from argon, neon, nitrogen and carbon monoxide // J. Phys. B: Atomic and Molec. Phys. 1976. Vol. 9. No. 15. P. 2657 – 2667.
4. Cartwright D.C. et al. Electron impact excitation of the electronic states of N₂. I. Differential cross sections at incident energies from 10 to 50 eV // Phys. Rev. A. 1977. Vol. 16. No. 3. P. 1013 – 1040.
5. Opal C.B. et al. Measurements of secondary-electron spectra produced by electron impact ionization of a number of simple gases // J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. No. 8. P. 4100 – 4106.
6. Bakhov K.I. et al. Temporal Characteristics of Runaway Electrons in Electron-Neutral Collision-Dominated Plasma of Dense Gases. Monte Carlo Calculations // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28. No 4. P. 1254 – 1262.
7. Phelps A.V., Pitchford L.C. Anisotropic scattering of electrons by N₂ and its effect on electron transport // Phys. Rev. A. 1985. Vol. 31. No. 5. P. 2932 – 2949.
8. Vojnovic' M. et al. Rate coefficients for electron impact excitation of N₂ // Chem. Phys. 2015. Vol. 463. P. 38 – 46.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 736 с.

CALCULATION OF KINETIC COEFFICIENTS FOR ELECTRONS IN NITROGEN IN A HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELD

Yu.I. Mamontov

*Institute of Electrophysics, UB RAS
620016, 106 Amundsena Str., Yekaterinburg, Russia
e-mail: mamontov@iep.uran.ru*

Using the Monte Carlo method, the dependences of the kinetic coefficients for electrons in nitrogen on the electric field strength were determined. The effect of varying the set of scattering cross sections by Itikawa on the calculation results was analyzed. It was shown that even a 20% variation in the ionization cross section of a nitrogen molecule leads to a change in the electron runaway frequency by several orders of magnitude. The best agreement between the calculation and the literature data was achieved with a simultaneous increase in the total scattering cross section by 20% and the ionization cross section by 5%.

Key words: Townsend ionization coefficient, electron drift velocity, electron mobility, electron runaway frequency

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ $\text{Be}^{2+} + \text{H}^-$ И $\text{Be}^+ + \text{H}$

А.А. Мамонтова*, С.А. Яковлева

*Российский государственный педагогический университет
им. А.И. Герцена, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д.48*

** fukk15tsumi07@gmail.com*

Аннотация. Работа посвящена теоретическому исследованию низко-энергетических неупругих процессов при столкновениях ионов бериллия с ионами водорода с использованием модельного асимптотического подхода. В рамках исследования применён подход Борна-Оппенгеймера, позволивший разделить задачу на два последовательных этапа: расчёт электронной структуры и анализ ядерной динамики. Для определения вероятностей неадиабатических переходов, необходимых при вычислении сечений неупругих столкновений и констант скоростей, использована многоканальная модель Ландау-Зинера. Расчёт электронной структуры выполнен с применением асимптотической модели, обеспечивающей описание взаимодействий на больших межъядерных расстояниях. Исследование ядерной динамики проведено в рамках многоканальной модели Ландау-Зинера для диапазона энергий столкновений 0,001 до 100 эВ. На основе полученных данных рассчитаны константы скоростей неупругих процессов для температурного интервала 1000 – 10000 К.

Ключевые слова: атомные данные, бериллий, водород, неадиабатические переходы, неупругие процессы

Введение

Данная работа посвящена исследованию неупругих процессов при столкновениях ионов бериллия с ионами водорода. Бериллий - один из наименее распространенных элементов во Все-

ленной. Из-за своей редкости бериллий играет роль важного индикатора специфических процессов нуклеосинтеза и эволюции химического состава галактик. Его обнаружение и количественное определение в астрофизических объектах, таких как звездные атмосферы и межзвездная среда дает ценную информацию об условиях их формирования и эволюции. При этом для корректной интерпретации астрофизических наблюдений необходимы точные данные о поведении бериллия в различных ионных состояниях и при разных физических условиях. В частности, изучение процессов столкновения ионов бериллия с ионами водорода имеет непосредственное отношение к пониманию физики плазменных сред. Столкновения могут приводить к множеству неупругих процессов, таких как: возбуждение, девозбуждение, ионизация, рекомбинация, образование ионных пар и взаимная нейтрализация. В данной работе особое внимание уделяется двум конкретным системам: $\text{Be}^{2+} + \text{H}^-$ и $\text{Be}^+ + \text{H}$. Изучение процессов столкновений двухзарядного иона бериллия с гидрид-ионом позволяет понять, как может происходить нейтрализация бериллия в средах, богатых водородом. С другой стороны, столкновение однозарядного иона бериллия с нейтральным атомом водорода позволяет исследовать процессы возбуждения и, возможно, дальнейшей ионизации в условиях, характерных для звездных атмосфер и межзвездной среды. В работе представлены результаты расчета сечений и констант скоростей для неупругих процессов в системе BeH^+ , выполненный в рамках модельного подхода.

Теоретическая часть

При теоретическом анализе неупругих столкновений иона бериллия с водородом используется стандартный адиабатический подход Борна-Оппенгеймера (БО) [1]. Задача столкновения в рамках подхода БО решается поэтапно: 1) расчет электронной конфигурации и 2) анализ неадиабатической ядерной динамики.

Для расчёта вероятности перехода из начального состояния i в конечные состояния f необходимо знать вероятности Ландау-Зинера в каждой из областей. В исследовании неадиабатической ядерной динамики использована многоканальная модель Ландау-Зинера и получены вероятности $P_{if}(E)$ как функции от энергии столкновения E и квантового числа полного углового момента J :

$$P_{if}(E, J) = 2 \cdot p_f \cdot (1 - p_f) \cdot (1 - p_i) \left\{ \prod_{l=f+1}^{i-1} p_l \right\} \cdot \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{2(f-1)} \prod_{k=1}^m \left(-p_{f-\left[\frac{k+1}{2}\right]} \right) \right\},$$

где p_i – вероятность однократного перехода, рассчитанная по формуле Ландау-Зинера. Сечения рассчитаны как сумма по J :

$$\sigma_{if}(E) = \frac{\pi \hbar^2 p_i^{stat}}{2\mu E} \sum_{J=0}^{J_{max}} P_{if}(J, E) (2J + 1),$$

где p_i^{stat} – статистическая заселенность начального канала, μ – приведенная масса ядер. Константа скорости рассчитывается по формуле:

$$K_{if}(T) = \sqrt{\frac{8}{\pi \mu (k_B T)^3}} \int_0^\infty \sigma_{if}(E) E e^{-\frac{E}{k_B T}} dE,$$

здесь k_B – постоянная Больцмана.

Результаты

В работе исследованы неупругие процессы, происходящие при столкновениях ионов бериллия с атомами и ионами водорода:

- Взаимная нейтрализация: $Be^{2+}(1s^2) + H^-(1s^2) \rightarrow Be^+(1s^2 nl) + H$
- Возбуждение: $Be^+(1s^2 nl) + H \rightarrow Be^+(1s^2 n' l') + H$
- Девозбуждение: $Be^+(1s^2 n' l') + H \rightarrow Be^+(1s^2 nl) + H$

- Образование ионной пары: $Be^+(1s^2nl) + H \rightarrow Be^{2+}(1s^2) + H^-(1s^2)$

Для исследований перечисленных процессов в работе построены адиабатические потенциальные энергии различных молекулярных состояний BeH^+ , асимптотические значения энергий для которых взяты из базы данных NIST [3]. Исследованы двадцать четыре потенциальных терма: один – ионный, остальные двадцать три – ковалентных.

В результате исследования рассчитаны характеристики неупругих процессов, связанных с переходами между 24 молекулярными состояниями. Проведены расчеты сечений неупругих процессов в диапазоне энергий столкновения от 0,001 до 100 эВ и констант скоростей для температур от 1000 до 10000 К. Показано что, наибольшие значения имеют процессы взаимной нейтрализации при столкновениях двухзарядного иона бериллия с гидрид-ионом.

Финансирование

Работа поддержана внутренним грантом РГПУ им. А. И. Герцена (№ 46-ВГ).

Литература

6. M. Born and R. Oppenheimer, *Annalen der Physik*, 389, 457, 1927.
7. Belyaev A. K. Model approach for low-energy inelastic atomic collisions and application to $Al^+ H$ and $Al^{++} H^-$ // *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics*. 2013. T. 88. №. 5. C. 052704.
8. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2026, April 21]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
9. Amarsi A. M. Solar beryllium abundance revisited with 3D non-LTE models / A. M. Amarsi, D. Ogneva, G. Buldgen, N. Grevesse, Y. Zhou, P. S. Barklem // *Astronomy and Astrophysics*. 2024. Vol. 690, A128. DOI:

AN INVESTIGATION OF INELASTIC PROCESSES IN $\text{Be}^{2+} + \text{H}^-$ AND $\text{Be}^+ + \text{H}$ COLLISIONS

A.A.Mamontova *, S.A. Yakovleva

*Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moika Emb., Saint Petersburg, 191186*

** fukk15tsumi07@gmail.com*

This research undertakes a theoretical study of low-energy inelastic collisions of beryllium and hydrogen ions, employing a model asymptotic approach. The study applies the Born-Oppenheimer framework to decouple the problem into two sequential stages: the determination of electronic structure and the subsequent analysis of nuclear dynamics. For the computation of non-adiabatic transition probabilities, essential for deriving inelastic scattering cross-sections and rate coefficients, a multichannel Landau-Zener model is implemented. The electronic structure calculations are performed within an asymptotic approach, which provides a description of interactions at extended internuclear separations. The investigation of nuclear dynamics is conducted using the multichannel Landau-Zener model across a collision energy spectrum spanning from 0.001 to 100 eV. Consequently, rate coefficients for the inelastic processes are derived for a temperature regime ranging from 1000 to 10000 K.

Key words: atomic data, beryllium, hydrogen, inelastic processes

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКРЫТИЙ С РАЗЛИЧНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ, ОСАЖДЁННЫХ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ, НА ИЗНОС ФРЕЗ

М.А. Мелкомукров^{1,*}, В.Е. Мисников¹, О.Л. Шутьев¹,
Е.П. Хренова^{1,2}, А.Д. Шумков^{1,3}

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва,

³НИТУ «МИСИС», г. Москва

* *melkomukov1@mail.ru*

Настоящее исследование посвящено изучению влияния многослойных покрытий TiAlN/TiN и TiAlSiN/TiN, осажденных вакуумно-дуговым методом на фрезы из твердого сплава WC-10Co. Цель — повышение стойкости инструмента за счет оптимизации структуры и свойств покрытий. Изучены микроструктура, твердость, адгезия и износостойкость. Полученные результаты демонстрируют превосходство нанокристаллических многослойных покрытий.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое напыление, износостойкие покрытия, механические свойства, испытание фрез.

Введение

В современной металлообработке твердые защитные покрытия на режущий инструмент существенно повышают стойкость к износу, термостабильность и эффективность резания, позволяя увеличить скорости и подачи на 50–200% по сравнению с непокрытым инструментом. Это обусловлено необходимостью противодействовать абразивному, адгезионному и диффузионному износу при температурах более 800°C и высоких нагрузках [1].

Основные применяемые покрытия — PVD-нанесенные нитриды: TiAlN ($H=25\text{--}35$ ГПа), TiAlSiN и их многослойные аналоги

(TiAlN/TiN, TiAlN/CrN), демонстрирующие твердость 30–40 ГПа, низкий коэффициент трения (0.3–0.5) [2-4].

В данной работе исследовалось влияние покрытий на основе TiAlN с различной архитектурой слоев на износ фрез из твердого сплава WC-10Co.

Установка вакуумно-дугового напыления

Исследуемые покрытия наносились методом вакуумно-дугового осаждения. Он представляет собой метод физического осаждения из паровой фазы (PVD), используемый для нанесения тонких пленок и покрытий высокой плотности и адгезии на подложки различной геометрии.

Нанесение покрытий производилось в установке вакуумно-дугового напыления «Кремень-2», оснащенная 12 дуговыми испарителями, ионным источником для очистки поверхности (рисунок 1).



Рисунок 1 – Установка вакуумно-дугового напыления «Кремень-2»

Нанесение покрытий

В данной работе в качестве образцов использовались твердосплавные фрезы из WC-10Co. В ходе работы были получены покрытия: а) монослойное наноструктурированное покрытие TiAlSiN, б) многослойное покрытие TiAlN/TiN, в) многослойное покрытие с наноразмерными слоями TiAlN/TiN-nc (рисунок 2).

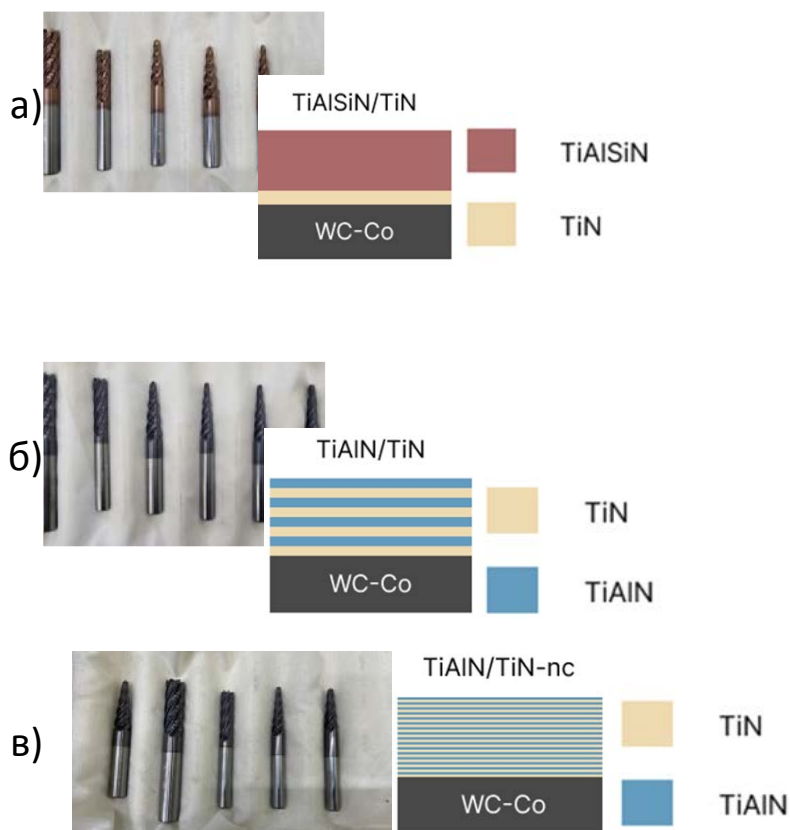


Рисунок 2 – Полученные покрытия

Исследование покрытий

Для определения структуры покрытий использовался СЭМ. По полученным результатам выявлено, что при напылении монослойного покрытия TiAlSiN оно обладает столбчатой структурой по направлению роста покрытия. Многослойное покрытие с толщиной слоев порядка 800 нм характеризуется равноосной структурой. Покрытие с нанослоями, с модуляцией слоев 10 нм, обладает столбчатой структура с прерывистым ростом: столбцы име-

ют ограниченную высоту и реиницируются на промежуточных уровнях, образуя слоистую архитектуру, вероятно это происходит за счет измельчения зерна при формировании наноразмерных слоев.

Для определения адгезионной стойкости покрытий применялся метод скретч-тестирования на образцах свидетелях. По результатам исследования покрытия продемонстрировали высокую адгезионную и когезионную стойкость (рисунок 3).

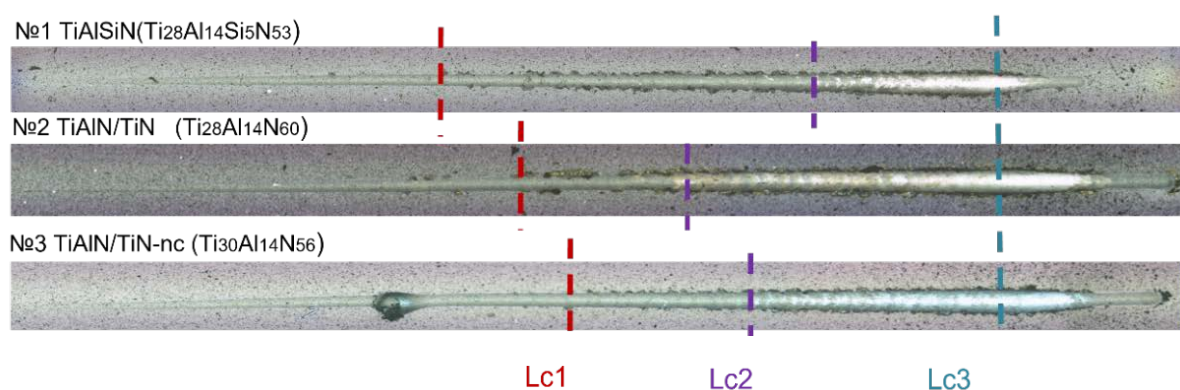


Рисунок 3 – Скретч-тест покрытий

Для покрытий также были исследованы нанотвердость и модуль упругости. Покрытия TiAlN/TiN и TiAlN/TiN-nc показали высокие значения твердости 33 и 36 ГПа, в то время как покрытие TiAlSiN/TiN продемонстрировало твердость в 25 ГПа. При этом в ходе исследования было выявлено, что наименьшей скоростью износа обладает покрытие TiAlSiN/TiN 4 нм/м против 9,5 и 12,5 нм/м для покрытий TiAlN/TiN и TiAlN/TiN-nc соответственно.

По результатам испытаний был составлен график зависимости среднего износа по задней поверхности зуба фрезы от времени (рисунок 4).

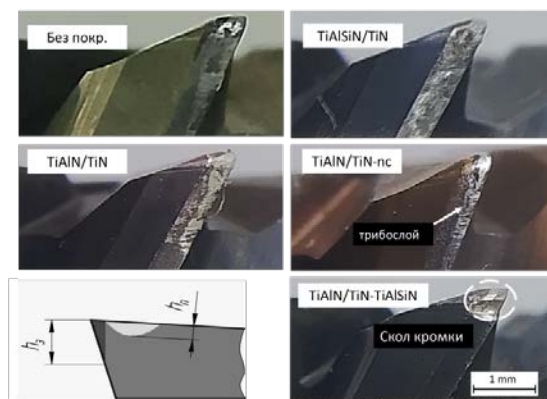
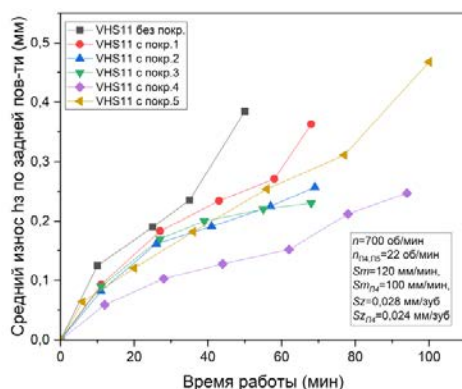


Рисунок 4 – Зависимость износа от времени работы

Для непокрытого инструмента основным механизмом износа является абразивный износ с интенсивным образованием трибослойа на основе материала заготовки. Все исследованные покрытия значительно повышают износостойкость резцов по сравнению с непокрытым инструментом, при этом покрытие на основе TiAlN/TiN-nc демонстрирует наилучшие эксплуатационные характеристики в данных условиях. Показано увеличение износостойкости фрез более чем в 1,5 раза.

Литература

1. Sharifi Malvajerdi S. et al. TiCrN-TiAlN-TiAlSiN-TiAlSiCN multi-layers utilized to increase tillage tools useful lifetime //Scientific Reports. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 19101.
2. Park J. K. et al. Improvement of hardness and toughness of TiAlN coating by nanoscale multilayered structurization with Si3N4 //Plasma Processes and Polymers. – 2007. – Т. 4. – №. S1. – С. S902-S905.
3. Bauyrzhan R. et al. Effect of Bilayer Thickness and Bias Potential on the Structure and Properties of (TiZr/Nb) N Multilayer Coatings as a Result of Arc-PVD Deposition //Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 21. – С. 7696.
4. Ibrahim M. S. et al. Tool wear of DLC coating as top-layered to CrN, TiAlSiN, TiAlN coatings in machining of steel and aluminum alloys //Wear. – 2024. – Т. 558. – С. 205574.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COATINGS WITH DIFFERENT ARCHITECTURES DEPOSITED BY THE VACUUM-ARC METHOD ON THE WEAR OF MILLING CUTTERS

M.A. Melkomukov^{1,*}, V.E. Misnikov¹, O.L. Shutev¹, E.P. Khrenova^{1,2},
A.D. Shumkov^{1,3}

¹*NRC Kurchatov Institute, Moscow*

²*NRNU «MEPhI», Moscow*

³*NUST "MISiS", Moscow*

* melkomukov1@mail.ru

The present study is devoted to studying the effect of multilayer coatings TiAlN/TiN and TiAlSiN/TiN deposited by the vacuum-arc method on WC-10Co hard alloy milling cutters. The goal is to increase the durability of the tool by optimizing the structure and properties of coatings. The microstructure, hardness, adhesion, and wear resistance have been studied. The results obtained demonstrate the superiority of nanocrystalline multilayer coatings.

Keywords: vacuum arc spraying, wear-resistant coatings, mechanical properties, milling cutter testing.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА СТЕПЕНЬ ДИССОЦИАЦИИ $N_2 + O_2$ ДЛЯ СИНТЕЗА ПОКРЫТИЙ $TiON$ АНОДНЫМ ИСПАРЕНИЕМ ТИТАНА

Ю.А. Меньшакова^{1,2}, А.И. Меньшаков^{1,2*}

¹Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

* menshakovandrey@mail.ru

В работе исследован дуговой разряд с самонакаливаемым полым катодом (СНПК) и секционным анодом для синтеза покрытий $TiON$ реактивным испарением титана в среде $Ar+N_2 + O_2$. Методом оптической эмиссионной спектроскопии проанализирован состав плазмы разряда, оценена степень диссоциации реактивных газов (до 26% для N_2 , до 35% для O_2), установлены взаимосвязи между параметрами разряда и составом плазмы. Показано, что рост интенсивности испарения титана оказывает большее влияние на степень диссоциации газов, чем рост тока на охлаждаемую секцию.

Ключевые слова: степень диссоциации, самонакаливаемый полый катод, дуговой разряд, эмиссионная спектроскопия

Введение

Развитие методов модификации поверхности и синтеза функциональных покрытий остаётся актуальным направлением материаловедения. Оксинитрид титана (TiO_xN_y) привлекает вни-

мание благодаря широкому диапазону свойств – от проводящих (TiN) до изолирующих (TiO₂) характеристик, что делает его перспективным для микроэлектроники, износостойких покрытий режущих инструментов, биомедицинских и декоративных применений, а также для создания датчиков и катализаторов [1–2].

Важным фактором управления составом и структурой TiON покрытий является степень активации и диссоциации компонентов в плазме, которая определяется параметрами разряда и составом газовой среды. Точный контроль этих параметров позволяет регулировать соотношение кислорода и азота в покрытии и, как следствие, его функциональные свойства [3].

Цель данной работы – спектральный анализ плазмы разряда с СНПК при реактивном испарении титана в среде, содержащей N₂ и O₂, а также определение степеней диссоциации азота и кислорода. Полученные данные позволят оптимизировать условия формирования TiON покрытий с контролируемым составом, структурой и свойствами.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования проводились в газоразрядной системе на основе дугового разряда с самонакаливаемым полым катодом (СНПК) и секционным анодом, обеспечивающим независимый контроль скорости испарения металла и активации газовой смеси (Рис. 1а). Секционный анод включал водоохлаждаемый полый цилиндр из нержавеющей стали (12Х18Н10Т) и полый тигель из графита (МПП-7). Подробное описание работы газоразрядной системы приведено в работе [4].

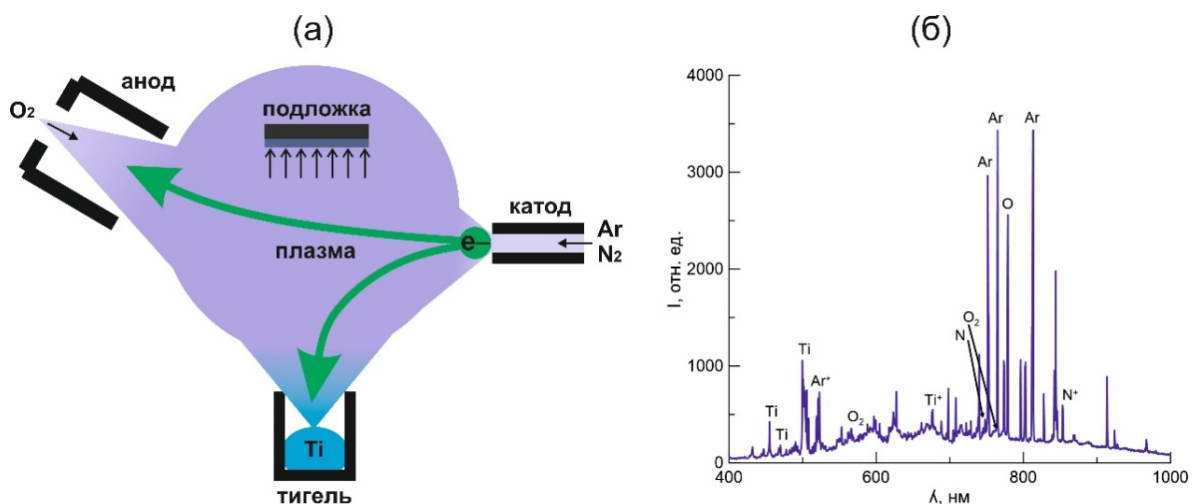


Рис. 1. а – Схема газоразрядной системы с СНПК; б – Спектр оптического излучения плазмы $\text{Ar}+\text{N}_2 +\text{O}_2 +\text{Ti}$

Ток разряда в цепи охлаждаемого анода (I_d) варьировался в диапазоне 5–20 А, ток в цепи тигля (I_T) – в диапазоне 1–15 А, а потоки реактивных газов (Q_{N_2} и Q_{O_2}) — в диапазоне 3–30 $\text{см}^3/\text{мин}$. Давление газовой смеси составляло 0,2–0,4 мТорр.

Состав плазмы анализировали методом оптической эмиссионной спектроскопии с использованием спектрометра OceanOptics HR2000 в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм при разрешении 0,84 нм. На представленном эмиссионном спектре плазмы (Рис. 1б), генерируемой в газовой смеси $\text{Ar}+\text{N}_2 +\text{O}_2 +\text{Ti}$, зарегистрированы характерные линии излучения компонентов, определяющих формирование покрытия на основе оксинитрида титана (TiON).

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены – зависимости степеней диссоциации D_{N_2} и D_{O_2} от токов разряда и тигля, а также от потоков газов в смеси $\text{Ar}+\text{N}_2 +\text{O}_2 +\text{Ti}$. Степени диссоциации D_{N_2} и D_{O_2} рассчитаны по формуле $N_i/N_0 = (I_i/I_0) \cdot (A_0 \cdot h\nu_0 \cdot \tau_0 \cdot \sigma_0 / A_i \cdot h\nu_i \cdot \tau_i \cdot \sigma_i)$, где N_i/N_0 – концентрация частиц в основном состоянии, I_i/I_0 – интенсивность спектральной линии, A_i/A_0 – коэффициент Эйнштейна,

$h\nu_i/\square$ – энергия перехода, $\tau_i/\square$ – время жизни состояния, $\sigma_i/\square$ – сечение возбуждения. Расчёты выполнены с использованием констант для спектральных линий: O_2 (559 нм), N_2 (337,1 нм), O (777,4 нм), N (746,8 нм).

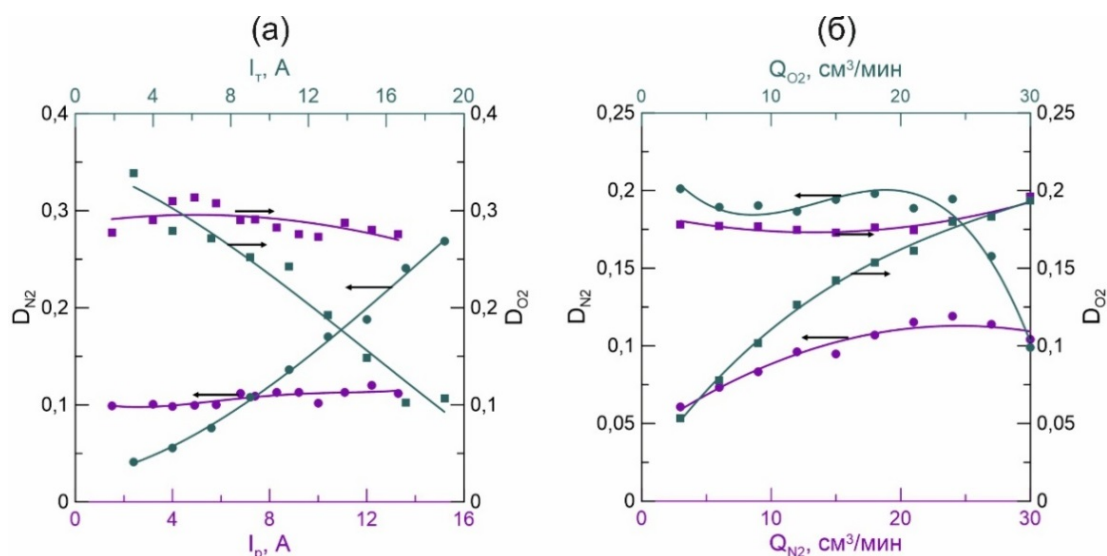


Рис. 2. Зависимости степени диссоциации азота (D_{N_2}) и кислорода (D_{O_2}) от параметров дугового разряда в смеси $Ar+N_2+O_2+Ti$: (а) – от тока разряда (I_p) при $I_T = 5$ А, $Q_{N_2} = 15$ см³/мин, $Q_{O_2} = 15$ см³/мин и тока тигля (I_T) при $I_p = 5$ А, $Q_{N_2} = 15$ см³/мин, $Q_{O_2} = 15$ см³/мин, (б) – от потока азота (Q_{N_2}) при $I_p = 10$ А, $I_T = 15$, $Q_{O_2} = 15$ см³/мин и кислорода (Q_{O_2}) при $I_p = 10$ А, $I_T = 15$ А, $Q_{N_2} = 15$ см³/мин.

Кривые иллюстрируют нелинейную динамику процессов диссоциации. Степень диссоциации существенно зависит от параметров горения (ток разряда, давление, расход газов). Для N_2 максимум составляет 26%, для O_2 – 30 %, что может способствовать активному формированию $TiON$.

Заключение

Параметры дугового разряда (токи разряда и тигля, потоки газов) существенно влияют на степени диссоциации азота (D_{N_2} , до 26 %) и кислорода (D_{O_2} , до 35 %) в плазме $Ar+N_2+O_2+Ti$. В большей мере на степень диссоциации газов влияет ток в цепи

тигля, что, вероятно, обусловлено локальным резким увеличением концентрации плазмы и, соответственно, интенсификацией плазменных процессов в области распространения интенсивного ионизованного потока паров металла.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-29-01705).

Литература

1. Beshchasna A.Y.K., Ho M., Saqib H., Kraśkiewicz Ł., Wasyluk O., Kuzmin O., Duta O.C., Fikai D., Trusca R.D., Fikai A., Pichugin V.F., Opitz J., Andronescu E. Surface evaluation of titanium oxynitride coatings used for developing layered cardiovascular stents // *Materials Science and Engineering*. 2019. P. 405 – 416
2. Li C.-Y., Sari F.N.I., Ting J.-M. Reactive magnetron sputter-deposited TiN_xO_y multilayered solar selective coatings // *Solar Energy*. 2019. Vol. 181. P. 178 – 186.
3. Libardi J., Grigorov K.G., Moraes R.S., Guerino M., da Silva Sobrinho A.S., Massi M. Electrical conduction mechanisms in metal–insulator–metal (MIM) structure with TiO_xNy thin films deposited with different O/N ratios // *Journal of Electronic Materials*. 2015. Vol. 44. P. 103–109.
4. Menshakov A.I., Bruhanova Y.A., Kukharensko A.I., Zhidkov I.S. Synthesis of Nanocomposite $TiSiCN$ Coatings by Titanium Evaporation and Organosilicon Compound Activation in Hollow Cathode Arc Discharge // *Membranes*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 321.

INFLUENCE OF ARC DISCHARGE PARAMETERS ON THE DEGREE OF $N_2 + O_2$ DISSOCIATION FOR THE SYNTHESIS OF TiON COATINGS BY ANODIC EVAPORATION OF TITANIUM

A.I. Menshakov^{1,2*}, Yu.A. Menshakov^{1,2}

¹*Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
620016, Yekaterinburg, Amundsen St., 106*

²*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
620002, Yekaterinburg, Mira St., 19
e-mail: menshakovandrey@mail.ru*

The study investigated an arc discharge with a self-heated hollow cathode (SHHC) for the synthesis of TiON coatings by reactive evaporation of titanium in an $Ar+N_2 + O_2$ environment. The dissociation degree of the reactive gases was estimated (up to 26% for N_2 , up to 35% for O_2), and the relationships between discharge parameters and plasma composition were established. The increase in titanium evaporation intensity has a greater effect on the degree of gas dissociation than the increase in current to the cooled section.

Key words: degree of dissociation, self-heating hollow cathode, arc discharge, emission spectroscopy

УДК 537.533, 537.525.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В МНОГОДУГОВОМ ИСТОЧНИКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

**М.А. Мокеев*, Д.А. Горьковская, П.В. Москвин, М.С.
Воробьёв, Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, Р.А. Картавцов.**

Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

**ma.mokeev@hcei.ru*

Аннотация статьи. В работе исследована относительная неоднородность электронного пучка, формируемого источником электронов с сеточным плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления. Профиль пучка в области коллектора оценивался косвенным методом по распределению интенсивности тормозного рентгеновского излучения, регистрируемого люминофорным экраном $Gd_2O_2S:Tb$ и ПЗСкамерой. Показано, что при изменении давления рабочего газа, тока пучка, ускоряющего напряжения и магнитного поля возможно формирование широкого электронного пучка диаметром до 60 мм с относительной неоднородностью до 10 %.

Ключевые слова: многодуговой разряд, источник электронов, относительная неоднородность, сеточный плазменный катод.

Введение

Одним из важных направлений исследований в области вакуумной и плазменной электроники является изучение процессов формирования интенсивных электронных пучков в источниках электронов с плазменным катодом. Наряду с током пучка, ускоряющим напряжением и длительностью импульса существенное значение имеет пространственное распределение плотности энер-

гии в поперечном сечении пучка. Данный параметр отражает не только пригодность пучка для последующего технологического применения, но и особенности физических процессов, протекающих при формировании эмиссионной плазмы, извлечении электронов и их транспортировке к поверхности обрабатываемого изделия.

При импульсном воздействии электронного пучка субмиллисекундной длительности локальная плотность энергии определяет скорость нагрева, глубину модифицированного слоя, интенсивность плавления и испарения. Поэтому даже при одинаковой полной энергии импульса пространственная неоднородность пучка может приводить к существенному различию температурных полей в отдельных участках модифицируемой поверхности и формированию локальных перегревов. Целью данной работы является исследование относительной неоднородности электронного пучка в источнике электронов с плазменным катодом на основе многодугового разряда низкого давления.

Методика эксперимента

Исследование относительной неоднородности электронного пучка проводилось в многодуговом источнике электронов “СОЛО”.

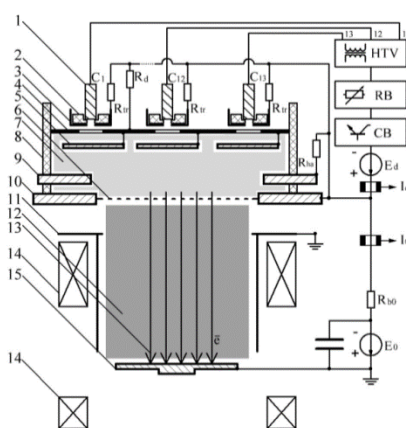


Рис.1. Схема модернизированного источника “СОЛО” с многодуговой разрядной системой.

В разработанном плазменном эмиттере инициирование катодных пятен происходит на 13 катодах, 12 из которых располо-

жены по окружности диаметром 84 мм и на одном дополнительном – в центре эмиттера. Инициирование катодного пятна на каждом катоде 1 происходит при электрическом пробое по поверхности изолятора 2 между катодом 1 и поджигающим электродом 3, после чего разряд переключается на электроды полого анода 9, 10. Отбор электронов из плазменного катода осуществляется через ячейки эмиссионной сетки 6, расположенной на анодном электроде 10, под действием постоянного ускоряющего напряжения от источника E_0 . Экстракция и ускорение электронов при давлении рабочего газа $p(\text{Ar}) = (1 - 5) \cdot 10^{-2}$ Па приводят к наработке плазмы в пространстве транспортировки электронного пучка и формированию анодной пучковой плазмы. Пучок транспортируется до коллектора 15 на расстояние около 600 мм. Более подробное описание источника электронов приведено в работе [1].

Экспериментальная оценка профиля электронного пучка выполнялась косвенным методом по распределению интенсивности тормозного рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии электронного пучка с мишенью. На рисунке 2 представлена схема измерительного стенда, где на расстоянии 2 мм от мишени была закреплена сборка, состоящая из алюминий-бериллиевой фольги толщиной 40 мкм, листа политетрафторэтилена толщиной 2 мм, пленки поливинилхлорида толщиной 150 мкм, серийно выпускаемого рентгеновского экрана на основе люминофора $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, пленки поливинилхлорида толщиной 150 мкм. Видимое излучение от люминофора регистрировали ПЗС-камерой. Экспозицию начинали с задержкой 7 мкс относительно фронта импульса тока пучка и заканчивали через 1 мс после его среза.

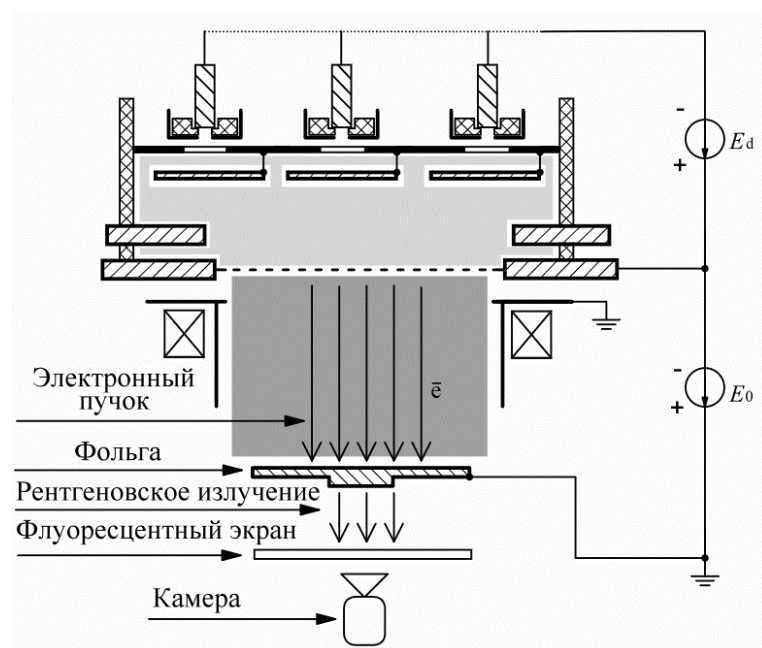


Рис.2. Постановка эксперимента по измерению профиля относительного распределения тока пучка электронов в области коллектора.

Результаты и их обсуждение

По данным рентгеновской диагностики установлено, что многодуговой источник обеспечивает формирование широкого электронного пучка (диаметром до 60 мм) [2] с достаточно равномерным профилем в центральной области. При увеличении тока электронного пучка наблюдалось увеличение интенсивности рентгеновского излучения; при этом относительная неоднородность составляла $\approx (8-13) \%$ относительно медианы. Повышение давления от 10 до 50 мПа приводило к росту интенсивности излучения и плотности энергии в центре пучка примерно в 1,4 раза, при сохранении неоднородности в пределах $\approx (7-11) \%$ (рис. 3). При изменении ускоряющего напряжения наблюдалось увеличение яркости свечения люминофора, связанное с ростом энергии электронов и эффективности генерации тормозного излучения, при этом форма профиля оставалась устойчивой. Варьирование магнитного поля в областях эмиттера, ускоряющего промежутка

и коллектора изменяло радиальное распределение интенсивности и позволяло управлять степенью расфокусировки пучка; в оптимальных режимах профиль сохранял плосковершинный характер без выраженного проявления отдельных дуговых каналов, а относительная неоднородность в центральной зоне составляла около 10 %.

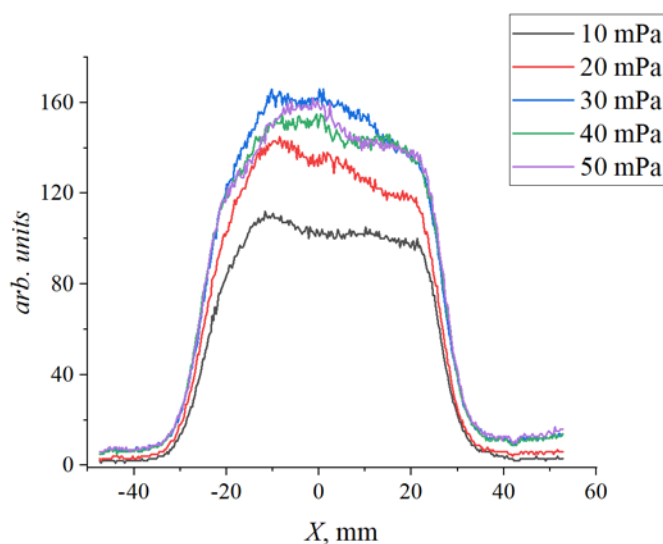


Рис.3. Зависимость относительной неоднородности электронного пучка в условиях различных величин магнитного поля в области коллектора, при $I_d = 200$ А, $p(\text{Ar}) = 20$ мПа, $U_0 = 25$ кВ, $\tau = 200$ мкс, $B_e = 30$ мТ, $B_g = 22$ мТ

Выводы

С использованием многодуговой системы генерации эмиссионной плазмы при выборе соответствующих режимов возможно формирование широкого электронного пучка с равномерным распределением $\approx (10\%)$. Полученные результаты представляют интерес для понимания механизмов формирования пространственного профиля электронного пучка в многодуговых плазменно-эмиссионных системах и могут быть использованы при дальнейшем развитии источников электронов с сеточным плазменным катодом.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №24-69-0074).

Литература

1. Электронный источник с многодуговым плазменным катодом для генерации модулированного пучка субмиллисекундной длительности / В. Н. Девятков, М. А. Мокеев, М. С. Воробьев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 19. – С. 23-26. – DOI 10.61011/PJTF.2024.19.58652.19995.
2. Способ комбинированного управления электронным пучком в источнике с многодуговым сеточным плазменным эмиттером / Мокеев М.А., Девятков В.Н., Горьковская Д.А., [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 52, № 6. – С. 40-44. – DOI 10.61011/PJTF.2026.06.62463.20568

INVESTIGATION OF RELATIVE NONUNIFORMITY OF AN ELECTRON BEAM IN A MULTI-ARC SOURCE WITH A PLASMA CATHODE

M. A. Mokeev*, D. A. Gorkovskaia, P. V. Moskvina, M. S. Vorobyov,
N. N. Koval, V. N. Devyatkov, R. A. Kartavtsov.

*Institute of High-current Electronics SB RAS
634055, Tomsk, Akademicheskii Avenue., 2/3
* ma.mokeev@hcei.ru*

This work investigates the relative nonuniformity of an electron beam generated by a multi-arc electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge. The beam profile in the collector region was evaluated indirectly using the spatial distribution of bremsstrahlung intensity recorded by a Gd₂ O₂ S:Tb phosphor screen and a CCD camera. It is shown that, by varying the working gas pressure, beam current, accelerating voltage, and magnetic field, a wide electron beam with a diameter of up to 60 mm can be formed, exhibiting a relative nonuniformity in the central region of about 10%.

Keywords: multi-arc discharge, electron source, relative inhomogeneity, grid plasma cathode.

ГИДРОДИНАМИКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА

И.А. Моралев^{1,*}, И.В. Селивонин¹, В.О. Галкин^{1,2}

¹Объединенный институт высоких температур РАН
127412, Москва, Ижорская ул., 13 с.2. ²Московский энергетический ин-
ститут 111250, Россия, г. Москва,
Красноказарменная улица, дом 14, с 1
*morler@mail.ru

Исследованы гидродинамические процессы, определяющие структуру высокочастотного коронного разряда и его динамику в горючих смесях. Показано, что изгибная деформация разрядных каналов определяется гидродинамической неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Результатом развития неустойчивости является турбулизация газа в окрестности филамента. Показано, что энерговыделение в каналах короны оказывает существенное влияние на распространение и форму каналов разряда.

Ключевые слова: высокочастотный коронный разряд, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, турбулентность, воспламенение горючих смесей

Введение

Одним из направлений повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания является использование распределенного воспламенения топливо-воздушной смеси. Для этой цели в ряде работ (например, [1]) предложено использование одноэлектродного высокочастотного коронного разряда (ВЧКР). Этот тип разрядов совмещает в себе высокую температуру газа на оси канала (до 3кК) и достаточно большие элек-

трические поля в области, окружающей разрядный канал [1]–[3]. В результате развития высокочастотной короны в газе возникает нагретая область с пониженной плотностью газа – тепловая каверна. Процессы распада тепловой каверны хорошо изучены для искрового разряда [4] и лазерной искры [5]. Показано, что гидродинамика тепловой каверны искры определяется суперпозицией формирования крупномасштабных вихрей на электродах и изломах канала за счет бароклинических эффектов и генерации мелкомасштабной турбулентности в результате неустойчивости Рихтмайера-Мешкова [4]. Для высокочастотного коронного разряда детальные исследования динамики разряда и тепловой каверны проведены в данной работе.

Установка и методы исследования

Распространение разряда исследовалось в сухом воздухе и пропано-воздушных смесях при давлениях от 1 до 4 атм и комнатной температуре в геометрии острие-плоскость (рис.1). Разряд питался радиоимпульсами напряжения (рис.2) длительностью 0.2-3мс с несущей частотой 850кГц и амплитудой до 10-20кВ. Характерная мощность, рассеиваемая в разряде, составляла 20-100Вт. Энерговклад в разряд измерялся методом вольт-кулонных циклограмм. Для исследования течения в окрестности разряда использовался теневой прибор, укомплектованный высокоскоростной видеокамерой с частотой съемки до 100кГц. Обработка теневых картин выполнялась методами корреляционного анализа, что позволяло проанализировать доминирующую длину волны возмущений формы канала в каждый момент времени, а также оценить инкременты нарастания неустойчивости.

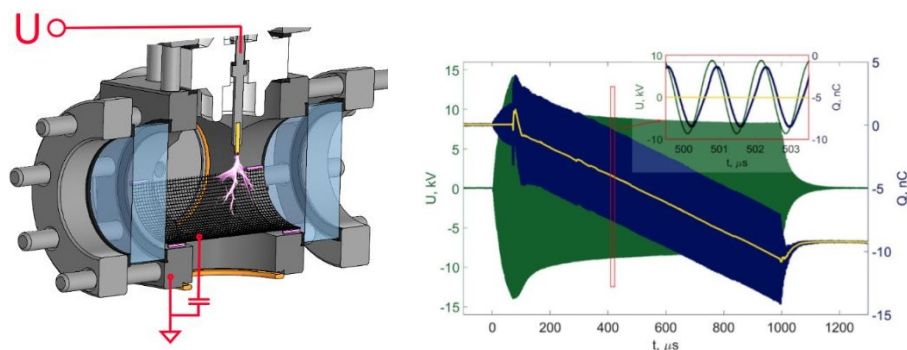


Рисунок 1. Слева- схема установки, справа- динамика напряжения на игле (зеленая кривая) и перенесенного заряда (синяя кривая). Осциллограммы получены для давления 1 атм и сдержания пропана 1.7% ($\phi=0.4$)

Эксперименты в горючих смесях выполнялись в смесях пропана с воздухом с коэффициентом избытка топлива 0.3-0.5, при комнатной начальной температуре. Параметры плазмы разряда определялись методами пассивной спектроскопии. Температура определялась посредством анализа второй положительной системы молекулярного азота, а также оценивалась на основе гидродинамических измерений

2. Результаты измерений

Развитие каналов разряда в воздухе приведено на рис.2. Показано, что развитие каналов ВЧ короны в воздухе атмосферного давления приводит к развитию изгибной неустойчивости. Длина волны неустойчивости- 2-3 диаметра канала, время, в течение которого развиваются возмущения после подачи радиоимпульса на электрод - порядка 50-200мкс. Дальнейшая эволюция возмущений определяется взаимодействием вихрей. В результате нелинейного взаимодействия реализуется субгармонический каскад энергии возмущений, что проявляется на теневых кар-

тинах как кратное увеличение периода возмущений (рис.2). Начальные возмущения перемещаются вдоль канала разряда со скоростью несколько метров в секунду- от электрода к концу филамента. Получена зависимость характеристик возмущений от давления среды. Показано, что увеличение давления приводит к уменьшению диаметра канала, при котором уже наблюдается развитие неустойчивости. Также уменьшается время, необходимое для турбулизации канала разряда и период колебаний.

Оценка безразмерных параметров, определяющих развитие гидродинамической неустойчивости может быть выполнена на основе фазовой скорости и дает значения $Re_f=200$ и $Sh_f=0.6$. Предполагая, что фазовая скорость примерно соответствует половине скорости потока, обтекающего канал, получим числа Струхаля и Рейнольдса в виде $Re=100$ и $Sh=0.3$, что хорошо соотносится с параметрами неустойчивости Кельвина-Гельмгольца для тонких следов и струй.

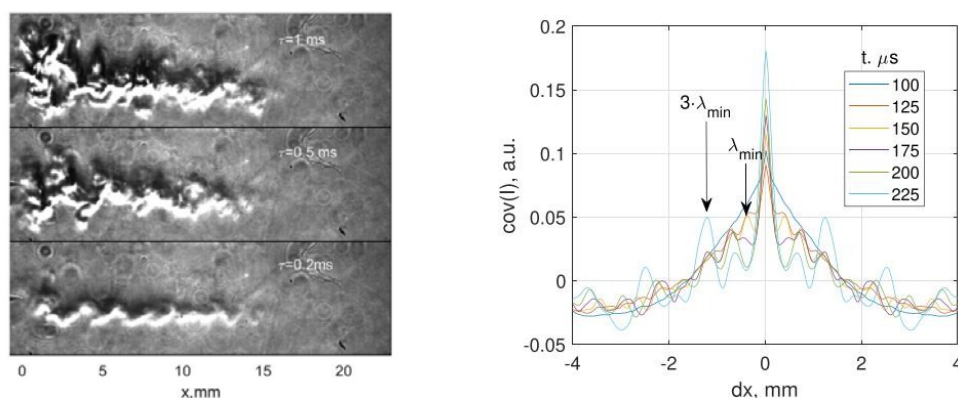


Рисунок 2. Развитие разряда в воздухе. Слева- теневые картины разрядной области при различной длительности импульса. Справа- пространственные автоковариационные функции яркости теневых картин в разные моменты времени.

Исследовано также влияние добавок пропана на процесс распространения ВЧ короны. Добавление в смесь пропана приводит к дополнительному тепловыделению, которое составляет

для смеси с $\phi=0.5$ примерно 30% от величины тепловыделения в разряде. Импульсное тепловыделение в результате сгорания топлива приводит к ускорению распространения канала и формированию тороидальных вихрей у головки вихря. Кроме того, добавление пропана приводит к существенному увеличению количества разрядных филаментов, по-видимому, в результате ветвления разряда на стримерной стадии. Добавление топлива почти не влияет на температуру в разряженных каналах. В чистом воздухе уже в первые 500 мкс она превышает 1500 К, добавление пропана увеличивает эту величину примерно на 150 К, что сопоставимо с ошибкой измерения.

Воспламенение топлива приводит к существенному (на 1-2 порядка) увеличению среднего за период заряда, переносимого с иглы на стенки разрядной камеры (рис.1). Предполагается, что это увеличение связано с хемоионизацией продуктов в холодном пламени пропана.

Литература

1. Auzas F., Tardiveau P., Puech V., Makarov M., and Agneray A. Heating effects of a non-equilibrium RF corona discharge in atmospheric air // J. Phys. D. Appl. Phys. 2010. Т. 43. № 49. doi: 10.1088/0022-3727/43/49/495204.
2. Аронов М. А., Ларионов В. П. Электрическая изоляция высокочастотных установок высокого напряжения. // М: "Знак," 1994. 205с.
3. Auzas F., Makarov M., Naidis G. V. Modelling of pulsed RF corona discharges in high-pressure air // J. Phys. D. Appl. Phys. 2012. Т. 45, № 13. doi: 10.1088/0022-3727/45/13/135202.
4. Шурупов М. А., Леонов С. Б., Фирсов А. А., Яранцев Д. А., Исаенков Ю. И. Газодинамические Неустойчивости При Распаде Канала Субмикросекундного Искрового Разряда // Теплофизика Высоких Температур. 2014. Т. 52, № 2. С. 186–197, doi: 10.7868/s0040364414010190.
5. Morsy M. H., Chung S. H. Numerical simulation of front lobe formation in laser-induced spark ignition of CH₄/air mixtures. // Proc. Combust. Inst..2002. Т. 29, № 2. С. 1613–1619, doi: 10.1016/s1540-7489(02)80198-

GAS DYNAMICS OF THE HIGH FREQUENCY CORONA DISCHARGE

I. A. Moralev^{1,*}, I. V. Selivonin¹, V.O.Galkin^{1,2}

¹*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

²*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

* morler@mail.ru

Hydrodynamic processes determining the structure of a high-frequency (HF) corona discharge and its dynamics in combustible mixtures have been investigated. It is shown that the bending deformation of the discharge channels is determined by the Kelvin-Helmholtz hydrodynamic instability. The result of this instability development is the turbulization of the gas in the vicinity of the filament. It is shown that the energy release in the corona channels has a significant impact on the propagation and shape of the discharge channels.

Keywords: high-frequency corona discharge, Kelvin-Helmholtz instability, turbulence, ignition of combustible mixtures.

ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОСТАВА ПОТОКА ИОНОВ СЛАБОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

И.Л. Музюкин*, П.С. Михайлов, Д.Л. Шмелев

*Институт электрофизики УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
* plasmon@mail.ru*

Исследовался поток плазмы вакуумной дуги с помощью время разрешающего спектрометра Томсона. Импульс тока дуги имел форму, близкую к прямоугольной. Длительность разряда составляла 330 мкс, ток дуги 15 А. Поток ионов анализировался спектрометром Томсона с внутренним до ускорением плазмы и электростатическим затвором, встроенным коллиматором. В результате получены зависимости масс-зарядового состава потока ионов, а также энергетические для ряда моментов времени.

Ключевые слова: потоки ионов, диагностика плазмы, вакуумная дуга.

1. Введение

Ионные источники на основе вакуумной дуги широко используются в промышленности и научных исследованиях. Обычно в этих случаях используется импульсный вакуумный разряд длительностью от единиц микросекунд до единиц миллисекунд. Импульсный характер потока приводит к тому, что становятся существенными переходные процессы инициации и погасания разряда. Кроме того, должен быть рассмотрен вопрос стабильности потока в момент установившегося разряда. В данной работе представлена методика, которая позволяет существенно детальнее исследовать поток плазмы импульсного вакуумного разряда.

2. Экспериментальная установка и методика

Компоновка спектрометра Томсона показана в деталях на Рис.1. Данный спектрометр является модификацией устройства, описанного в [1]. Основной особенностью спектрометра является то, что все детали анализатора находятся под высоким отрицательным потенциалом относительно стенок камеры. Эта особенность избавляет от необходимости придавать какой-либо ускоряющий потенциал источнику плазмы, как это сделано в [2]. Входной узел с апертурой находится под потенциалом камеры. Коллиматор, с встроенным отпирающим промежутком находится уже под потенциалом $U_t = -500$ В. Под таким же потенциалом находится пролетная труба и вход МКП (микроканальная пластина). Открывающее устройство помещено в коллиматор между двух апертур. Импульс отпираания подавался на короткое время 0,5 – 5 мкс и имел амплитуду 32 В. На полюсные наконечники подаются постоянные напряжения $U_t + dU$, $U_t - dU$. В данном эксперименте $dU = 6$ В. Также между полюсными наконечниками создается магнитное поле с помощью катушек. После области магнитного и электрического полей заряженные частицы поступают в пролетную трубу, где расходятся по траекториям, формируя параболы на входной поверхности МКП. Детектор частиц основан на микроканальной пластине (МКП). Расстояние между источником плазмы и входом спектрометра составляет 25 см.

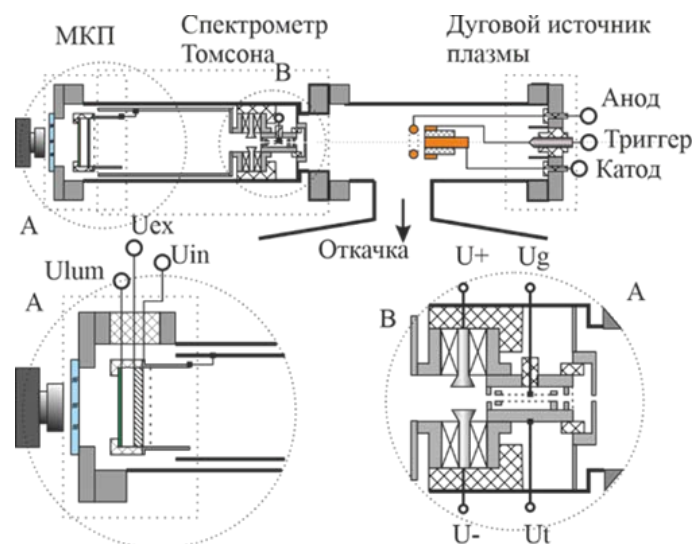


Рис.1 Компонировка спектрометра Томсона

Электроды изготавливались из меди. Диаметр катода 6мм, Для инициирования разряда использовался вспомогательный электрод, на который подавался импульс 20 кВ 100 нс. Эксперименты проводились в вакууме с давлением остаточных газов 10^{-5} мм.рт.ст.

3. Результаты экспериментов

Временная зависимость параметров потока плазмы была получена последовательным открытием входного узла спектрометра через 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 330 мкс после начала разряда. Для каждого момента времени был получен масс-зарядовый состав и энерго-зарядовый спектр в диапазоне от 0 до 2000 эВ/заряд.

Результаты измерения масс-зарядового состава плазмы представлены на Рис.2. Обращает на себя внимание высокое постоянное содержание примеси углерода C^{+1} в потоке ионов. Средний заряд ионов меди устанавливается к моменту 100 мкс на уровне 1.6 – 1.8 А.

Первыми ко входу в спектрометр прибывают ионы водорода (к моменту 5 мкс). После этого появляются ионы углерода (к мо-

менту 10 мкс) и затем прибывают ионы трехзарядной меди (к моменту 20 мкс).

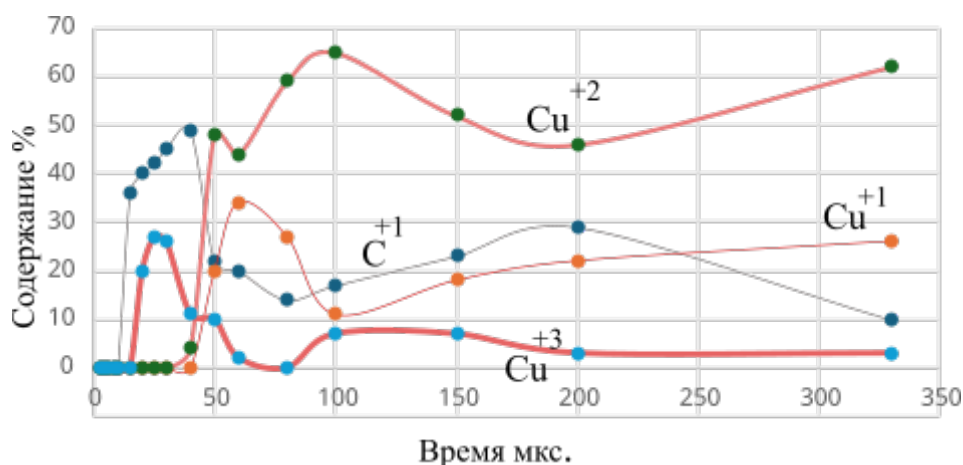


Рис.2 Масс-зарядовый состав плазмы вакуумной дуги

Измерения энергетических спектров потока ионов проводились для каждого момента времени одновременно с измерением масс-зарядового состава. Энергетические спектры ионов меди и углерода для времени от начала разряда 20 и 200 мкс представлены на Рис.3,4.

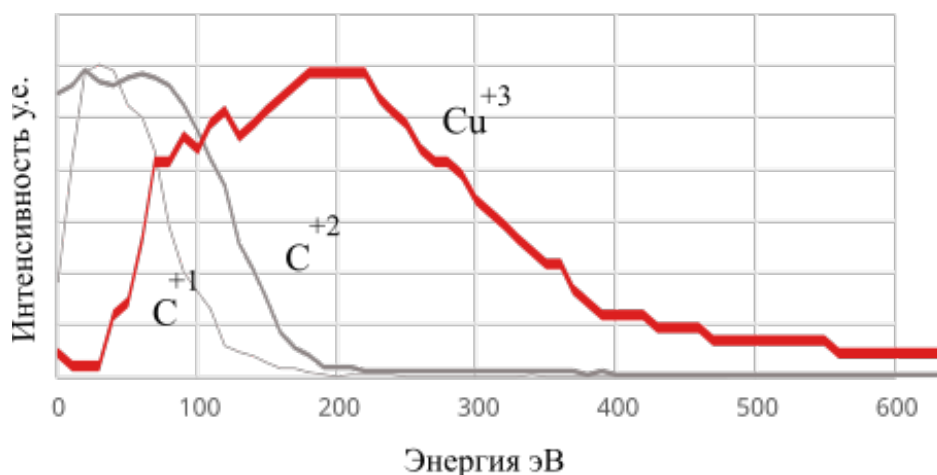


Рис.3 Энергетические спектры потока ионов для времени 20мкс от начала разряда

На Рис.3 представлен момент появления ионов трехзарядной меди. Наиболее вероятная энергия ионов трехзарядной меди составляет 200 эВ. При этом энергетический хвост продолжается до

значений 500 эВ. Наиболее вероятные энергии ионов углерода существенно меньше 30 – 60 эВ. Этот поток соответствует искровой стадии разряда.

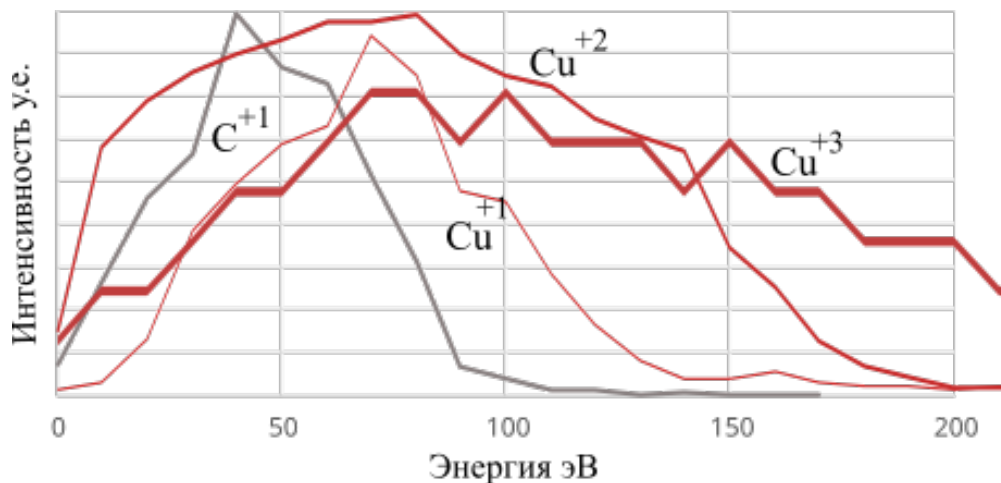


Рис.4 Энергетические спектры потока ионов для времени 200мкс от начала разряда

Устойчивый дуговой разряд устанавливается к моменту 100 мкс от начала разряда. Энергетические спектры ионов в установившейся стадии дуги (200 мкс) представлены на Рис.4 В усредненном по 5 импульсам спектре не наблюдается явной зависимости наиболее вероятной энергии от заряда ионов меди.

4. Выводы

Получен полный спектр масс-зарядового состава, и энергетические спектры ионов потока плазмы импульсного дугового разряда. Измерения показывают, что первые десятки микросекунд в потоке плазмы присутствуют только ионы углерода и водорода. Ионы материала катода появляются к 20 микросекунде и окончательно поток устанавливается к 100 микросекунде. При этом периодически встречаются повышения содержания ионов примесей.

Работа была выполнена при поддержке РФФ, грант № 23-19-00360-П.

Литература

1. Muzukin, I.L. and Barakhvostov, S.V. A nanosecond discharge over a dielectric surface as a method for generation of multicharged plasma // IEEE transactions on plasma science, 2005. № 33(5). pp.1654 – 1657.
2. Bugaev, A. S., Oks, E. M., Gushantes, V. I., Nikolayev, A. G., & Yushkov, G. Y. Measurements of ion direct velocities in vacuum arc plasmas by current “jump” and “short” methods // Proc. XXIV ICPIG (Warsaw) ,2000. № 2

TIME DEPENDENCE OF THE ION FLOW COMPOSITION OF A LOW-CURRENT VACUUM ARC

I. L. Muzyukin*, P. S. Mikhailov, D.L. Shmelev

*Institute of Electrophysics UB RAS
106 Amundsen St., Ekaterinburg, Russia*

** plasmon@mail.ru*

The plasma flow of a vacuum arc was studied using a time-resolving Thomson spectrometer. The arc current pulse had a nearly rectangular shape. The discharge duration was 330 μ s, and the arc current was 15 A. The ion flow was analyzed using a Thomson spectrometer with internal plasma acceleration and an electrostatic shutter integrated into the collimator. As a result, the dependences of the mass-charge composition of the ion flow, as well as the energy distributions for a number of time points, were obtained.

Key words: ion flows, plasma diagnostics, vacuum arcs.

ЭФФЕКТ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ПРИ КОЛЛАПСЕ СИММЕТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ

И.Н. Мустафин*, А.А. Аганин

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН

420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31

** mustafin@imm.knc.ru*

Изучается влияние временной задержки изучению влияния временной задержки во взаимодействии пузырьков в случае совместного коллапса четырех одинаковых парогазовых пузырьков, симметрично расположенных в воде друг относительно друга, когда центры пузырьков находятся в вершинах правильного тетраэдра. Условия комнатные. Изначально пузырьки заполнены насыщенным паром воды и воздухом с 2%-ной массовой долей. Радиус пузырьков 1.92 мм, расстояние между их центрами более десяти их радиусов. Показано, что наиболее ощутимое влияние временной задержки (около 20% у максимального давления в пузырьках) наблюдается при меньших расстояниях между пузырьками, с увеличением расстояния влияние монотонно уменьшается.

Ключевые слова: парогазовые пузырьки, динамика пузырьков, коллапс пузырьков, кластер пузырьков, сферический кластер, дискретная модель

Введение

Изучение совместного коллапса парогазовых пузырьков имеет большое научное и прикладное значение. Это, в частности, обусловлено многочисленными негативными последствиями кавитации (вибрация, шум, механические повреждения гидронасосов, гидротурбин и т.д.) и ее разнообразными позитивными применениями (интенсификация химических реакций, дезинфекция

жидкостей, ультразвуковая очистка твердых поверхностей и т.д.). В перечисленных и многих других негативных последствиях и позитивных применениях кавитации важную роль играет совместный коллапс парогазовых пузырьков. Коллапс важен, например, потому что в его конце в пузырьках и их окрестностях в жидкости могут возникать очень высокие давления и температуры. А при совместном коллапсе степени сжатия пузырьков могут быть еще более высокими.

Настоящая работа посвящена изучению влияния временной задержки во взаимодействии пузырьков [1, 2] в случае совместного коллапса четырех одинаковых парогазовых пузырьков, симметрично расположенных в жидкости друг относительно друга (т.е. центры пузырьков находятся в вершинах правильного тетраэдра).

2 Постановка задачи. Математическая модель

Рассматривается совместный коллапс четырех одинаковых парогазовых пузырьков, равноудаленных и симметрично расположенных друг относительно друга в жидкости (рис.1). Жидкостью является вода при давлении 1 бар и температуре 20°C. Изначально пузырьки заполнены насыщенным водяным паром при температуре 20°C и небольшим количеством неконденсируемого газа (воздуха) с массовой концентрацией 2%. Скорость жидкости и парогазовой смеси в пузырьках равна нулю. Начальное давление парогазовой смеси в пузырьках намного меньше давления окружающей жидкости, в результате чего пузырьки совместно коллапсируют. Отметим, что подобные начальные условия в экспериментах во многом соответствуют моменту перехода от расширения к сжатию пузырьков, созданных лазерным или искровым пробоем жидкости.

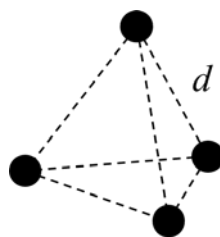


Рис.1. Четыре парогазовых пузырька в вершинах правильного тетраэдра (d – расстояние между центрами пузырьков).

Из-за большой разницы начальных давлений в пузырьках и окружающей жидкости коллапс пузырьков оказывается весьма интенсивным. Известно, что при интенсивном коллапсе пузырьков проявляется сжимаемость жидкости. При этом при совместном интенсивном коллапсе пузырьков сжимаемость жидкости проявляется двояко. Во-первых, сжатие жидкости вокруг пузырьков вызывает понижение степени их сжатия. Во-вторых, сжатие жидкости вокруг пузырьков приводит к образованию в их окрестности радиально-расходящихся от них волн давления. Через некоторое время, называемое временной задержкой [2], эти волны достигают поверхности других пузырьков и оказывают влияние на их последующую динамику. Эффекту временной задержки при рассматриваемом совместном коллапсе парогазовых пузырьков и посвящена настоящая работа.

Исследования проводятся с помощью математической модели совместного коллапса парогазовых пузырьков работы [3]. Данная модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, включающую обыкновенные дифференциальные уравнения относительно радиальной скорости жидкости на поверхности пузырьков, давления в пузырьках и радиуса пузырьков. Система включает также уравнения в частных производных относительно температуры и массовой концентрации газа в пузырьках и жидкости, замыкаемых соответствующими кинематическими, динамическими, тепловыми и диффузионными граничными условиями. Диффузия газа из пузырьков в жидкость и об-

ратно описывается законом Генри, испарение/конденсация на поверхности пузырьков – формулами Герца-Кнудсена-Ленгмюра. Отметим, что в модели используется начальное симметричное расположение во всех отношениях одинаковых пузырьков, в результате чего их коллапс и вся последующая динамика оказываются практически идентичными. Это позволило внести в модель существенные упрощения.

Результаты

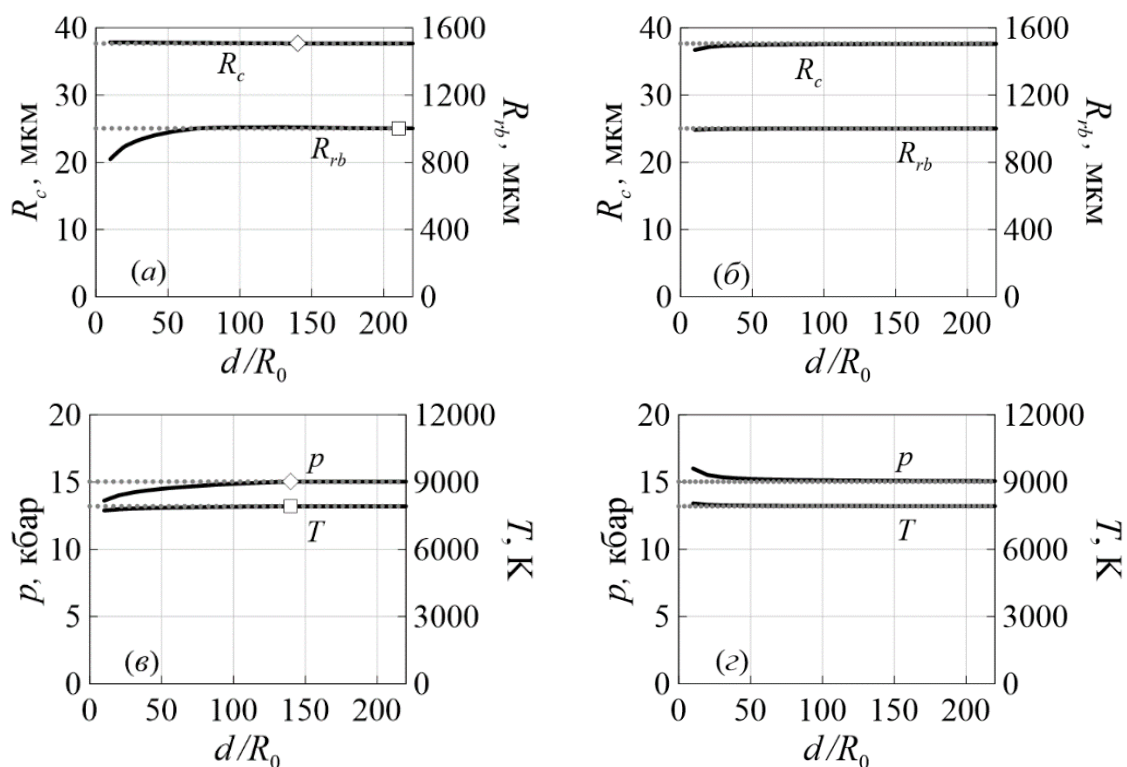


Рис.2. (а, б) зависимости радиусов пузырьков в конце их коллапса (R_c) и в момент следующего за коллапсом максимального расширения (R_{rb}) от расстояния между пузырьками $d \geq 10 R_0$, отнесенного к их начальному радиусу $R_0 = 1.92$ мм. (в, г) Аналогичные зависимости давления p в пузырьках и температуры T в центре пузырьков в конце их коллапса. (а, в) соответствуют коллапсу пузырьков с учетом, а (б, г) – без учета временной задержки. Пунктирными линиями представлен одиночный пузырек. Символы на (а, в) соответствуют расстояниям между пузырьками, при превышении которых взаимодействие пузырьков не влияет на соответствующую символам характеристику.

Рис.2 иллюстрирует влияние временной задержки на радиусы пузырьков в конце их совместного коллапса и в момент их последующего максимального расширения, а также на максимальное давление в пузырьках и максимальную температуру в их центре, достигаемые в конце их коллапса, в зависимости от расстояния между пузырьками. Видно, что наиболее ощутимое влияние временной задержки наблюдается при меньших расстояниях между пузырьками. С увеличением расстояния влияние временной задержки монотонно уменьшается. При этом максимальные различия составляют около 5% у радиусов пузырьков в конце их коллапса, 20% у радиусов пузырьков в момент их последующего максимального расширения, 20% у максимального давления в пузырьках и 5% у максимальной температуры в их центре.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-71-00088, <https://rscf.ru/project/25-71-00088/>.

Литература

1. Fujikawa S., Takahira H. A theoretical study on the interaction between two spherical bubbles and radiated pressure waves in a liquid // *Acustica*. 1986. V.61, P. 188–199.
2. Aganin A.A., Khalitova T.F. Collapse of equal symmetrically located spherical cavitation bubbles // *Lobachevskii J. Math.* 2024. V. 45. No. 5. P. 1875–1885.
3. Aganin A.A., Mustafin I.N. Collapse of symmetrically located vapor-gas bubbles // *Lobachevskii J. Math.* 2026. V.47. No.6 (in press).

TIME DELAY EFFECT IN COLLAPSE OF SYMMETRICALLY LOCATED VAPOR-GAS BUBBLES

Mustafin I.N.*, Aganin A.A,

Institute of Mechanics and Engineering FRC KazSC RAS

2/31, Lobachevsky str., Kazan 420111 Russia

** mustafin@imm.knc.ru*

The time delay effect on bubble interactions is studied in the case of the combined collapse of four identical vapor-gas bubbles, symmetrically located in water relative to one another, with the bubble centers located at the vertices of a regular tetrahedron. The room conditions are considered. The bubbles are initially filled with saturated water vapor and air at a 2% mass fraction. The bubble radius is 1.92 mm, and the distance between their centers is more than ten times their radii. The most noticeable effect of time delay (about 20% in the maximum pressure in the bubbles) takes place at smaller distances between bubbles; the effect decreases monotonically with increasing distance.

Key words: vapor-gas bubbles, bubble dynamics, bubble collapse, bubble cluster, spherical cluster, particle model

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕДИЦИНСКОГО МАТЕРИАЛА НА НЕТКАНОЙ ОСНОВЕ ДО И ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ

**Н.Д. Нагманов, Р.А. Демидова, А.Р. Ибатуллина,
И.В. Красина***

*Казанский национальный исследовательский технологический
Университет, 420015, Россия, Казань, ул. Карла Марса, 68*

** thnvi@mail.ru*

В статье рассмотрено влияние плазменной модификации на эксплуатационные характеристики двуслойного медицинского текстильного материала на основе спанбонда ламинированного полиэтиленовой пленкой. Выявлено, что плазменная обработка в воздушной среде, способствует сохранению механических свойств и увеличивает показатель впитываемости нетканых полотен.

Ключевые слова: нетканый материал, плазма, пилинг, механические свойства, эксплуатационные свойства.

Введение

Улучшение эксплуатационных характеристик медицинских волокнистых материалов на сегодняшний день играет важнейшую роль в обеспечении безопасности пациентов и врачей, а также эффективности современной медицины. Двухслойные нетканые ламинированные материалы на основе спанбонда находят применение во многих медицинских изделиях, таких как одноразовые впитывающие простыни, хирургические халаты, послеоперационные повязки. Эти материалы отвечают самым современным мировым требованиям здравоохранения. За счет своей уни-

кальной структуры они способны успешно выполнять защитно-барьерные функции и при этом обеспечивать комфорт и гигиеничность для пациентов и медицинского персонала. В отличие от традиционных тканых аналогов, ламинированные двуслойные нетканые материалы обладают специальной структурой. Впитывающий слой представляет собой гидрофильный нетканый материал типа спанбонд из полипропиленовых волокон и предназначен для быстрого отведения жидкости, при этом второй водонепроницаемый слой из полимерной (полиэтиленовой) пленки служит надежным барьером от бактерий, крови и иных биологических жидкостей.

Прочность на разрыв, стойкость к истиранию, водонепроницаемость, биологическая инертность являются основными эксплуатационными характеристиками таких материалов, поскольку от этих свойств зависит надежность защиты медперсонала и пациентов. Однако некоторые факторы в процессе эксплуатации могут существенно снизить характеристики материалов, повлиять на прочность, вызвать деструкцию вследствие естественного износа. Например, повышенная пилингующесть материала неизбежно приводит к потере прочностных свойств. Поэтому анализ и улучшение эксплуатационных характеристик двухслойных медицинских пленочно-волоконистых материалов является актуальной задачей для исследований.

Целью данной работы является изучение исходных физико-механических характеристик нетканых двуслойных медицинских материалов и выявление влияния на них плазменной модификации с целью улучшения эксплуатационных свойств при сохранении барьерных способностей, функциональности и безопасности данных материалов.

2. Экспериментальная часть

В ходе исследований были проведены испытания двухслойного медицинского материала на основе гидрофильного полипропиленового спанбонда и полимерной полиэтиленовой пленки

до и после его модификации в плазме ВЧЕ-разряда. Параметры модификации: режим 1 время обработки 10 мин, мощность 1,75 кВт, рабочее давление – 21-28 Па, плазмообразующий газ – воздух, расход 1500 г/см³; режим 2 время обработки 10 мин, мощность 1,75 кВт, рабочее давление – 21-28 Па, плазмообразующий газ – аргон/метан, расход 1000/500 г/см³. Выбор газовых сред обусловлен необходимостью сохранения или улучшения эксплуатационных свойств поверхности спанбонда, а также сохранением физико-механических и барьерных характеристик [1,2]. Окисление нетканых материалов под действием воздуха может привести к снижению прочностных свойств выпускаемой продукции, поэтому исследовали показатель разрывной нагрузки материала. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Изменение механических характеристик нетканых материалов

Нетканый материал	Вдоль			Поперек		
	F, N	R, МПа	A,%	F, N	R, МПа	A,%
Контрольный образец	54,9	6,4	63,7	37,6	4,42	76,8
Образец, модифицированный в режиме 1	49,8	4,2	86,2	66,6	5,3	87,2
Образец, модифицированный в режиме 2	62,4	4,8	64,6	41,9	3,9	72,6

Как видно по данным таблицы 1, плазменная обработка не приводит к значительной потере механических свойств. Наблюдается снижение разрывной нагрузки в пределах 1-10%, что тем не менее соответствует требованиям ГОСТ Р 53226-2008.

Водоупорность контрольных и опытных образцов со стороны полиэтиленовой пленки исследовали с помощью пенетрометра.

Модифицированные образцы, как и исходные выдержали максимальный показатель прибора 140 см, что говорит о сохранении водоупорных свойств материала после плазменной модификации.

Изучение пилингуемости нетканых материалов проводили по методу Мартиндейла (ГОСТ ISO 12947-2-2021). Выявлено, что первые признаки разрушения поверхности после плазменной обработки в среде аргона/метана появляются через 1000 оборотов, а у обработанных в среде воздуха, и исходных образцов – после 900 оборотов.

Для определения степени гидрофильности слоя спанбонда исследовали краевой угол смачивания и время впитывания капли материалом. Выявлено, что при обработке нетканых материалов в среде воздуха впитываемость поверхности со стороны волокнистого слоя несколько увеличивается, по сравнению с исходными образцами.

Вывод

Изучено влияние плазменной модификации на физико-механические свойства двуслойных нетканых полотен медицинского назначения. Установлено, что плазменная обработка в воздушной среде, способствует сохранению механических свойств и увеличивает показатель впитываемости влаги нетканых полотен.

Преимуществом плазменных технологий является то, что они предоставляют возможности для изменения свойств поверхности нетканых материалов и придания им уникальных характеристик. Однако по-прежнему существуют проблемы с интеграцией плазменных систем в производственные линии промышленного масштаба.

Литература

1. Study of the Influence of Plasma Treatment on the Physical Properties of Medical Non-Fabric Materials / A. S. Parsanov, I. V. Krasina, M. V. Antonova, A. R. Ibatullina // High Energy Chemistry. – 2024. – Vol. 58, No. S3. – P. S366-S370. – DOI 10.1134/S0018143924701182. – EDN ABZBOY.
2. Антонова, М. В. Регулирование гидрофильности смесовых тканей с применением низкотемпературной плазмы / М. В. Антонова, И. В. Кра-

сина, С. В. Илюшина // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019. – № 3(381). – С. 100-103. – EDN CNDFNS.

STUDY OF THE PERFORMANCE PROPERTIES OF A NON-WOVEN MEDICAL MATERIAL BEFORE AND AFTER PLASMA MODIFICATION

N.D. Nagmanov, R.A. Demidova, A.R. Ibatullina, I.V. Krasina*

Kazan National Research Technological University, 420015, Russia, Kazan,

* *thnvi@mail.ru*

This article examines the effect of plasma modification on the performance characteristics of a two-layer medical textile material based on spunbond laminated with polyethylene film. It was found that plasma treatment in air promotes the preservation of mechanical properties and increases the absorbency of non-woven fabrics on the fibrous layer side.

Key words: non-woven material, plasma, peeling, mechanical properties, performance properties.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ ДЕПОЛИМЕРИЗАЦИЯ ХИТОЗАНА В РАСТВОРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИАФРАГМЕННОГО РАЗРЯДА

И.К. Наумова^{1*}, В.А. Титов², И.Н. Субботкина¹,
Ю.С. Доброва³

¹*Ивановский государственный университет
153025, Иваново, ул. Емака, 39*

²*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук
153045, Иваново, ул. Академическая, 1*

³*Ивановский государственный химико-технологический университет
153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, д. 7
irinauma@mail.ru

Исследован процесс плазмохимического модифицирования хитозана при обработке его уксуснокислого раствора подводным диафрагменным разрядом. Получены водорастворимые низкомолекулярные фракции, изучена кинетика их накопления в ходе горения разряда. Показано, что раствор низкомолекулярного хитозана (0,1 масс.%) обладает фитостимулирующим действием.

Ключевые слова: плазма, диафрагменный разряд, хитозан, деполимеризация

Введение

В настоящее время газовые разряды, контактирующие с жидкостями, широко используются для плазмохимического синтеза неорганических и органических веществ, наночастиц и наноструктур, для обеззараживания растворов и материалов, для обработки и модифицирования полимеров в растворах. Особый интерес представляет возможность модифицирования природного

сырья (древесина, лен, хитин) и биополимеров (целлюлоза, лигнин, хитозан). В частности, хитозан, получаемый щелочным гидролизом хитина, обладает антимикробным, ранозаживляющим и фитостимулирующим действием. Исходный хитозан не растворим в воде вследствие большой массы макромолекулы и высокой кристалличности структуры, что ограничивает его применение. Модифицирование хитозана в плазменно-растворных системах [1, 2] позволяет уменьшить размер полимерной цепи, увеличив тем самым его растворимость и биодоступность; при этом важной задачей является выбор способа генерации плазмы и параметров обработки, обеспечивающих высокий выход растворимых производных хитозана. В настоящей работе проведена плазменная обработка уксуснокислых растворов хитозана, позволившая получить низкомолекулярные водорастворимые фракции, обладающие биологической активностью.

Экспериментальная часть

Подводный диафрагменный разряд возникал между двумя погруженными в жидкость графитовыми электродами, один из которых был помещен в кварцевую ампулу с диафрагмой диаметром 5 мм; зона плазмы образовывалась в парогазовых пузырьках из-за перегрева жидкости в области диафрагмы (рис. 1). 200 мл 1%-го раствора хитозана (ЗАО «Биопрогресс», $M_w = 170$ кДа) в 1 % уксусной кислоте обрабатывали разрядом в течение 5-30 минут; выделяли водорастворимую фракцию ацетоном, определяли ее выход и средневязкостную молекулярную массу хитозана по характеристической вязкости его растворов с использованием уравнения Марка – Куна – Хаувинка. Биологическая активность выделенных продуктов была проверена на примере семян редиса марки «Филиппок F1».

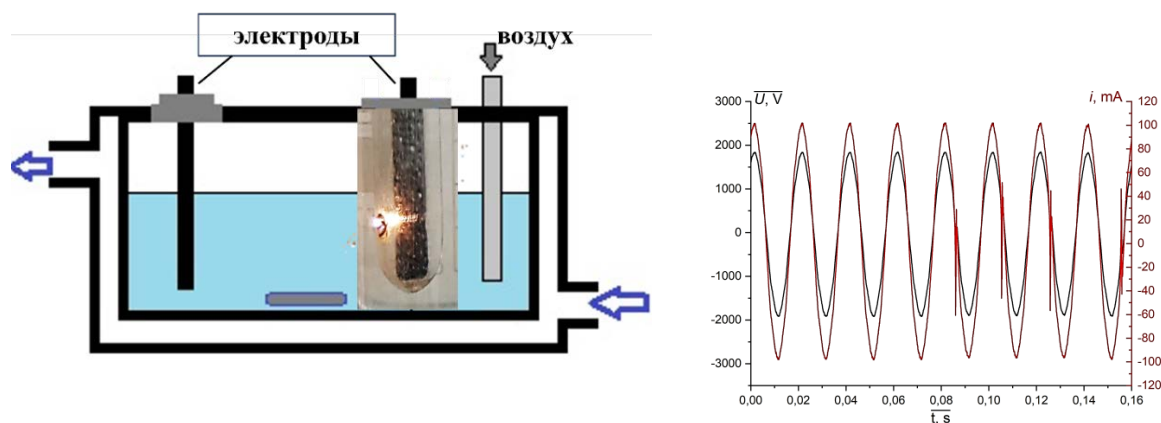
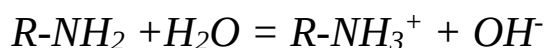


Рис. 1. Ячейка для обработки раствора хитозана в уксусной кислоте диафрагменным разрядом и осциллограммы тока и напряжения разряда

1. Результаты эксперимента

Молекулярная масса хитозана за 30 мин обработки уменьшилась до 10-12 кДа (рис. 2), выход водорастворимых фракций при этом составил 28-32%. Процесс деполимеризации протекает по псевдопервому кинетическому порядку. Константа скорости деструкции составила $(7,73 \pm 0,13) \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ (коэффициент корреляции 0,989). Выделенный низкомолекулярный хитозан проявляет основные свойства (рН 8,1) из-за наличия свободных аминогрупп, что подтверждается и возрастанием электропроводности по сравнению с исходным растворителем ($\chi = 118.4 \text{ }\mu\text{S/cm}$). Низкая молекулярная масса обеспечивает более высокую растворимость, делая эти основные группы активными в широком диапазоне рН. Чем выше степень деацетилирования, тем больше свободных аминогрупп и тем сильнее щелочная реакция среды:



Структурно-химические изменения, обусловленные деполимеризацией хитозана, подтверждаются электронными спектрами поглощения - наблюдаются полосы с максимумами поглощения в области 265-295 нм, которые отвечают карбонильным группам C=O (рис. 3); сохранение целостности структуры хитозана подтверждается методами Фурье-ИК-спектроскопии.

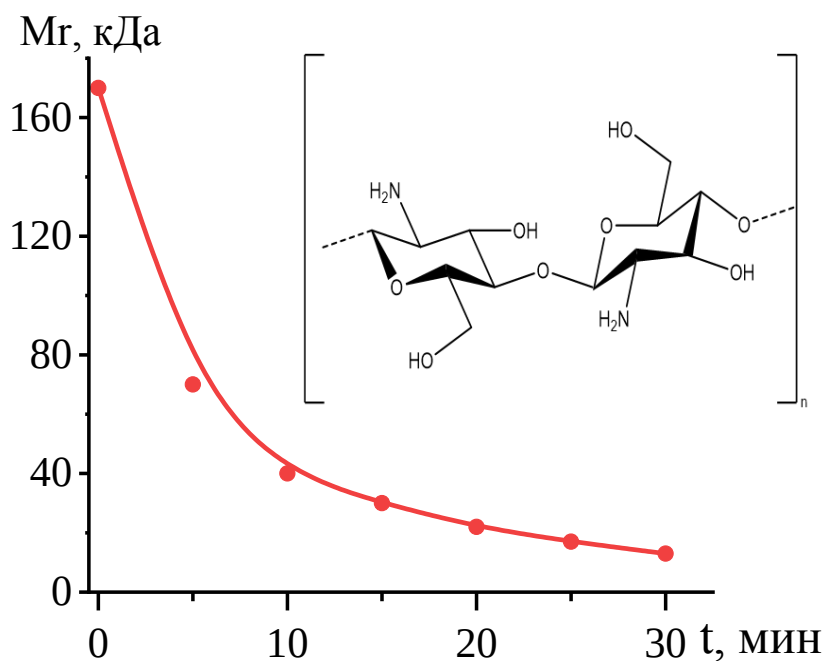


Рис. 2. Зависимость средневязкостной молекулярной массы хитозана от времени обработки диафрагменным разрядом

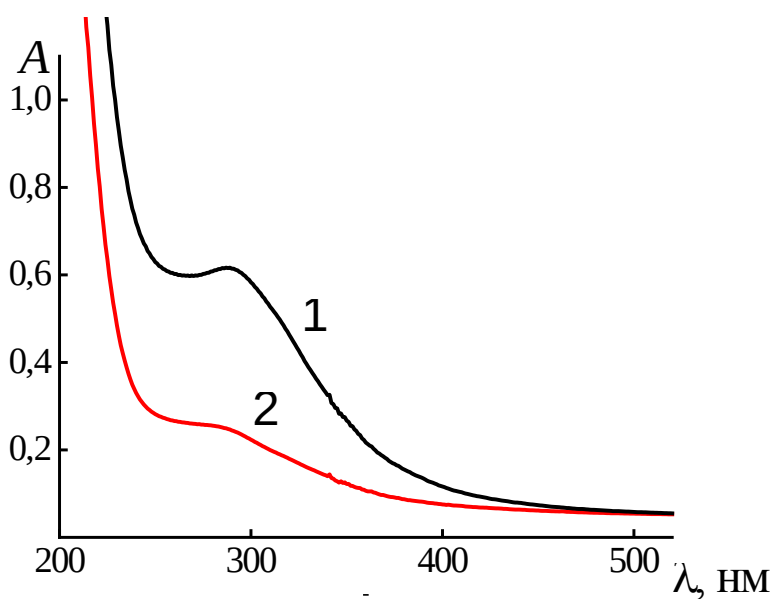


Рис. 3. Электронные спектры поглощения полученного (1) и исходного (2) хитозана

Возможный механизм деполимеризации хитозана предполагает снижение молекулярной массы вследствие разрыва β -1-4-гликозидных связей в реакциях с $\bullet\text{OH}$, генерируемыми в плазме

[3], и трансформации образующихся радикалов в альдегидные группы.

Фитостимулирующая активность полученных водорастворимых фракций хитозана изучена на примере семян редиса марки «Филиппок F1». (таблица). Использование продуктов деполимеризации хитозана для полива семян в грунте приводит к увеличению ростовых показателей растения и накоплению фотосинтетических пигментов в листьях.

Таблица. Агрономические показатели редиса на 20 день выращивания

Стимулятор роста	Грунтовая всхожесть, %	Длина стебля, см	Средняя площадь листа, см ²	Сухая масса, г	Содержание пигментов, мг/г		
					Хл а	Хл б	Каротиноиды
Вода	50±2	9.2±0,2	2,5±0,1	3,8±0,2	3,28	1,72	1,63
Хитозан (0.1%)	67±3	11,1±0,3	3,4±0,2	5,0±0,2	4,40	2,77	2,72

При изучении влияния раствора полученного низкомолекулярного хитозана на ингибирование роста плесневых грибов обнаружено, что поражение плесенью вида *Fusarium spp.* и *Aspergillus spp.* контрольных образцов и образцов, обработанных хитозаном, составило 60 и 10 %, соответственно.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00930).

Литература

1. Khlyustova, A., Sirotkin, N., Naumova, I., Tarasov, A., Titov, V. Solution Plasma Processing as an Environmentally Friendly Method for Low-Molecular Chitosan Production. // Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2022. C. 587-603.
2. V. Titov, I. Naumova, A. Khlyustova, D. Ulyanova. Plasma-chemical modification of chitosan for agronomic research. // High Energy Chemistry, 2024, Vol. 58, Suppl. 2, pp. S272–S276.
3. V. A. Titov, A. V. Khlyustova, I. K. Naumova, S. A. Sirotkin, and A. V. Agafonov. Formation Rate and Energy Yield of Hydroxyl Radicals in Water under the Action of Gas-Discharge Plasma. // Plasma Physics Reports, 2020, Vol. 46 (4), pp. 472–475.

PLASMA-CHEMICAL DEPOLYMERIZATION OF CHITOSAN IN SOLUTION BY A DIAPHRAGM DISCHARGE

I.K. Naumova^{1,*}, V.A. Titov², I.N. Subbotkina¹, Yu.S. Dobrova³

¹Ivanovo State University

153025, Ivanovo, Emaka St., 39

²G.A. Krestov Institute of solution chemistry of the Russian academy of sciences

153045, Ivanovo, Akademicheskaja St., 1

³Ivanovo State University of Chemical Technology

153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospect, 7

**irinauma@mail.ru*

The plasma-chemical modification of chitosan was studied by treating its solution in acetic acid with an underwater diaphragm discharge. Water-soluble low-molecular-weight fractions were obtained, and the kinetics of their accumulation during the discharge was studied. A solution of low-molecular-weight chitosan (0.1 wt%) was shown to have a phytostimulating effect.

Keywords: plasma, diaphragm discharge, chitosan, depolymerization.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПЛАЗМЕННОГО КОНВЕРТЕРА

П.И. Петренко^{1,2,*}, Н.С. Чемоданов¹, А.В. Переславцев¹,
А.В. Артемов¹, С.А. Вошинин¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское ш., 31

* Petrenko_pi@nrcki.ru

Представлены результаты математического моделирования нестационарных тепловых режимов плазменного конвертера для переработки отходов. Разработана упрощённая динамическая модель нагрева футеровки конвертера. Выполнена оценка мощности, расхода воздуха, нагрузки на первую стенку (футеровку) при разогреве печи и в рабочем режиме. Проведён сопряжённый динамический расчёт газодинамики, равновесной химии и тепловых потоков через многослойную футеровку по участкам конвертера.

Ключевые слова: плазменный конвертер, плазменная переработка отходов, численное моделирование, тепловой расчёт.

Введение

Плазменные конвертеры (плазменные печи) находят применение для высокотемпературной переработки твердых и жидких отходов, с образованием синтез-газа и инертного шлакового расплава. Однако проектирование и оптимизация таких аппаратов сопряжены со значительными сложностями, обусловленными взаимодействием газодинамических, тепловых и химических процессов в реакционном объеме. Наличие высокотемпературных плазменных струй, многокомпонентных

газовых смесей, экзо- и эндотермических реакций, а также многослойной футеровки требует применения методов вычислительной гидродинамики (CFD) для адекватного предсказания рабочих характеристик оборудования.

Основной задачей, рассматриваемой в настоящей работе, является комплексный расчёт плазменного конвертера (плазменной печи) с учётом химических реакций, газодинамики и теплообмена между газовым потоком и стенками конвертера, а также анализ влияния тепловых режимов на состояние футеровки. Решение данной задачи с помощью моделирования позволяет не только оценить текущие параметры процесса, но и получить фундаментальное понимание взаимосвязей между работой основного оборудования (плазмотронов, реакционной камеры) и вспомогательных систем (контур охлаждения, газоходы), что в конечном итоге определяет эффективность и надёжность всей технологической схемы.

Плазменный конвертер (плазменная печь)

На основании предварительных расчетов, подача энергии в рабочий объем конвертера осуществляется четырьмя плазмотронами ЭДП-600 номинальной электрической мощностью по 600 кВт каждый, размещенные в своде камеры пиролиза и плавления. Рабочим газом плазмотронов является углекислый газ (CO_2), расход на 1 плазмотрон – 185 кг/ч. В конвертере предусмотрена фурма для подачи кислорода (до 240 кг/ч), размещаемая в своде камеры пиролиза и плавления.

Конструктивно печь (рисунок 1) включает многослойную футеровку: внутренний слой выполнен из хромокорунда ХКТ-30 толщиной 230 мм, промежуточный – из шамотного кирпича ШЛ-1,3 115 мм, внешняя теплоизоляция – маты из базальтового волокна 30 мм. Несущий кожух изготовлен из стали 20 толщиной

10 мм. В дно печи встроен подовый нагреватель для поддержания температуры в период запуска и при малых нагрузках.

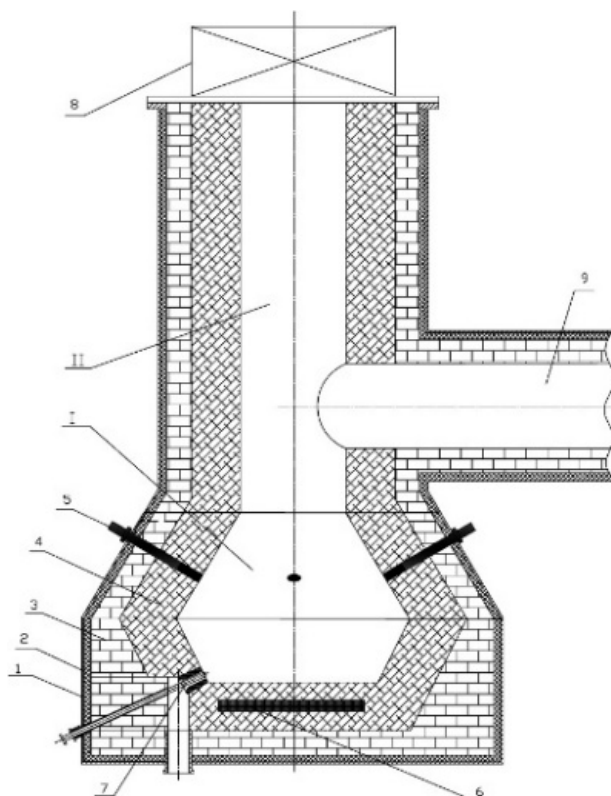


Рисунок 1. Плазменный конвертер: - плавильная камера; II - верхняя цилиндрическая часть (шахты); 1 - металлический (стальной) несущий кожух; 2 - слой теплоизоляции; 3 - слой футеровки; 4 – внутренний слой футеровки; 5 - плазмотроны; 6 - подовый нагреватель; 7 - узел слива шлака; 8 - узел загрузки отходов; 9 - газоход; 10 - патрубок загрузки отходов.

На данном этапе моделирования используется следующий модельный состав отходов первичного пиролиза после разложения материала отходов в камере: смесь толуол 33% (C_7H_8 361 кг/ч), вода (H_2O из состава отходов 54%, 592 кг/ч, H_2O влажность отходов 13%, 149 кг/ч).

Методика моделирования

Моделирование плазменного конвертера выполнялось в программном пакете Fluent. Сначала строилась сетка с использованием пристеночных слоев для жидкости, а также с

созданием более мелкой сетки у жидкости, особенно в области плазмотронов и фурмы.

В качестве модели для вязкости использовалось Realizable $k-\epsilon$ со Scalable Wall Function. Данная RANS модель хорошо решает задачи, где надо моделировать сложные потоки и особенно эффективна для потоков со значительной кривизной линий тока, вихрями и вращением. Обеспечивая высокую точность, она остается быстрой и вычислительно эффективной моделью.

В качестве модели излучения была выбрана P1. Она превосходно зарекомендовала себя в приложениях, связанных с горением, где газ поглощает/рассеивает излучение и где существуют сложные геометрические формы, обеспечивая приемлемую точность при низких затратах ресурсов процессора. Химические превращения описывались с использованием модели Species Transport для детального анализа состава продуктов. Учитывались основные реакции окисления толуола и диссоциации CO_2 , а также побочные реакции образования NO.

Для сопряжённого теплового анализа на границе «жидкость – внутренняя стенка» задавалось условие сопряжённой стенки (coupled wall), обеспечивающее непрерывность теплового потока и температуры. На внешней поверхности кожуха задавался конвективный теплообмен с окружающей средой (коэффициент теплоотдачи $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура воздуха 293 К). Расчётная сетка содержала около 9 миллионов элементов с призматическими слоями вблизи стенок для корректного разрешения теплового пограничного слоя.

Результаты и их анализ

Проведённые расчёты позволили получить детальные поля температуры, скорости и состава газовой фазы в объёме конвертера, а также распределение температур по толщине многослойной футеровки. Установлено, что в рабочем режиме

температура в камере пиролиза превышает 1200 °С, что обеспечивает полное разложение органических соединений. Анализ линий тока выявил наличие крупномасштабных вихревых структур, способствующих интенсивному перемешиванию реагентов и выравниванию температурного поля.

Особое внимание уделено динамике прогрева футеровки при холодном пуске и выходе на стационарный режим. Разработанная упрощённая динамическая модель нагрева показала, что время выхода на квазистационарное тепловое состояние составляет несколько часов, что необходимо учитывать при планировании пусковых операций и расчёте ресурса огнеупорных материалов.

Суммарная тепловая нагрузка на систему водяного охлаждения, определённая по результатам моделирования, составила около 125 кВт для основных слоёв футеровки и порядка 180 кВт для всей печи с учётом газохода. Эти данные служат основой для проектирования контура охлаждения и выбора теплообменного оборудования.

Верификация разработанной методики проводилась путём сравнения с результатами независимого моделирования, выполненного ОАО НПП «Химмаш-Старт» с использованием программного продукта STAR CCM+. Отличие по основным интегральным характеристикам (температура отходящих газов, тепловые потоки через стенки) не превышает 10–15 %, что подтверждает адекватность предложенной модели и возможность её применения для широкого круга технологических задач.

Таким образом, комплексное CFD-моделирование, объединяющее газодинамику, химическую кинетику и сопряжённый теплообмен, позволяет не только рассчитать режимы работы собственно плазменной печи, но и оценить влияние технологических параметров (расход плазмообразующего газа, состав отходов, тепловая нагрузка) на вспомогательное оборудование и состояние первой стенки. Полученные распределения температур и тепловых потоков

служат исходными данными для прочностных расчётов футеровки, прогнозирования её износа и оптимизации системы охлаждения. Таким образом, предложенный подход обеспечивает сквозное решение задачи от первичного расчёта плазменного реактора до проектирования всей технологической схемы переработки отходов.

Литература

1. Переславцев А.В., Вошинин С.А., Артемов А.В. Плазменная переработка отходов: монография. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 436 с.
2. Патент RU2842926C1. 2024-06-14.

NUMERICAL MODELING OF THE HEATING OF PLASMA CONVERTER

**P.I. Petrenko^{1,2,*}, N.S. Chemodanov¹, A.B. Pereslavysev¹,
A.V. Artemov¹, S.A. Voschinin¹**

¹*National Research Center «Kurchatov Institute»
123182, Moscow, Sq. Akademika Kurchatova, 1*

²*National Research Nuclear University «MEPhI»
115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31*

**Petrenko_pi@nrcki.ru*

The results of mathematical modeling of non-stationary thermal modes of a plasma converter for the waste treatment of wastes are presented. A simplified dynamic model of the converter internal layer heating has been developed. The power, airflow, and load on the first wall during the furnace heating and operating mode have been evaluated. A coupled dynamic calculation of gas dynamics, equilibrium chemistry, and heat flows through the multi-layer in different sections of the converter has been performed.

Key words: plasma converter, plasma treatment of wastes, numerical modeling, and thermal calculation.

АКТИВНЫЕ БРОУНОВСКИЕ МОТОРЫ И МИКРО- И НАНОРОБОТЫ В ПЛАЗМЕ И ЖИДКОСТЯХ

О.Ф. Петров

ОИВТ РАН

125412, Россия, Москва, Ижорская ул., 13 стр.2

ofpetrov@ihed.ras.ru

Экспериментально изучалась динамика активных броуновских частиц в плазме низкого давления, вязкой жидкости и в сверхтекучем гелии. При воздействии лазерного излучения на заряженные броуновские частицы микронных размеров, левитирующие в плазме, вязкой жидкости или сверхтекучем гелии, можно наблюдать сложное движение частиц, если они поглощают энергию излучения. Такие частицы можно рассматривать как активные броуновские моторы (активные микро- и нанороботы), движение которых контролируется излучением, а сам механизм активного броуновского движения связан с фото- или термофорезом (в плазме и жидкости) или с возникновением квантовой турбулентности (в сверхтекучем гелии).

Ключевые слова: активные броуновские частицы и моторы, активные микро- и нанороботы.

Введение

В отличие от пассивных броуновских частиц, которые находятся в тепловом равновесии с окружающей средой, активные броуновские частицы могут преобразовывать энергию окружающей среды в кинетическую энергию своего движения, в результате чего они оказываются в состоянии вдали от термодинамического равновесия [1-3].

Активными броуновскими частицами могут быть заряженные частицы, взвешенные в плазме [1], вязкой жидкости [2] или левитирующие в криогенной жидкости (криогенный коллоид) [3], кинетическое движение которых индуцируется лазерным

излучением.

При воздействии лазерного излучения на заряженные броуновские частицы микронных размеров, левитирующих в плазме, в вязкой жидкости или сверхтекучем гелии, можно наблюдать сложное движение частиц, если они поглощают энергию излучения. Такие частицы можно рассматривать как активные броуновские моторы (активные микро- и нанороботы), движение которых контролируется излучением, а сам механизм активного броуновского движения связан с фото- или термофорезом (в плазме и жидкости) или с возникновением квантовой турбулентности (в сверхтекучем гелии). Активные броуновские моторы способны получать энергию из внешних источников (лазерное излучение), запасать ее и расходовать на собственное движение в среде, что может приводить к их самоорганизации и эволюции.

Одной из фундаментальных проблем физики активных броуновских частиц является роль коллективных явлений в ансамбле (рое) таких частиц, при их сильном взаимодействии, в эволюции образованных ими макроскопических структур.

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения активных броуновских моторов (активных микро- и нанороботов) в плазме газового разряда, вязкой жидкости и сверхтекучем гелии.

Активные броуновские моторы в плазме

Было изучена динамика активных броуновских моторов (активных микро- и нанороботов) - сферических монодисперсных полимерных частиц с металлическим покрытием, взвешенных в газовом разряде при «плавлении» их монослоя под действием лазерного излучения [1]. Коллективные явления активных броуновских частиц могут демонстрировать аналогию с обычными фазовыми переходами. Наблюдалось активное броуновское движение сильно взаимодействующих заряженных частиц при различной мощности лазерного излучения при переходе моно-

слоя частиц из кристаллического состояния в жидкостное, вдали от термодинамического равновесия.

Активное броуновское движение было вызвано фотофорезом, т.е. поглощением лазерного излучения поверхностью частицы, покрытой металлом, что создает радиометрическую силу, которая, в свою очередь, приводит в движение частицу. Радиометрическая сила может привести к эффективному увеличению кинетической энергии и коэффициента диффузии сферических частиц на несколько порядков по сравнению с пассивным броуновским движением.

Активные броуновские моторы в вязкой жидкости

Экспериментально была изучена динамика активных броуновских моторов (активных микро- и нанороботов) - заряженных капель эмульсии сложного состава в вязкой жидкости при лазерном облучении [2]. Эмульсия "масло в воде" состояла из монодисперсных капель масла диаметром 65 мкм, содержащих наночастицы магнетита размером около 10 нм, и была помещена в водный раствор поверхностно-активного вещества. Наблюдаемое активное броуновское движение капель эмульсии было результатом внутрикапельного движения наночастиц магнетита, поглощающих лазерное излучение. Было обнаружено различное поведение капель эмульсии, в том числе как локализованное, так и с заметным преобладанием направленного движения. В то же время для всех капель эмульсии наблюдалось движение в переходном и диффузионном режимах. Экспериментально полученный коэффициент диффузии $7.8 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ на 5 порядков превышает расчетный для капель пассивной эмульсии $6.6 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ и близок к характерному значению для природных систем.

Активные броуновские моторы в сверхтекучем гелии

Проведено изучение динамики активных броуновских моторов (активных микро- и нанороботов) - частиц сверхпроводящей керамики с размерами до 60 мкм и электрическими зарядами до 10^5 е , левитирующих в статической магнитной ловушке в сверх-

текущем гелии при температурах 1.7-2.18 К под действием лазерного излучения с плотностью мощности до ~ 2 Вт/см². Обнаружено, что с ростом плотности мощности лазерного излучения кинетическая энергия движения частиц и коэффициент их диффузии увеличиваются на 6-7 порядков по сравнению с равновесными значениями при температурах сверхтекучего гелия. Показано, что движение частиц можно рассматривать как движение активных броуновских частиц (моторов) с сильным кулоновским и магнитным взаимодействием [3].

Активное броуновское движение частиц в сверхтекучем гелии в экспериментальных условиях (при температурах ниже λ -точки) было связано с взаимодействием нормальной и сверхтекучей компонент гелия с поверхностью частицы и друг с другом за счет появления квантового вихревого клубка при нагреве поверхности частицы лазерным излучением.

Также показано, что увеличение интенсивности лазерного излучения, когда оно воздействует на облако частиц, ведет к самоорганизации и эволюции системы частиц с переходами системы в более сложное состояние с более низкой энтропией, при этом в системе создается отрицательный поток энтропии вследствие квантового механизма потери энтропии в сверхтекучем гелии, связанной с передачей тепла нормальной компонентой сверхтекучего гелия с образованием квантовых вихрей. Неожиданным результатом является увеличение количества и длины цепочек частиц с увеличением плотности мощности лазерного излучения.

Исследования выполнены за счет проекта Российского научного фонда (№25-12-00406).

Литература

1. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma // Scientific Reports. 2022. No.12. P. 8618-8625.
2. Kononov E.A., Senoshenko R.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Active Brownian motion of emulsion droplets driven by nanoscale effects under laser irradiation // Physics of Fluids. 2024. No. 36. P. 117145.
3. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Experimental evolution of active Brownian grains driven by quantum effects in superfluid helium // Scientific Reports. 2022. No.12. P. 6085-6098.

ACTIVE BROWNIAN MOTORS AND MICRO- AND NANOROBOTS IN PLASMA AND LIQUIDS

O.F. Petrov

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
125412, Moscow, Izhorskaya 13 Bldg 2, Russia
ofpetrov@ihed.ras.ru*

Abstract. The dynamics of active Brownian particles in low-pressure plasma, viscous liquid, and superfluid helium has been studied experimentally. When laser radiation is applied to charged (Coulomb) Brownian particles of micron size levitating in plasma, viscous liquid or superfluid helium, complex particle motion can be observed if they absorb radiation energy. Such particles can be considered as active Brownian motors (active micro- and nanorobots), the movement of which is controlled by radiation, and the mechanism of active Brownian motion itself is associated with photo- or thermophoresis (in plasma and liquid) or with the occurrence of quantum turbulence (in superfluid helium).

Key words: active Brownian particles and motors, active micro- and nanorobots.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ВОДОРОДОМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ИНДУКЦИОННОМ Ar/H₂ РАЗРЯДЕ

Е.И. Преображенский^{1,*}, А.В. Водопьянов^{1,2}, А.В. Нежданов²

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Россия, г. Нижний Новгород.

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Россия, г. Нижний Новгород.

*evgenypr@ipfran.ru

В работе описаны исследования модификации графена и одностенных углеродных нанотрубок в индукционном аргон-водородном разряде низкого давления. Показано, что такая обработка приводит к водородной модификации образцов, что подтверждается комплексом спектроскопических методов. Установлено, что скорость модификации определяется заземлением образца, внешним смещением и мощностью. Для нанотрубок наблюдался переход к полупроводниковому типу проводимости с частичной обратимостью при отжиге. Продемонстрирована возможность селективной модификации графена с использованием масок.

Ключевые слова: графен, ОУНТ, графан, гидрогенизация, маски, индукционная плазма

Углеродные наноматериалы, в частности, графен и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), являются перспективными материалами для электроники и сенсорики. Особый интерес для полупроводниковых приложений представляет возможность контролируемого управления их зонной структурой посредством химической модификации. Одним из подходов к решению данной задачи является гидрогенизация углеродных наноматериалов [1]. Она позволяет осуществить переход углерода из sp^2 - в sp^3 -гибридизацию, изменяя зонную структуру. Ин-

дукционный разряд позволяет проводить безэлектродный, химически чистый процесс обработки вследствие высокой активности неравновесной среды при низкой температуре газа.

В работе исследована возможность плазменной модификации графена и ОУНТ с использованием индукционного аргон-водородного разряда низкого давления [2]. Плазма зажигалась в кварцевой трубке, вокруг которой был обмотан индуктор, подключаемый к ВЧ-генератору с частотой 13.56 МГц. Потоки Ar и H₂ регулировались при помощи расходометров так, что доля водорода в смеси составляла ~ 5%. Давление составляло 50 мТорр. Образцы, представляющие собой монослойный графен размером 1x1 см² или слой ОУНТ, располагались на подложках из стекла или металла. В части экспериментов для проведения электрических измерений на углы графена наносились контакты. Образцы размещались на металлическом столике в 30 см от центральной части индуктора, что позволяло минимизировать термическое воздействие. В данной области оценочные значения температуры электронов составляют ~ 4 эВ, а концентрации ~ 10⁻⁹ см⁻³.

Для оценки степени модификации образцов применялся комплекс методов, включающий спектроскопию комбинационного рассеяния, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, ИК-Фурье спектроскопию, а также атомно-силовая, оптическая и электронная микроскопии. Кроме того, было проведено измерение электрофизических свойств образцов. Было исследовано влияние времени плазменной обработки (до 30 минут), вкладываемой мощности (до 200 Вт) и внешнего электрического смещения на конечные свойства графена и ОУНТ. Применительно к нанотрубкам дополнительно исследовано влияние доли водорода в смеси (до 15%), расстояния до центра индуктора, а также проведен отжиг. Отдельная серия экспериментов была посвящена селективной обработке графена с использованием масок.

В результате экспериментов показано, что плазменная обработка графена и ОУНТ приводит к водородной модификации, что подтверждается ростом D, D' и D+D'-пиков в спектрах КР ($I(D)/(G) \sim 1$ для графена), наблюдением C–H связей в ИК-Фурье спектрах ($\sim 2900 \text{ см}^{-1}$) и увеличением доли sp^3 -углерода по данным РФЭС. Показано, что модификация образцов и рост сопротивления определяются наличием заземления, мощностью, а также внешнего смещения. При этом увеличение мощности выше 200 Вт при времени обработки 20 минут ведет к деградации образцов. Для ОУНТ зафиксирован переход от металлического типа проводимости к полупроводниковому, а отжиг при 240°C демонстрирует частичную обратимость гидрогенизации. Эксперименты с масками подтвердили возможность селективной модификации графена с шириной переходной области $\sim 0.2 \text{ мм}$, что перспективно для создания планарных гетероструктур.

Работа выполнена в рамках госзадания FFUF-2026-0003.

Литература

1. K. E Whitener. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 36(5) (2018). <https://doi.org/10.1116/1.5034433>
2. Е.И. Преображенский, А.В. Водопьянов, А.В. Нежданов, А.И. Машин. Влияние электрического поля на скорость гидрогенизации графена в индукционно-связанной плазме. Письма в ЖТФ 2024, том 94, № 7, С. 1002-1007 <https://doi.org/10.61011/jtf.2024.07.58333.107-24>.

SELECTIVE MODIFICATION OF GRAPHENE IN AN Ar/H₂ INDUCTIVE DISCHARGE USING MASKS

E.I. Preobrazhensky^{1,*}, A.V. Vodopyanov^{1,2}, A.V. Nezhdanov²

¹ *Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia, Nizhny Novgorod.*

² *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia, Nizhny Novgorod.
evgenypr@ipfran.ru*

This paper studied the plasma modification of graphene and single-walled carbon nanotubes in a low-pressure argon-hydrogen induction discharge. It was shown that the treatment leads to hydrogen modification of the samples, which is confirmed by a combination of spectroscopic methods. It was established that the modification rate is determined by sample grounding, external bias, and power. A transition to semiconductor-type conductivity with partial reversibility upon annealing was observed for the nanotubes. The possibility of selective modification of graphene using masks was demonstrated.

Key words: graphene, SWNTs, hydrogenation, induction plasma.

АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СВЧ РАЗРЯДЕ ПО ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е.И. Преображенский^{1,*}, А.В. Водопьянов¹, Д.А. Мансфельд¹,
Н.В. Чекмарев¹

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Россия, г. Нижний Новгород.

evgenypr@ipfran.ru

Исследовано применение машинного обучения для прогнозирования концентрации продуктов плазмохимической конверсии углекислого газа по оптическим спектрам излучения плазмы СВЧ-разряда. Разряд поддерживался излучением магнетрона с частотой 2.45 ГГц в волноводном аппликаторе в потоке углекислого газа при атмосферном давлении. Измерение концентраций продуктов реакции и оптических спектров излучения плазмы проводились при мощности СВЧ излучения до 1.5 кВт и расхода газа до 30 л/мин. Для стационарных режимов построены линейная и многослойная регрессионные модели, которые позволили с приемлемой точностью прогнозировать концентрацию продуктов реакции по оптическим спектрам для заданных значений мощности и потока газа.

Ключевые слова: микроволновая плазма, диоксид углерода, машинное обучение, оптическая спектроскопия

Плазмохимическая конверсия углекислого газа является перспективным направлением переработки парниковых газов в ценные химические продукты, однако контроль её эффективности традиционными методами остаётся сложной и затратной задачей [1]. Перспективным способом является конверсия CO₂ в плазме СВЧ разрядов атмосферного давления, которые

активно используются в прикладной физике плазмы [2]. Однако высокая стоимость и сложность традиционного аналитического оборудования делают актуальным поиск альтернативных методов анализа. В этой связи машинное обучение открывает новые возможности для прогнозирования параметров разряда без дорогостоящей аппаратуры. В данной работе исследовалось применение машинного обучения для прогнозирования выходных концентраций продуктов плазмохимической конверсии CO_2 по оптическим спектрам, мощности нагрева и потокам газов.

Реактор представлял собой кварцевую трубу, помещенную в СВЧ-аппликатор. В нее подавался тангенциально закрученный поток углекислого газа. Плазма генерировалась излучением магнетрона с частотой 2.45 ГГц и мощностью до 3 кВт. Сам разряд на оси реактора имел форму шнура диаметром ~ 10 мм и длиной ~ 30 мм. Была проведена серия экспериментов при различных мощностях излучения (до 1.5 кВт) и потоках углекислого газа (до 30 л/мин). Также для дополнительного охлаждения плазменного газа в постреакторной зоне использовалась закалка углекислым газом или азотом (до 20 л/мин) с целью дополнительной фиксации продуктов переработки [3]. Концентрации продуктов разложения непрерывно измерялись газоанализатором и ИК Фурье спектрометром. Одновременно регистрировались оптические спектры плазменного шнура в диапазоне 350–1000 нм.

Для численных расчётов выбирались стационарные режимы разряда. Спектральные данные нормировались. Из всех линий спектра отбирались только те, интенсивность которых имела максимальную корреляцию с концентрациями компонент выходной смеси, прежде всего, угарного газа. На основе выбранных значений спектральных характеристик с использованием библиотеки `scikit-learn` Python были построены линейные и многослойные регрессионные модели. В качестве вход-

ных данных использовались спектральные данные, а также параметры установки. Выходные данные модели сравнивались со значениями концентраций, которые измерялись при помощи газоанализатора. Результаты показали, что данные модели позволяют с приемлемой точностью прогнозировать концентрацию СО по значениям мощности, потоков газов и спектрам. Это открывает возможность отказаться от дорогостоящего газоанализатора в пользу оптических измерений, которые в сочетании с машинным обучением, могут позволить значительно снизить стоимость анализа продуктов разложения, а также проводить диагностику в реальном времени без отбора проб.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-22-00796

Литература

1. Полак Л.С., Овсянников А.А., Словецкий Д.И., Вурзель Ф.Б. Теоретическая и прикладная плазмохимия. М.: Наука, 1975.
2. Мансфельд Д.А., Водопьянов А.В., Чекмарев Н.В., Преображенский Е.И. (2025). Конверсия углекислого газа в плазме СВЧ-разряда с закалкой встречным потоком газа. *Письма в ЖТФ*, 2025, том 51, вып. 7. DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60077.20162
3. Chekmarev, N. V., Mansfeld, D. A., Vodopyanov, A. V., Sintsov, S. V., Preobrazhensky, E. I., & Remez, M. A. (2024). Enhancement of CO₂ conversion by counterflow gas quenching of the post-discharge region in microwave plasma sustained by gyrotron radiation. *Journal of CO₂ Utilization*, 82, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102759>

ANALYSIS OF THE COMPOSITION OF PRODUCTS OF PLASMA-CHEMICAL DECOMPOSITION OF CARBON DIOXIDE IN A MICROWAVE DISCHARGE BY OPTICAL SPECTRA USING MACHINE LEARNING

**E.I. Preobrazhensky^{1,*}, A.V. Vodopyanov^{1,2}, D.A. Mansfeld,
N.V. Chekmarev²**

*¹ Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences, Russia, Nizhny Novgorod.
evgenypr@ipfran.ru*

Machine learning was used to predict the concentration of carbon dioxide plasma-chemical conversion products based on the optical spectra of microwave discharge plasma. The discharge was maintained by microwave radiation from a magnetron with a frequency of 2.45 GHz in a waveguide applicator in a carbon dioxide flow at atmospheric pressure. Reaction product concentrations and plasma optical spectra were measured at microwave power up to 1.5 kW and gas flow rates up to 30 l/min. Linear and multi-layer regression models were constructed for stationary conditions, enabling acceptable accuracy in predicting reaction product concentrations based on optical spectra for given power and gas flow rates.

Key words: microwave plasma, carbon dioxide, machine learning, optical spectroscopy.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В БЕЗМЕМБРАННЫХ ПРОТОЧНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ

Ю.И. Пушкарёв^{1,2}, В.Ю. Чебакова^{1,2,*}

¹КФУ, 420 008, г.Казань, Кремлевская 18

²ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261

* vchebakova@mail.ru

Безмембранные проточные редокс батареи основаны на несмешиваемости ламинарных потоков, прокачиваемых реагентов, при этом граница раздела между двумя потоками работает как проводник протонов/ионов. В работе исследовалось влияние скорости течения на поведение реагентов типа газ-жидкость на границе раздела.

Ключевые слова: безмембранные проточные редокс батареи, взаимодействие потоков, граница раздела

Введение

Мембраны, разграничивающие потоки реагирующих между собой электролитов в проточных редокс батареях, часто являются наиболее дорогостоящими и наименее надежными компонентами батарей, поскольку они могут подвергаться коррозии при многократном воздействии определенных реагентов. Поэтому предлагается использовать прокачку реагентов без мембраны, основываясь на несмешиваемости ламинарных потоков, это возможно при прокачке электролитов с разной вязкостью [1,2], а также при использовании в качестве одного из реагентов газовую фазу [3]. Так, например, электрохимический элемент, основанный на реакции ванадия и кислорода, был получен путем замены положительной полужайки на воздушный электрод [4]. Так кислород или воздух является наиболее рассматриваемым реагентом в силу

доступности, а парой к нему стали металлы, например водные цинк воздушные батареи [5]. При этом в ранних работах преобладало предположение прокачки двух несмешиваемых потоков при отсутствии мембраны между ними. Также данный аспект представляет интерес для струйных разрядов с жидкими электродами [6-9].

В работе исследовалось влияние скорости течения на поведение реагентов типа газ-жидкость на границе раздела.

Численный эксперимент и обсуждение

Моделирование проводилось в пакете COMSOL Multiphysics. Геометрия моделируемой ячейки представляет собой трубу с двумя отдельными входами для прокачки потоков газ-жидкость. В качестве прокачиваемых реагентов для модельной задачи бралась вода и воздух (рис.1). Расчеты показали зависимость образования волн на поверхности от скорости течения и высоты воздушной фазы.

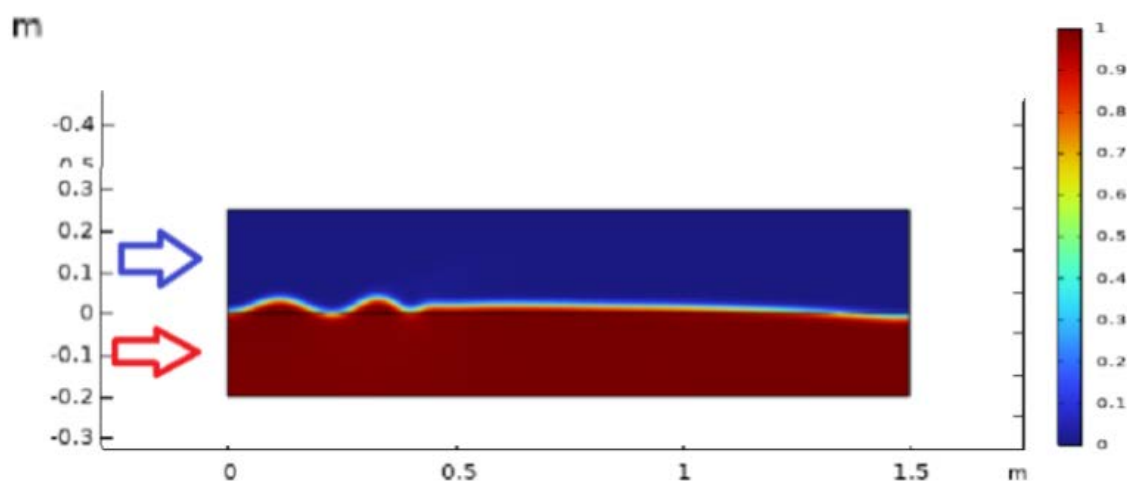


Рис.1. Скорость воды 0.1м/с, скорость воздуха 1.5м/с, момент времени 6с. высота трубы 45см (20 вода 25 воздух), длина 1,5м

При этом численные расчеты показали, что чем меньше высота воздуха, тем большую скорость прокачки воздуха можно позво-

лить без образования волн на поверхности воды. Стоит отметить, что в 2D-реализации модели не учитывается взаимодействие жидкости с боковыми стенками, поэтому относительная скорость воздуха, при которой возникают волны на поверхности жидкости может быть занижена. Образование волн делает систему нестабильной (рис.2), что нарушает плавность выработки энергии, а также ставит под сомнение безопасность использования такой системы, а также ее возможного масштабирования. На образование волн влияют все параметры одновременно - вязкость, плотность, поверхностное натяжение. Так при замене воды на не очень вязкое масло, параметры которого: плотность - 850 кг/м^3 , вязкость - $0.003 \text{ Па}\cdot\text{с}$, поверхностное натяжение - 0.03 Н/м и скоростями для масла 0.1 м/с и воздуха 1.5 м/с картине не дала значительного расхождения с водой.

Таким образом, представляется лучшим технологическим решением в случае жидкостных металло-воздушных батарей использовать следующие технологические решения:

а) подача потоков в одном направлении, но одна из фаз идет через пористый электрод.

б) либо через разделительный пористый элемент перпендикулярно направлению потока жидкого электролита.[10,11]

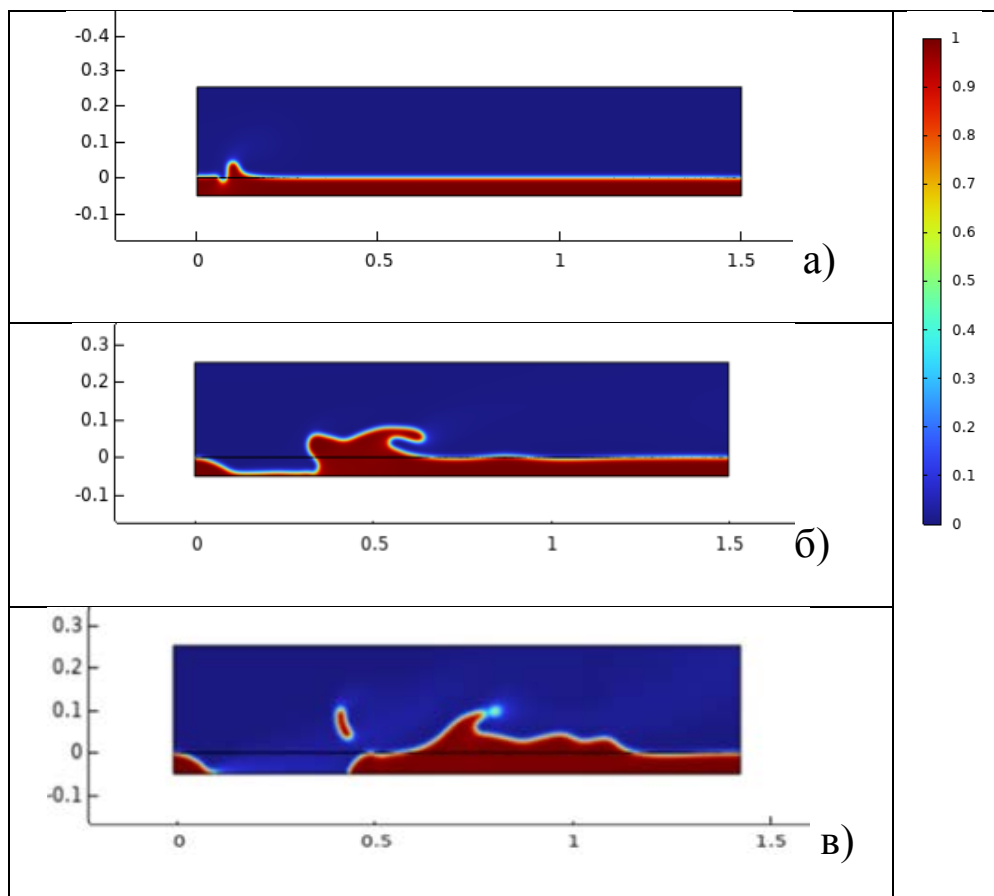


Рис.2. Скорость воды 0.1м/с, скорость воздуха 1.5м/с, высота трубы 30см (5 см вода и 25см воздух), длина 1,5м, момент времени а) 1 с, б) 3 с, в) 6 с

3. Заключение

В работе исследовалось влияние скорости течения на поведение реагентов типа газ-жидкость на границе раздела в безмембранных проточных редокс батареях показано, что данное технологическое решение относительно тяжело в определении необходимых параметров системы, таких как соотношение объемов газовой и жидкостной фазы, а также скорости прокачки потоков. Это также актуально при обработке изделий в струе электролита.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 26-21-20016)

Литература

1. D. Ruiz-Martín, D. Moreno-Boza, R. Marcilla et al. Mathematical modelling of a membrane-less redox flow battery based on immiscible electrolytes// Applied Mathematic Modelling. 2022. Vol. 101. P/96-110
2. Xu Lua, Dennis Y.C. Leunga, Yifei Wanga, Huizhi Wangb, Jin Xuan An Up-scaling Strategy for Counter-flow Based Microfluidic Network: A Numerical Study// Energy Procedia 142 (2017) 661–666
3. Walid Sharmoukh Redox flow batteries as energy storage systems: materials, viability, and industrial applications//RSC Adv.,2025,15, 10106 DOI: 10.1039/d5ra00296f
4. Eduardo Sanchez-Díez, Edgar Ventosa, Massimo Guarnieri, Andrea Trovo, Cristina Flox, Rebeca Marcilla, Francesca Soavi, Petr Mazur, Estibaliz Aranzabe, Raquel Ferret. Redox flow batteries: Status and perspective towards sustainable stationary energy storage// Journal of Power Sources. 2021. Vol.481. art.228804 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228804>
5. Y. Li, J. Lu Metal–air batteries: Will they be the future electrochemical energy storage device of choice?//ACS Energy Lett., 2 (2017), pp. 1370-1377, DOI: 10.1021/acsenergylett.7b00119
6. Gaisin A.F., Kuputdinova A.I., Mukhametov R.A., Kashapov N.F. Discharge between liquid jet and metallic electrodes// Technical Physics. 2018. T. 63. № 5. C. 695-699.
7. Gaisin A.F., Kuputdinova A.I., Mukhametov R.A., Kashapov N.F. Discharge between liquid jet and metallic electrodes// Technical Physics. 2018. T. 63. № 5. C. 695-699.
8. Kashapov R.N., Kormushin K.V., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Nikitina S.A., Popov A.O., Artemev D.A. Plasma electrolyte discharge in metal powder production processes// Construction Materials and Products. 2025. T. 8. № 6.
9. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Fazlyev M.R., Kiiamova L.I., Sabitov L.S., Aktyamova L.Sh. Orientation-dependent mechanical properties of 3D-printed components fabricated by selective laser melting of metal powders// Construction Materials and Products. 2025. T. 8. № 6.
10. Molla Asmare, Muluken Zegeye, Ababay Ketema Advancement of electrically rechargeable metal-air batteries for future mobility// Energy Reports 11 (2024) 1199–1211
11. Naseem Ahmad Khan, Abdul Hamid, Tayaba Najam, Muhammad Ali, Muhammad Altaf Nazir, Khalil Ahmad, Muhammad Imran, Aziz ur

Rehman , Syed Shoaib Ahmad Shah Emerging trend of two-dimensional MBenes-based materials for zinc and lithium air batteries// Next Materials 11 (2026) 101949

MODELING OF GAS-LIQUID FLOW INTERACTIONS IN MEMBRANELESS FLOW BATTERIES

Yu. I. Pushkarev^{1,2}, V. Yu. Chebakova^{1,2,*}

¹Kazan Federal University, 420008 Kazan, 18 Kremlyovskaya street

²Institute of Mechanics and Engineering, Federal Research Center "Kazan Scientific Center", Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

** vchebakova@mail.ru*

Membrane-free redox flow batteries are based on the immiscibility of laminar flows of pumped reactants, with the interface between the two flows acting as a proton/ion conductor. This study investigated the effect of flow velocity on the behavior of gas-liquid reactants at the interface.

Keywords: membrane-free redox flow batteries, flow interactions, interface

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НАНОПОРОШКОВ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОВ (ФЕРРИТА ВИСМУТА, BiFeO_3) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

З. Г. Рагимханова¹, Г. Б. Рагимханов², Е. В. Воронова^{3,*},
Е. А. Образцова³, Н. Н. Скворцова³, А. В. Богач³,
Н. Г. Гусейн-заде³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78

² Дагестанский государственный университет,
367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, дом 43а

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия
119991, г. Москва, ул. Вавилова дом 38

*e-mail: woronowa.elena@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментов по модификации нанопорошка (размеры частиц 40 – 50 нм) и керамики из феррита висмута BiFeO_3 под воздействием микроволнового разряда, возбуждаемого в них излучением мощного гиротрона (впервые было использовано излучение с частотой 75 ГГц, мощностью 300 – 400 кВт). Наблюдалась модификация поверхности порошка (образование сфероидных частиц со сложным рельефом поверхности) и керамики и изменение магнитных свойств материалов (уменьшение ширины петли гистерезиса).

Ключевые слова: феррит висмута, наноструктуры, микроволновый разряд, гиротрон, плазмохимия, синтез микро- и наноматериалов.

Введение

Феррит висмута BiFeO_3 (BFO), по видимому, является единственным материалом, который одновременно проявляет магнитные свойства и выраженный сегнетоэлектрический эффект при комнатной температуре ($T_N > 300$ К). Эта уникальная особен-

ность обусловила широкий интерес к ВФО для применения в спинтронике, фотовольтаике и других областях. На протяжении последнего десятилетия интенсивные исследования были сосредоточены на изучении различных форм ВФО, включая объемные керамические материалы, тонкопленочные структуры и наноструктурированные системы [2]. Наноструктурированные формы ВФО привлекают внимание благодаря структурным модификациям, вызванным размерными эффектами, а также улучшенным магнитным характеристикам и повышенной фотокаталитической активностью.

Под действием мощного СВЧ-излучения могут возникать интересные модификации поверхности как порошков, так и керамик, такие как структурные трансформации, рекристаллизация зерен, заполнение дефектов, создание высокой пористости, упрочнения каркаса, в том числе изменения, связанные с кислородной стехиометрией. В данной работе исследуется возможность модификации свойств нанопорошка и керамических материалов на основе ВФО при воздействии на него мощного импульсного СВЧ-излучения гиротрона [5].

Эксперимент

Феррит висмута не встречается в природе и для его синтеза были разработаны различные методы. Нанопорошки ВФО, используемые в данной работе, были синтезированы в ДГУ путем сжигания нитраторганических прекурсоров, полученных выпариванием смеси эквимольных водных растворов нитрата железа $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и нитрата висмута $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с глицином [9]. Исходные реагенты $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (молярное соотношение Bi^{3+} и Fe^{3+} 1:1, чистота не менее 98%) растворяли в дистиллированной воде, затем к смеси добавляли глицин ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$, чистота не менее 98%). Нагревали полученный раствор при температуре 573 К в течение 1,5 ч до обезвоживания, а для лучшей гомогенизации при приготовлении раствор непрерывно перемешивали при помощи магнитной мешалки. образо-

вавшийся гель самопроизвольно воспламенялся с выделением газов и образованием порошка, который обрабатывался при температуре 973 К на воздухе с использованием печи Nabertherm LF-15/14 в течение 30 мин. Синтезированный BFO-порошок представляет собой наноструктурированный феррит висмута BiFeO_3 с высокой степенью чистоты основной фазы, составляющей не менее 90%.

Модификация порошка с использованием СВЧ-излучения проводилась на специализированном плазмохимическом стенде [6] в ИОФ РАН. Во время обработки порошок наносился слоем толщиной 1 мм на кварцевую подложку и подвергался воздействию серией из 5 импульсов излучения мощностью 300 кВт и длительностью 8 мс (энергия импульса 2,4 кДж) (рис. 1).

В течение процесса, инициированного излучением гиротрона, в реакторе происходили плазмохимические реакции с участием исходного порошка BFO и осаждением новых материалов на стенки реактора.

Излучение из газо-плазменного объема реактора регистрировалось спектро-метром AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO s/n 2109527U2 (спектральный диапазон 215 – 387 нм, среднее спектральное разрешение $\Delta\lambda = 0,1$ нм, размер входной щели 10 мкм, S1 на рис. 1). Излучение нижней поверхности порошка регистрировалось спектрометром AvaSpec-3648-USB2, s/n 0802081U1 (спектральный диапазон 185 – 755 нм, спектральное разрешение $\Delta\lambda = 5$ нм на длине волны $\lambda = 600$ нм, среднее спектральное разрешение 0,8 нм, размер входной щели 25 мкм, S2 на рис. 1).

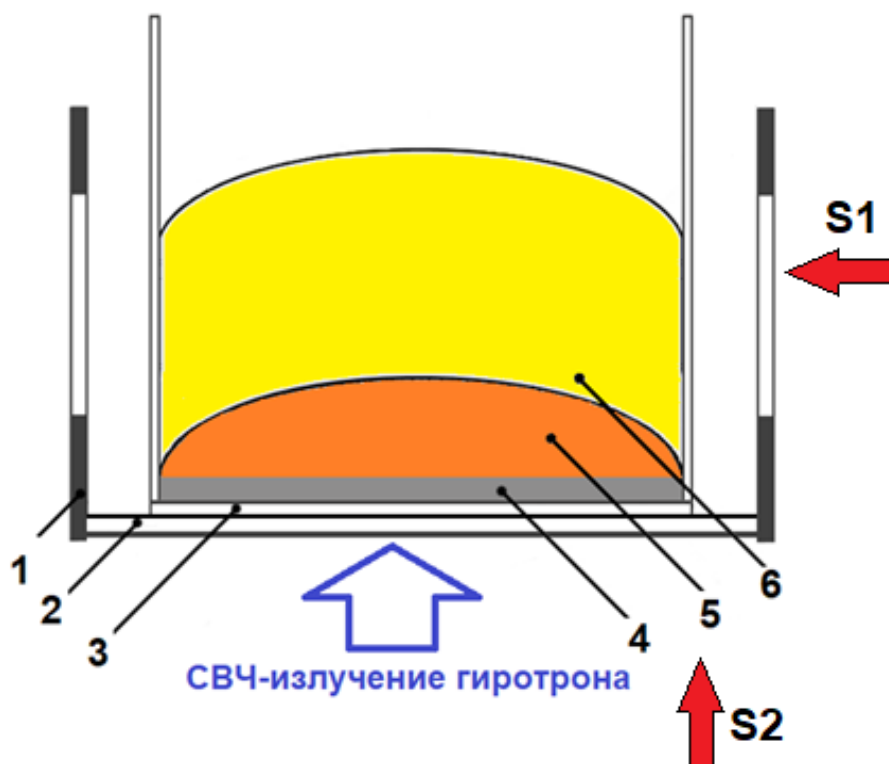


Рисунок 1. Схема стенда: 1 – стенка реактора; 2 – СВЧ-согласованное кварцевое окно; 3 – подложка для порошка; 4 – порошок феррита висмута (BiFeO_3); 5 – плазменная фаза разряда; 6 – газовая фаза разряда; S1, S2 – спектрометры

Результаты

На рис. 2 представлены спектры излучения, зарегистрированные в начале (синий спектр) и в середине нагревающего импульса гиротрона (коричневый спектр) в газо-плазменном объеме над смесью (направление S1 на рис. 1). В спектрах присутствуют множественные линии атомарного железа, слабые линии однозарядного иона железа, линии атомарного висмута и тепловой континуум, что свидетельствует о высокой температуре в газо-плазменной смеси в разряде (потенциал ионизации железа составляет 7,9 эВ). Определенная по тепловой компоненте излучения температура нижней поверхности смеси (направление S2 на рис. 1) во время разряда составила 3000 ± 300 К.

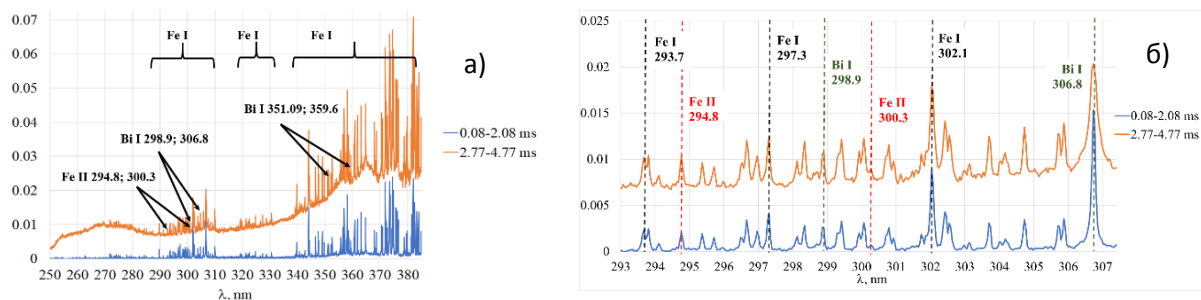


Рисунок 2. а) Спектр излучения разряда в газовом объеме над порошком; б) спектральный диапазон 293–308 нм с характерными линиями Bi I и Fe II.

Полученные микрофотографии образцов показывают, что воздействие иницированного СВЧ-излучением плазмохимического процесса привело к появлению полых внутри зерен правильной шарообразной формы, образованных, вероятнее всего, из жидкой фазы путем перекристаллизации (рис. 3 а, б). Обработка керамики привела к образованию зерен и формированию высокопористого каркаса (рис. 2 в, г).

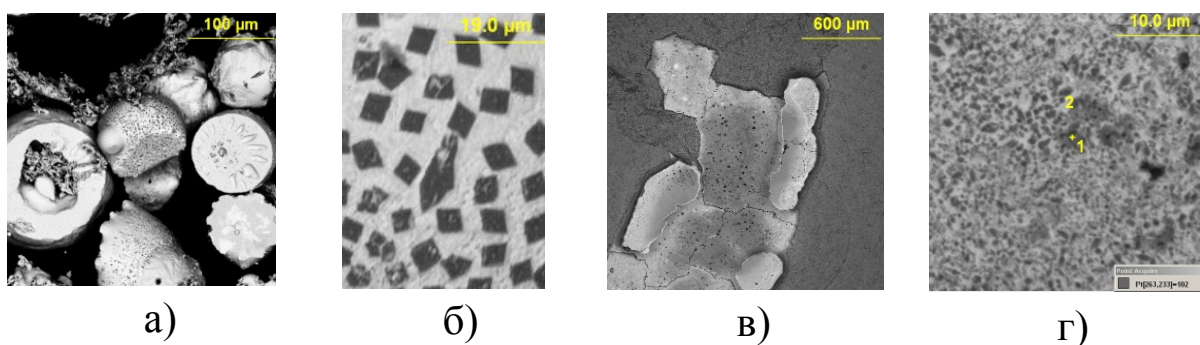


Рисунок 3. Микрофотографии частиц нанопорошка (масштаб 100 и 19 мкм, а), б)) и керамики (масштаб 600 и 10 мкм, в), г)) после воздействия СВЧ-излучения.

На рис. 4 представлены результаты исследования магнитных свойств порошка BFO (магнетометр MPMS-5XL SQUID) при двух температурах, 2 К и 300 К. Видно, что обработка делает петлю материал более магнитомягким – наблюдается уменьшение ширины петли гистерезиса и существенное, в 1,7 раза, увеличение намагниченности.

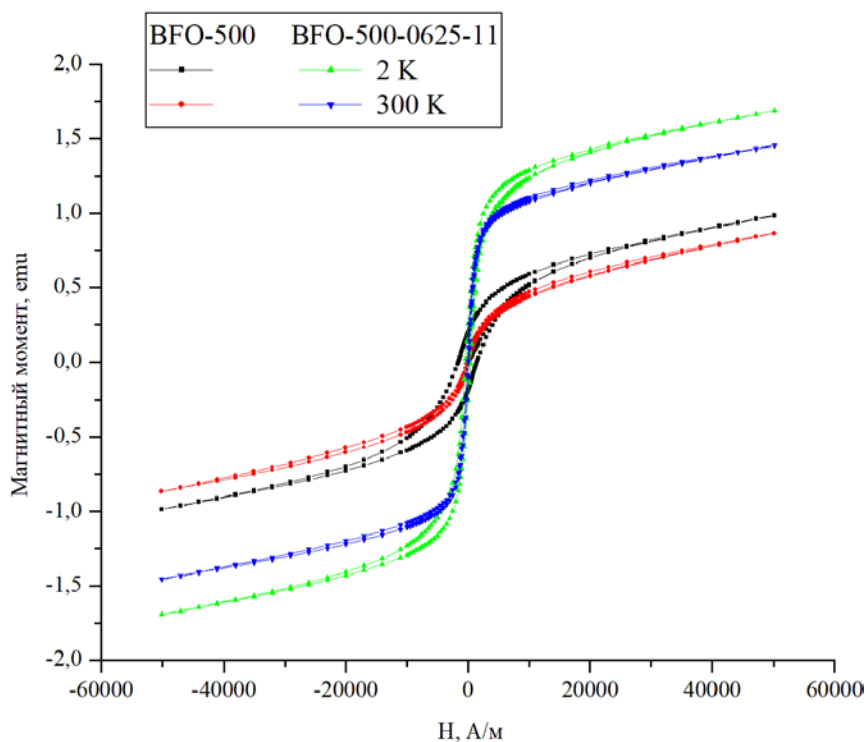


Рисунок 4. Зависимость намагниченности нанопорошка феррита висмута от напряженности магнитного поля. При $T = 2$ К: черная кривая – исходный порошок; зеленая кривая – после обработки. При $T = 300$ К: красная кривая – исходный порошок, синяя кривая – после обработки

Литература

14. Wu M.J., Fan Zh., Xiao D. et al. Progress in Materials Science, V. 84, pp. 335–402 (2016). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.001.302 с.
15. Litvak A.G., Denisov G.G., M.Y. Glyavin M.Y. Russian Gyrotrons: Achievements and Trends. IEEE J. Microwaves, V. 1, pp. 260–268 (2021). DOI: 10.1109/JMW.2020.3030917
16. Alikhanov N. M.-R., Rabadanov M.Kh., Orudzhev F.F., et al. Size-dependent structural parameters, optical, and magnetic properties of facile synthesized pure-phase BiFeO_3 . J. Mater. Sci.: Mater. Electron., V. 5, No. 32, pp. 13323–13335 (2021). DOI: 10.1007/s10854-021-05911-9
17. Соколов А.С., Ахмадуллина Н.С., Борзосеков В.Д. и др. Изв. вузов. Радиофизика, т. 65, в. 11, с. 927 (2022). DOI: 10.52452/00213462_2022_65_11_927.

**CHANGES TO THE PROPERTIES OF NANAPOWDERS AND
CERAMIC MATERIALS FROM PEROVSKITES
(BISMUTH FERRITE, BiFeO_3) UNDER THE ACTION
OF A POWERFUL MICROWAVE RADIATION**

Z. G. Ragimkhanova¹, G. B. Ragimkhanov², E. V. Voronova^{3,*}, E. A. Obraztsova³, N. N. Skvortsova³, A. V. Bogach³, N. G. Gusein-zade³

¹ *MIREA – Russian Technological University,
119454, Moscow, pr. Vernadskogo, 78*

² *Dagestan State University,
367000, Dagestan, Makhachkala, M. Gadzhiev str., 43a*

³ *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Vavilova str., 38*

* *woronowa.elena@gmail.com*

This work presents experimental results on modification of a nanopowder (particle size of 40–50 nm) and ceramics from bismuth ferrite BiFeO_3 under the effect of a microwave discharge initiated by the microwave radiation of a powerful gyrotron (for the first time, radiation with a frequency of 75 GHz and power of 300–400 kW was used). The process resulted in the modification of the surface of the powder (spheroidal particles with a complicated surface relief were generated) and ceramics and a change in the magnetic properties of the materials (a decrease in the width of the hysteresis curve).

Key words: bismuth ferrite, nanostructures, microwave discharge, plasma chemistry, synthesis of micro- and nanomaterials, gyrotron

ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р.В. Сеношенко*, Ф. М. Трухачев, Е. А. Кононов,
М. М. Васильев, О. Ф. Петров

ОИВТ РАН

125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

** senoshenko@mail.ru*

Представлены результаты экспериментального исследования волновых процессов в системе микрочастиц, синтезированных непосредственно в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Качественно определены основные характеристики наблюдаемой пыле-акустической неустойчивости. Показано, что по мере увеличения концентрации и размера облака наблюдается эволюция волны, а также зарегистрировано изменение кинетической энергии частиц. Возможными механизмами волновой эволюции являются увеличение плотности системы, усиление межчастичного взаимодействия, изменение параметров плазмы.

Ключевые слова: коллоидная плазма, пыле-акустическая неустойчивость, синтез микрочастиц, самоорганизация, волновые процессы, тлеющий разряд.

Коллоидная плазма представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из ионизированного газа и взвешенных в нём заряженных микро- или наночастиц. В среде газового разряда нередко происходит самопроизвольная конденсация таких дисперсных частиц из материалов, находящихся в экспериментальной установке [1]. Получив заряд от окружающей

плазмы, такие частицы приобретают способность к самоорганизации [2]. В подобных системах возможны разнообразные коллективные эффекты: структурные изменения, возникновение вихрей и волн. Если обеспечить поток внешней энергии, частицы в плазме становятся активными, поглощая энергию извне и преобразуя её в энергию собственного направленного движения [3].

В работе экспериментально исследованы волновые процессы в системе микрочастиц, синтезированных непосредственно в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Показано, что в облаке полидисперсных частиц самопроизвольно возникает пыле-акустическая неустойчивость, эволюционирующая по мере увеличения концентрации и размера облака. В ходе эксперимента частицы конденсировались из пересыщенной газовой фазы диэлектрической вставки, распыляемой ионным потоком. С помощью высокоскоростной видеосъемки зафиксировано, что изначально в структуре наблюдался одиночный волновой фронт, затем число фронтов возросло до пяти, а при дальнейшем росте плотности облака снизилось до трёх.

Установлено, что с увеличением концентрации частиц длина волны, период и скорость волны существенно уменьшаются, а кинетическая энергия частиц падает при росте скорости диссипации передаваемой волной энергии. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с гидродинамической моделью, а характер движения частиц соответствует активному броуновскому с последующей диффузионной релаксацией в электростатической ловушке, созданной соседними заряженными частицами.

Литература

1. Fedoseev A.V., Filippov A.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Synthesis of Nanoparticles of Different Morphology in a DC Discharge // *Nanomaterials*. 2025. № 15. P. 1802.

2. Karasev V.Y., Polischuk V.A., Dzlieva E.S., Pavlov S.I., Gorbenko A.P. About the Mechanism of Modification of Melamine Formaldehyde Particles in Dusty Plasmas // J. Phys. Conf. Ser. 2020. №1556. P. 012080.
3. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Active Brownian Motion of Strongly Coupled Charged Grains Driven by Laser Radiation in Plasma // Sci. Rep. 2022. № 12. P. 8618.

THE EVOLUTION OF WAVE PROCESSES IN A SYSTEM OF SYNTHESIZED BROWNIAN PARTICLES IN A DC GLOW DISCHARGE PLASMA

**R.V. Senoshenko^{*}, F.M. Trukhachev, E.A. Kononov, M.M. Vasiliev,
O.F. Petrov**

JIHT RAS

125412, Moscow, Izhorskaya 13 Bldg 2

** senoshenko@mail.ru*

The results of an experimental study of wave processes in a system of microparticles synthesized directly in a DC glow discharge plasma are presented. The main characteristics of the observed dust-acoustic instability have been determined qualitatively. It is shown that as the concentration and volume of the dust cloud increase, wave evolution is observed, and a change in the kinetic energy of the particles is detected. Possible mechanisms for wave evolution include an increase in system density, enhanced interparticle interaction, and changes in plasma parameters.

Key words: colloidal plasma, dust-acoustic instability, microparticle synthesis, self-organization, wave processes, glow discharge.

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКЕ BPD-PSI

Н. С. Сергеев

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ 115409,
Москва, Каширское шоссе д. 31
nickbebeskis@yandex.ru*

В работе исследуется возможность *in-situ* определения дифференциального коэффициента распыления вольфрама, облучаемого пучковой плазмой в линейной установке. На основе измерений даётся оценка полного коэффициента распыления материала. Результаты измерений сравниваются с методом измерения массы образца до/после облучения плазмой.

Ключевые слова: ионное распыление, коэффициент распыления, поверхность, пучковая плазма, вольфрам.

Мотивация исследования

Определение эрозии материалов под действием потока плазмы является известной проблемой для многих сферах её применения: разработка технологии плазменного травления [1], разработка плазменных двигателей [2], изучение процессов переноса вещества в условиях плотной плазмы, в том числе в области исследования удержания горячей плазмы [3].

Традиционно, с целью изучения процессов физического распыления применяются источники ионов, позволяющие варьировать как величину энергии, так и угол падения ионов, поступающих на поверхность. Однако, данный метод имеет ограничения, прежде всего связанные с предельной плотностью тока ионов на исследуемую поверхность в результате ограничения объёмного заряда. Использование

пучка плазмы могло бы решить данную проблему. Дополнительно это позволило бы изучать воздействие электронной компоненты плазмы, что может оказывать дополнительный вклад в распыление поверхностного слоя за счёт его активации.

Основным методом определения количества распылённого материала является взвешивание исследуемого образца до/после облучения. Для этого исследуемый образец выносится на атмосферу, что сопряжено с возможным появлением оксидного или углеродного слоёв, искажающих результаты весовых измерений. Существует подход определения эрозии образца при помощи кварцевого датчика, изначально служащего для определения толщины напыляемого покрытия. В таком случае речь идёт об измерении дифференциального коэффициента распыления путём определения потока распылённого вещества в единицу телесного угла. Исследования, проведённые с помощью данной методики, при использовании сфокусированного ионного пучка, показали хорошее соответствие с литературными данными [4]. В данной работе исследуется возможность применения данной методики для определения эрозии вольфрама, как востребованного тугоплавкого металла, в условиях облучения образца пучковой плазмой в линейной установке.

Экспериментальная установка

Облучение образцов проводилось на линейной установке BPD-PSI [5]. Общая схема установки показана на рисунке 1. Установка разделена на два вакуумных объёма соединённых общим патрубком: цилиндрическая основная камера диаметром 250 мм и длиной 400 мм и узел с электронной пушкой. Подача рабочего газа осуществляется в основной вакуумный объём. Оба узла имеют собственные системы вакуумной откачки. Величина предельного остаточного давления газа в ос-

новой камере составляет 1×10^{-6} мбар, в узле с источником электронов – 1×10^{-7} мбар.

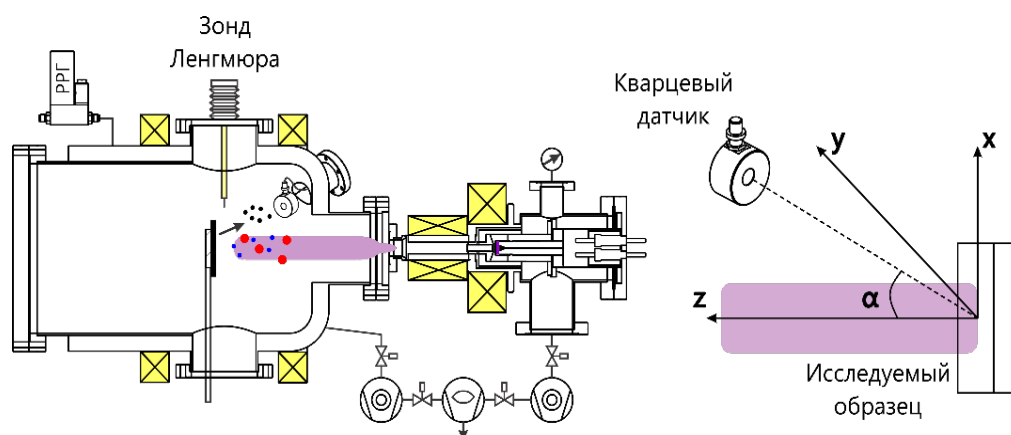


Рисунок 1. Схема установки и геометрия эксперимента.

Пучок дейтериевой плазмы диаметром ~ 20 мм формируется в основной камере, в результате электронного удара с молекулами рабочего газа. Для магнитного удержания плазмы в основной камере используются катушки Гельмгольца. Параметры плазмы – плотность, электронная температура, а также величина потока ионов на поверхность исследуемого образца, вычислялись по данным измерений одиночного зонда Ленгмюра, установленного на подвижном вводе рядом с исследуемым образцом. Для контроля атмосферы остаточного газа использовался квадрупольный масс-анализатор. Перемещение исследуемого образца внутрь основного вакуумного объёма осуществлялось при помощи электрически изолированного ввода движения. Исследуемый образец ($10 \times 10 \times 2$ мм) закреплялся на молибденовом держателе на конце ввода. Температура поверхности образца в процессе предварительного нагрева и облучения плазмой контролировалась при помощи хромель-алюмелевой термопары, приваренной на заднюю сторону образца. Энергия ионов, поступающих на поверхность, задавалась постоянным потенциалом смещения.

Для *in-situ* детектирования потока распылённых частиц использовался водоохлаждаемый кварцевый датчик, расположенный перед образцом и смещённый на полярный угол относительно оси пучка плазмы. Для взвешивания образца до/после облучения плазмой использовались аналитические весы с дискретностью 0,0001 г.

Результаты измерений

Дифференциальный коэффициент распыления $dy(\alpha)/d\Omega$ рассчитывался как.

$$\frac{dy(\alpha)}{d\Omega} = \frac{eR(\alpha)N_A r_{QCM}^2}{mJ_t}$$

где e – элементарный заряд, $R(\alpha)$ – массовый поток распылённого вещества как функция полярного угла α , N_A – число Авагадро, m – атомный вес распыляемого вещества, J_t – плотность тока ионов на поверхность образца, r_{QCM} – расстояние от сенсора до поверхности образца. Характерный результат измерения $dy(\alpha)/d\Omega$ для случая распыления вольфрама ионами аргона различных энергий представлен на рисунке 2/

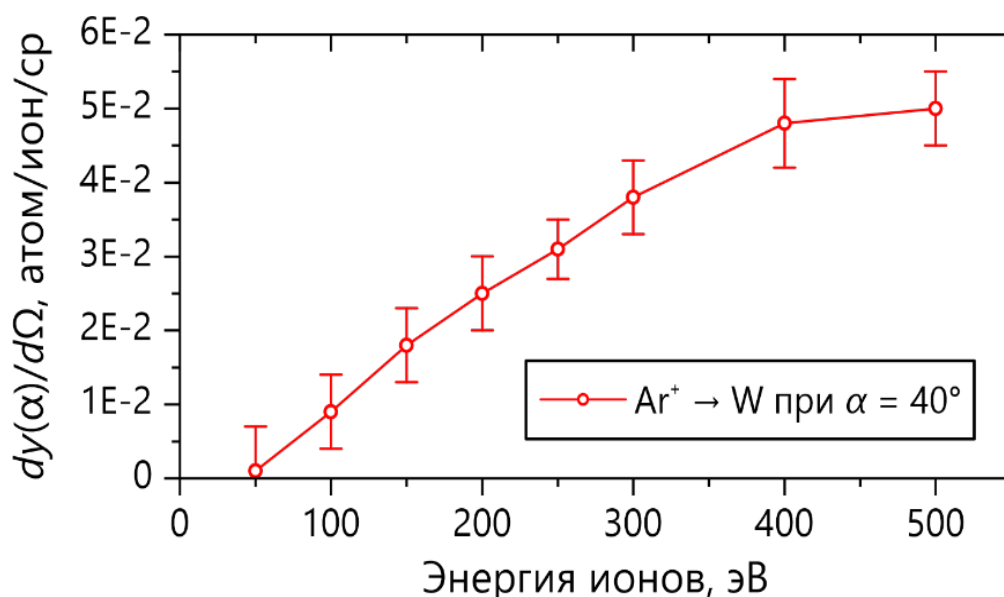


Рисунок 2. Зависимость дифференциального коэффициента распыления для фиксированного значения полярного угла.

Работа поддержана Министерством науки высшего образования Российской Федерации (проект № FSWU-2024-0001).

Литература

1. Shustin E. G. и др. Control of the energy of ion flow affecting electrically insulated surface in plasma processing reactor based on a beam plasma discharge // Vacuum. 2011. Т. 85, № 6. С. 711–717.
2. Wirz R. E. и др. Decel Grid Effects on Ion Thruster Grid Erosion // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Т. 36, № 5. С. 2122–2129.
3. Brooks J. N. и др. Analysis of C-MOD molybdenum divertor erosion and code/data comparison // J. Nucl. Mater. 2011. Т. 415, № 1, Supplement. С. S112–S116.
4. Yalin A. P. и др. Differential sputter yield profiles of molybdenum due to bombardment by low energy xenon ions at normal and oblique incidence // J. Phys. Appl. Phys. 2007. Т. 40, № 10. С. 3194–3202.
5. Sergeev N. S., Sorokin I. A., Podolyako F. S. A new compact linear beam-plasma discharge simulator BPD-PSI // J. Instrum. IOP Publishing, 2022. Т. 17, № 11. С. P11012.

INVESTIGATION OF TUNGSTEN EROSION UNDER BEAM PLASMA IRRADIATION IN THE LINEAR DEVICE BPD-PSI

N. S. Sergeev

*National Research Nuclear University MEPhI 115409, Moscow,
Kashirskoe Highway 31*

**nickbebeskis@yandex.ru*

This work describes the possibility of *in-situ* characterization of the differential sputtering yield of tungsten during irradiation by beam plasma in the linear device. This provides data to estimate the total sputtering yield of the material. The results obtained are compared with the weight loss method.

Key words: ion sputtering, sputtering yield, surface, beam plasma, tungsten.

МЕТОД НАНЕСЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ НА МИКРОЧАСТИЦЫ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ИНИЦИИРУЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО ГИРОТРОНА

**Н. Н. Скворцова¹, Н. С. Ахмадуллина², В. П. Логвиненко^{1,3},
Е. В. Воронова^{1,*}, Т. Э. Гаянова¹, А. С. Соколов¹,
В. Д. Степахин¹, О. Н. Шишилов⁴**

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
119991, г. Москва, ул. Вавилова, дом 38*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук,
119334, г. Москва, Ленинский пр., дом 49*

³*Российский университет дружбы народов,
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6*

⁴*МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78
e-mail: woronowa.elena@gmail.com*

В результате плазмохимического процесса, инициируемого микроволновым разрядом, возникающим в смесях порошков металлического никеля и диэлектриков при их облучении микроволновым излучением мощного гиротрона (частота 75 ГГц, мощность 300 кВт, длительность импульса 6–8 мс) были получены материалы, состоящие из наночастиц никеля, нанесённых на поверхность микроразмерных частиц оксидов (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2) и оксинитридов (Si_5AlON_7). Исследовались смеси с различным массовым содержанием никеля. Инициация процесса непосредственно в смеси оказалась возможной только при содержании никеля 20,0 мас. %, при меньшем содержании никеля самостоятельный разряд не

загорался, что вызвало необходимость использовать дополнительный инициатор.

Ключевые слова: плазма, плазмохимия, гиротрон, СВЧ-излучение, микроволновый разряд, синтез наноматериалов, никель, катализаторы

Введение

Плазма, используемая для приготовления катализаторов, может быть генерироваться различными способами. Дуги, плазматроны и плазменные струи производят равновесную плазму; скользящие дуги обладают характеристиками как равновесной, так и неравновесной плазмы. Иные способы, например, радиочастотные, микроволновые, [1–4]. К этим последним относится разработанный нами метод инициирования плазмохимического процесса посредством облучения смесей порошков металлов и диэлектриков короткими мощными импульсами микроволнового излучения гиротрона, являющегося частью комплекса для электронно-циклотронного нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М [5,6]. Облучение смесей приводит к образованию плазмогазопылевой среды и протеканию плазмохимических цепных реакций, приводящих к образованию микро- и наночастиц с заданным составом и структурой [7].

В данной работе представлены особенности протекания процесса получения наночастиц никеля на поверхности микрочастиц оксидов алюминия, кремния и титана и оксинитрида кремния-алюминия (сиалона) Si_5AlON_7 для содержаний никеля в исходной смеси 0,1; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0 и 20,0 мас. %. Катализаторы на основе никеля незаменимы в крупнотоннажных процессах химической промышленности, таких, как паровая конверсия углеводородов, гидрирование и регидрирование различных субстратов. Преимуществами нашего метода, в отличие от широко применяемых стандартных подходов, является одностадийность процесса и энергетическая эффективность.

Эксперимент

Новые материалы получали посредством плазмохимического процесса (ПХП), инициируемого подачей импульсов микроволнового излучения на смеси порошка никеля и соответствующего керамического материала. Обработка проводилась на специально сконструированном плазмохимическом стенде.

Подаваемое излучение частично поглощалось смесью порошков, в результате чего в смеси наблюдался разряд, приводивший к инициации ПХП. Возможность поглощения излучения, возникновения разряда и поддержания ПХП определялась, помимо параметров микроволнового импульса, природой и концентрацией металла в смеси, а также размером и морфологией частиц смеси [5–7].

В случаях, когда ПХП не удавалось возбудить ни при каких доступных значениях параметров микроволнового импульса (в данной работе – во всех смесях с концентрацией никеля ниже 20.0 мас. %), для инициации ПХП использовался дополнительный, так называемый самоподдерживающийся несамостоятельный разряд (СНС-разряд). Для возбуждения СНС-разряда в плазмохимическом реакторе устанавливался металлический инициатор из никелевой проволоки [8]. В этом случае СНС-разряд возбуждался непосредственно на инициаторе и распространялся в обратном направлении (сверху вниз) к поверхности порошка, воздействуя на неё потоками тепла, излучения и заряженных частиц, что приводило к возбуждению СВЧ-пробоя в объеме порошка.

Во всех случаях наблюдалась характерная для ПХП последовательность стадий: инициация, основная стадия и спад процесса, однако состав исходной смеси влиял на инициацию и начало основной стадии. Регистрация процессов в реакторе осуществлялась с помощью промышленной камеры (ActiveCam, направление ВН1 на рис. 1) и высокоскоростной камеры (MARS 640-815UC или Fastec Imaging IN250M512, ВН2 на рис. 1). Регистрация спектров

осуществлялась оптическими спектрометрами AvaSpec с рабочим диапазоном 520–739 нм и средним спектральным разрешением $\Delta\lambda = 0,3$ нм (направление S1 на рис. 1), 219–381 и 379–523 нм, со средним разрешением $\Delta\lambda = 0,1$ нм и 371 – 920 нм со средним разрешением 0,45 нм (S2 на рис. 1). Камеры и спектрометры работали синхронно

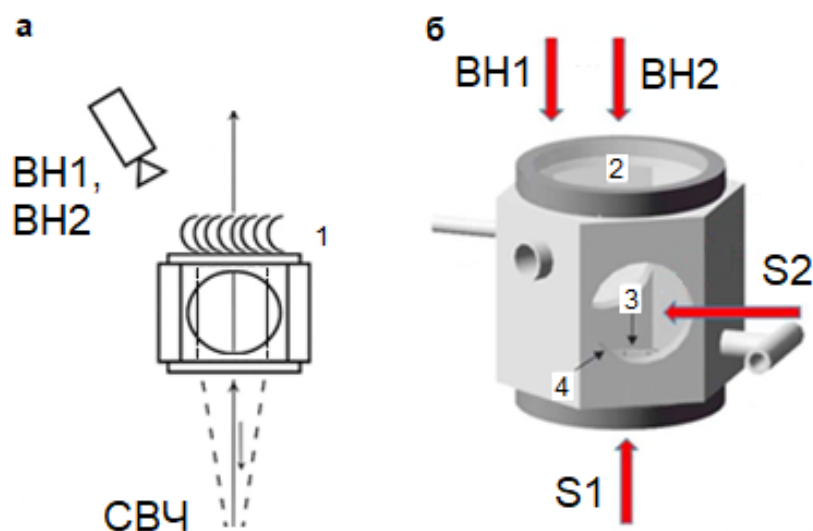


Рисунок 1. Плазмохимический стенд: 1 – инициатор, 2 – верхнее кварцевое окно, 3 – нижнее кварцевое окно для ввода микроволнового (СВЧ) излучения и кварцевая подложка со смесью порошков, 4 – диагностическое кварцевое окно.

Результаты эксперимента

Микроволновый разряд вызывал быстрый подъем температуры поверхности смеси, достигавшей к концу импульса гиротрона 10^3 – 10^4 К. (Температура была определена методом Вина по зарегистрированному континууму теплового излучения.) Учитывая продолжительность импульса $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} с, скорость подъема температуры составляла 10^5 – 10^6 К/с.

Морфология и состав полученных материалов были определены по образцам продуктов ПХП, собранных с поверхности кварцевого цилиндра, устанавливаемого в реактор. Образцы изучались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), дополнен-

ной рентгеновской энергодисперсионной спектроскопией (РЭДС). Для примера, на рис. 2 приведены РЭМ-изображения материалов, полученных при обработке смеси $\text{Al}_2\text{O}_3:20\%\text{Ni}$. Для всех без исключения образцов характерно наличие частиц правильной сферической формы размерами 20–150 мкм. Это превышает размеры как первичных частиц исходных веществ, так и их агломератов, указывая на агломерацию частиц непосредственно в течение ПХП. Правильность формы указывает на образование частиц из расплава. Равномерно ячеистая поверхность частиц с однородным составом показывает, что наиболее вероятен следующий механизм их образования: 1) переход частиц керамических материалов в состояние расплава (полностью или, как минимум, в значительном поверхностном слое), 2) агломерация капель, которой способствует высокая турбулентность газовых потоков в ПХП, что приводит к учащению столкновений капель, 3) сфероидизация агломератов капель за счёт сил поверхностного натяжения, 4) быстрое охлаждение поверхности с одновременной кристаллизацией из множества центров, которая приводит к образованию на поверхности ячеистой структуры (рис. 2, справа), 5) кристаллизация ядра с окончательным формированием сферических частиц

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Госзадание ГЗ БВ10-2026) в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

Литература

1. Neyts E.C. et al. // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 13408–13446:
2. Guo Q. et al. // Catal. Today. 2013. V. 211. P. 156–161.
3. Witvrouwen T. et al. // Plasma Processes Polym. 2012. V. 9. P. 750–760.
4. Chu W. et al. // Catal. Today. 2015. V. 256. P. 41–48.
5. Akhmadullina N.S. et al. // Chem. Phys. 2019. V. 516. P. 63–70.

6. Skvortsova N.N. et al. // Fusion Sci. Tech. 2023. V. 80. Is. 7. P. 882–892.
7. Skvortsova N.N. et al. // Ceram. Int. 2021. V. 47. P. 3978–3987.
8. Соколов А.С. и др. // Патент RU228335.

A METHOD OF DEPOSITING NICKEL NANOPARTICLES ON MICROPARTICLES FROM CERAMIC MATERIALS USING A PLASMACHEMICAL PROCESS INITIATED BY THE RADIATION OF A POWERFUL GYROTRON

N. N. Skvortsova¹, N. S. Akhmadullina², V. P. Logvinenko^{1,3}, E. V. Voronova^{1,*}, T. E. Gayanova¹, A. S. Sokolov¹, V. D. Stepakhin, and O. N. Shishilov⁴

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991, Moscow, Vavilova, 38*

²*Baikov Institute of Metallurgy, Russian Academy of Sciences,
119334, Moscow, Leninskii pr., 49*

³*Peoples' Friendship University of Russia,
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya 6*

⁴*Russian Technological University (MIREA),
119454, Moscow, pr. Vernadskogo, 78*

* *woronowa.elena@gmail.com*

As a result of a plasma-chemical process initiated by a microwave discharge that appears in mixtures of metal nickel and dielectric powders during their irradiation with the microwave radiation of a powerful gyrotron (frequency of 75 GHz, power of 300 kW, pulse duration of 6–8 ms), materials were obtained that are composed from nickel nanoparticles deposited on the surface micro-sized particles of oxides (Al₂O₃, SiO₂, TiO₂) and oxynitrides (Si₅AlON₇). Mixtures with different mass content of nickel were studied. It was found that the process could only be initiated directly inside the powder mixtures at nickel content of 20.0 mass. %. At lower nickel contents, a self-sustained discharge could not be ignited, which made it necessary to use an auxiliary initiator.

Key words: plasma, plasma chemistry, gyrotron, microwave radiation, microwave discharge, synthesis of nanomaterials, nickels, catalysts.

ДЕСТРУКЦИЯ НИТРОФУРАЛА В ВОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИАФРАГМЕННОГО РАЗРЯДА

И.Н. Субботкина^{1,*}, И.К. Наумова¹, А.Р. Лебедева¹,
А.А. Шилиманова¹, К.В. Наумова²

¹*Ивановский государственный университет
153025, Иваново, ул. Ермака, 39*

²*РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина
119991, Москва, Ленинский проспект, 65, корп. 1
irinauma@mail.ru

Исследован процесс плазмохимической деструкции нитрофурала в воде при обработке 7×10^{-3} М раствора подводным импульсным разрядом (диафрагменным). Установлены кинетические зависимости эффективности разрушения нитрофурала от кислотности среды; определены эффективные константы скорости, энергетические выходы и времена полураспада нитрофурала в воде. Показано, что максимальная скорость деструкции наблюдается при значениях рН 2–4.

Ключевые слова: плазма, подводный разряд, деструкция, нитрофурал

Введение

Очистка сточных и природных вод от загрязняющих их веществ (поллютантов) является одной из ведущих задач современной экологии. Особо актуальной проблемой является устойчивость некоторых лекарственных и антимикробных препаратов к биологическому разрушению в условиях использования стандартных очистных сооружений, что связано не только с их прямой токсичностью, но и с селекцией устойчивой микрофлоры. Так, для нитрофуранов, сульфаниламидов, макролидов и фторхи-

нолонов показана необходимость применения более жестких схем очистки по сравнению с обычной биологической стадией. В последние десятилетия для очистки и обеззараживания воды используют газоразрядную обработку [1-2]. В работе [3] исследована кинетика деструкции нитрофурала под действием диэлектрического барьерного разряда. Нитрофурал (семикарбазон 5-нитро-2-фурфурола), широко известный под тривиальным названием фурацилин, представляет интерес как модельный фармацевтический загрязнитель, сочетающий высокую антимикробную активность, низкую биодоступность, наличие окраски и выраженную устойчивость к неполному разрушению. Молекула нитрофурала содержит нитрогруппу, фурановый цикл, азометиновый фрагмент и амидную часть. Такое сочетание делает соединение одновременно реакционноспособным по отношению к сильным окислителям и достаточно устойчивым в условиях обычной водоочистки. В нашей работе для плазмохимического разложения нитрофурала использовали диафрагменный разряд, эффективность действия которого на растворы различных красителей была показана в работе [4].

Экспериментальная часть и результаты

Импульсный низковольтный подводный разряд переменного тока ($I=40-45\text{mA}$, $U=1\text{kV}$) возникал в объеме раствора в парогазовых пузырьках небольшого отверстия (диафрагмы) диаметром 2 мм в диэлектрической перегородке, разделяющей графитовые электроды (рис. 1).

Исходная концентрация водного раствора нитрофурала составила 7×10^{-3} М. Для создания электропроводности среды, достаточной для зажигания разряда, использовали электролиты HCl, NaOH, NaCl. Объем плазмохимической ячейки составлял 200 мл. Кинетика деструкции нитрофурала исследовалась в диапазоне времени горения разряда 0-60 мин, концентрация препа-

рата в растворе определялась спектрофотометрически (UV7СГИ-И-02 ГПВАМ ДКК) в диапазоне длин волн 190-600 нм по максимуму полосы поглощения 375 нм.



Рис. 1. Фотография ячейки для обработки раствора нитрофураля диафрагменным разрядом

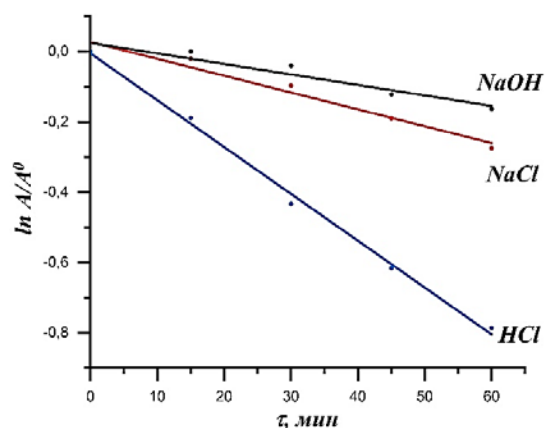


Рис. 2. Кинетические зависимости деструкции нитрофураля в различных средах

Анализ электронных спектров поглощения (ЭСП) растворов нитрофураля в присутствии различных электролитов показал, что скорость его деструкции под действием диафрагменного разряда зависит от кислотности среды, при этом эффективность деструкции возрастает с уменьшением рН и наиболее ярко проявляется в кислой среде (рН < 4), где доминируют короткоживущие гидроксильные радикалы ($\bullet\text{OH}$) [5], обладающие в протонированной форме максимальным окислительным потенциалом и проявляющие высокую селективность по отношению к ароматическим соединениям. Процесс деструкции подчиняется кинетическому уравнению 1 порядка (рис.2). Эффективные константы скорости (k), периоды полураспада ($\tau_{1/2}$) и энергетические выходы (G) процесса деструкции в присутствии добавок различных электролитов представлены в таблице.

Таблица. Кинетические характеристики процесса деструкции нитрофурала

Электролит	$k \times 10^3, (\text{с}^{-1})$	$\tau_{1/2}$ (мин)	G, молекул/100эВ
NaOH	$2,99 \pm 0,52$	231,82	0,0202
NaCl	$4,79 \pm 0,53$	144,71	0,0295
HCl	$13,32 \pm 0,47$	52,04	0,0665

Анализ ЭСП (рис.3) позволил предположить механизм деструкции нитрофурала под действием диафрагменного разряда. В плазменно-растворных системах, где главным действующим агентом выступает гидроксильный радикал, преобладает неселективное разрушение нескольких уязвимых центров одновременно: 1) атака по сопряженной системе с разрывом связи $\text{C}=\text{N}$, приводящая к распаду исходного хромофора; 2) окисление фуранового кольца с образованием простых кислородсодержащих фрагментов; 3) трансформация нитрогруппы с образованием восстановленных или перегруппированных производных.

В ходе работы обнаружен постэффект газоразрядной плазмы – через 48 часов после выключения разряда процесс деструкции продолжался, о чем свидетельствует спектр 6 на рис.3.

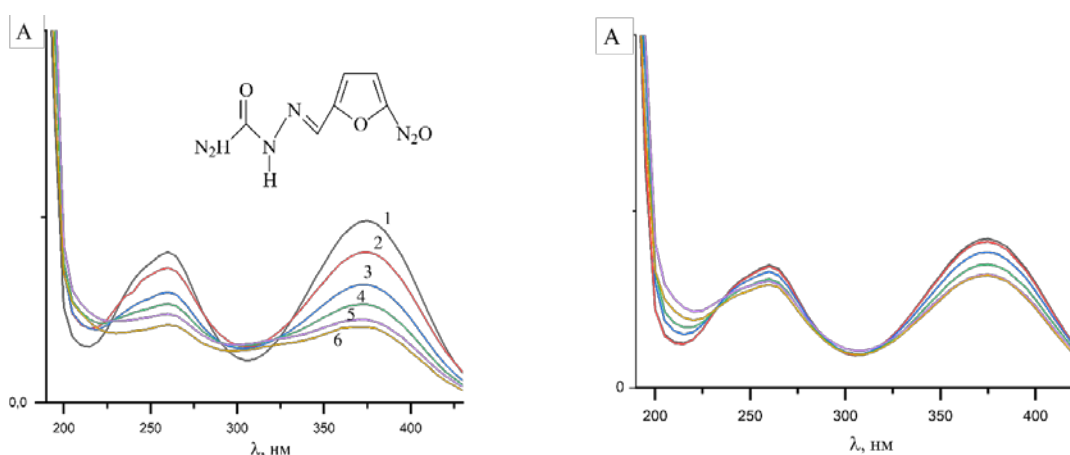


Рис. 3. Электронные спектры поглощения раствора нитрофураля в присутствии HCl (слева) и NaCl (справа) под действием диэлектрического разряда (1 – исходный, 2-5 – через каждые 15 минут, 6 – постэффект через 48 часов)

Качественный анализ показал отсутствие кето-, amino-, карбоксильных, гидроксильных и ароматических групп в продуктах деструкции, что свидетельствует о разрушении фуранового кольца, семикарбазидной группировки и азометиновой связи. Обнаружено присутствие нитро- и карбонильной (альдегидной) групп.

Литература

1. Vanraes, P. Electrical discharge in water treatment technology for micropollutant decomposition / A. Y. Nikiforov, C. Leys // In: Plasma Science and Technology: Progress in Physical States and Chemical Reactions. London: InTech; 2016. P. 457–506.
2. Rezaei, F. Applications of plasma-liquid systems: a review / P. Vanraes, A. Nikiforov, R. Morent, N. De Geyter // Materials. 2019. Vol. 12, No. 17. Article 2751. DOI: 10.3390/ma12172751.
3. Izvekova, A. A. Plasma-chemical destruction of nitrofurazone (furacilin) in aqueous solutions under the influence of a dielectric

barrier discharge in oxygen / E. Yu. Kvitkova, O. V. Lefedova, et al // High Energy Chemistry. 2026. Vol. 59, Suppl. 3. P. S259–S262.

4. Субботкина И.Н. Деструкция органических красителей различных классов в водных растворах под действием диафрагменного, торцевого разрядов и озона /Дисс. ... канд. хим. наук: 02.00.04. Иваново, 2013.
5. Титов В.А., Хлюстова А.В., Наумова И.К., Сироткин Н.А., Агафонов А.В. Скорость образования и энергетический выход гидроксил-радикалов в воде при действии газоразрядной плазмы. Прикладная физика. 2019. № 4. - С. 35-40.

NITROFURAL DESTRUCTION IN WATER BY DIAPHRAGM GAS DISCHARGE

I.N. Subbotkina^{1,*}, I.K. Naumova¹, A.R. Lebedeva¹, A.A. Shilmanova¹, K.V. Naumova²

¹*Ivanovo State University*

153025, Ivanovo, Ermaka St., 39

²*National University of Oil and Gas «Gubkin University»*

119991, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, Bldg. 1

**irinauma@mail.ru*

The plasma-chemical degradation of nitrofural in water was studied by treating a 7×10^{-3} M solution with an underwater pulsed discharge (diaphragm). The kinetic dependences of nitrofural degradation efficiency on the acidity of the medium were determined; the effective rate constants, energy yields, and half-lives of nitrofural in water were determined. The maximum degradation rate was observed at pH values of 2–4.

Keywords: plasma, underwater discharge, degradation, nitrofural

АВТОКОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В МИКРОРАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АРГОНЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Г.Х. Тазмеев*, Х.К. Тазмеев

*¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт
423812, Набережные Челны, проспект Мира, д. 68/19
tazmeeh@mail.ru

Экспериментально исследован электрический разряд постоянного тока в аргоне при атмосферном давлении в диапазоне токов 5-200 мА. Обнаружены колебания напряжения в диапазоне частот 0,5-2 МГц. Амплитуда колебаний достигает до 25 процентов от номинального значения напряжения. Характерным является то, что при этом разрядный ток практически не меняется.

Ключевые слова: электрический разряд, микроразряд, газоразрядная плазма, колебания напряжения, аргонная плазма.

Введение

Микроразряды постоянного тока при атмосферном давлении могут быть получены с помощью сравнительно простых технических средств. Поэтому они привлекательны для использования на практике. В работах [1-2] микроразряды постоянного тока в аргоне использованы для генерации плазменных потоков, содержащих наноразмерные металлические частицы. Получены наночастицы легкоплавких металлов. Немалый интерес вызывают микроразряды постоянного тока с точки зрения фундаментальных исследований неравновесной плазмы атмосферного давления [3-4]. Однако в настоящее время экспериментальных данных о микроразрядах явно недостаточно.

В данной работе исследование проведено в слабом потоке аргона при небольших токах.

Эксперимент

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Разряд зажигается внутри стеклянной трубки 1 между электродами 2 и 3. Через трубку продувается аргон с небольшим расходом в пределах 0,5-1 л/мин. Напряжение в разрядном промежутке U измеряется стрелочным прибором М2016 класса точности 0,2. Для увеличения предела измерения прибор снабжен добавочным сопротивлением $R_{доб}$. Одновременно напряжение U регистрируется осциллографом 4 марки АКИП-4115/1. Для этого используется делитель напряжения с резисторами R_1 и R_2 . Ток разряда I измеряется стрелочным прибором М2015 класса точности 0,2. С помощью шунта $R_{ш}$ осуществляется регистрация тока осциллографом. Сопротивление шунта равно 10 Ом.

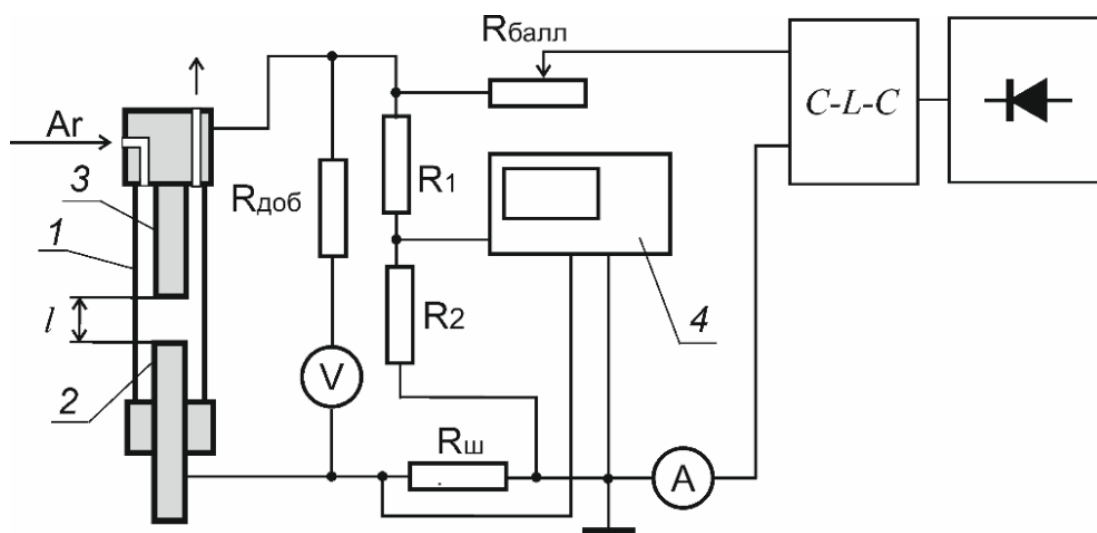


Рис. 1. Экспериментальная установка

Электроды 2 и 3 были изготовлены из меди и вольфрама. Разряд между ними зажигался путем их сближения друг к другу.

Для фотографирования использован фотоаппарат Canon Pw-

erShot-S70. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации напряжения сглаживались П-образным емкостно-индуктивным фильтром.

3. Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения и тока, зарегистрированные с разной разверткой сигнала.

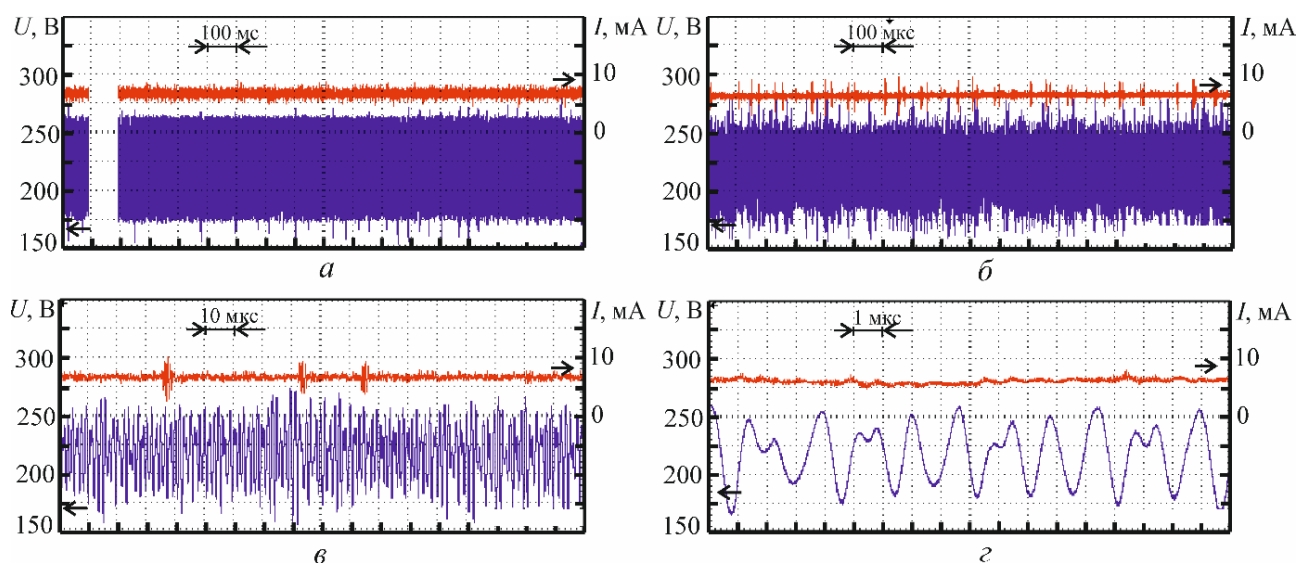


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока. Электроды – вольфрамовые стержни, катод с диаметром 2 мм, анод – 5 мм. Межэлектродное расстояние $l = 1$ мм.

При коэффициенте развертки 100 м/дел (рис. 2а) осциллограмма напряжения представляет собой сплошную полосу. Далее, по мере уменьшения коэффициента развертки границы полосы приобретают неровные очертания (рис. 2б и 2в), и при коэффициенте развертки 1 мкс/дел осциллограмма напряжения вырисовывается в линию (рис. 2г). Как видно, напряжение колеблется. Колебания несинусоидальные. Напряжение колеблется примерно от 160 до 260 В. При этом стрелочный прибор показывает 210 В. Таким образом, амплитуда колебаний достигает 23 % от номинального значения напряжения. При этом надо обратить внимание на осциллограмму тока. Ток практически не меняется. Такая же кар-

тина наблюдается и при повышенных токах (рис. 3).

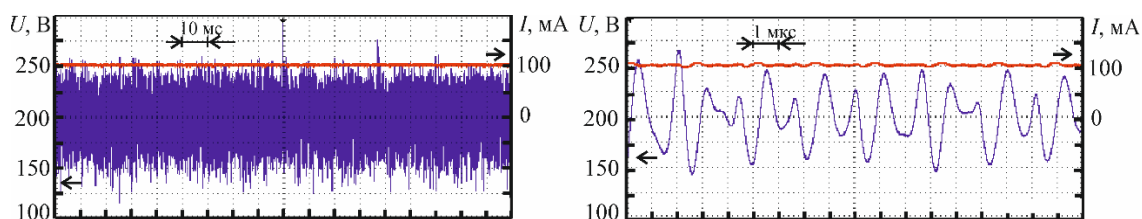
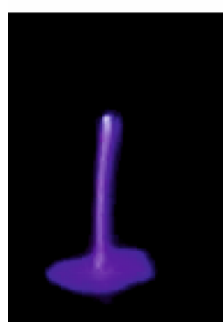
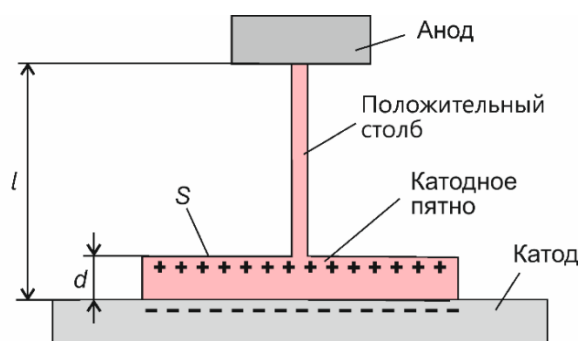


Рис. 3. Осциллограммы. Электроды – вольфрамовые стержни, катод с диаметром 2 мм, анод – 5 мм. Межэлектродное расстояние $l = 1$ мм.

Картина является аналогичной в следующих случаях: 1) при замене электродов на другие (медные и вольфрамовые с разными диаметрами); 2) при смене полярности электродов; 3) при увеличении межэлектродного расстояния; 4) при отключении емкостно-индуктивного фильтра; 5) при зажигании разряда внутри трубок с различными диаметрами; 6) при прекращении подачи аргона в трубку.



а



б

Рис. 4. Фото разряда (а) и его модель (б). Экспозиция 1/2000. Катод внизу, анод наверху. Катод – медный цилиндр с диаметром 25 мм, анод – вольфрамовый стержень с диаметром 5 мм (торец заточен под конус и закруглен). $l = 3$ мм. $I = 190$ мА.

На рис. 4а приведено фото разряда. Видно, что он имеет очень узкий разрядный канал и сравнительно большое катодное пятно. Исходя из этого предложена модель разряда (рис. 4б). За основу модели принято, что катодное пятно и прилегающий участок поверхности катода можно рассматривать как разноименно

заряженные плоскости (подобно плоскому конденсатору, у которого площадь обкладок S и расстояние между обкладками d). Колебания напряжения можно рассматривать как процессы зарядки и разрядки этого предполагаемого конденсатора. В моменты падения напряжения U конденсатор заряжается. Заряд накапливается на конденсаторе. При этом ток, текущий в цепи не меняется. В моменты увеличения U конденсатор разряжается. Накопленный заряд расходуется, оставляя ток неизменным.

Литература

1. Savkin K.P. et al. Generation of micron and submicron particles in atmospheric pressure discharge in argon flow with magnesium, zinc, and boron carbide electrodes // Surface and Coatings Technology. 2020. Т. 389. С. 125578.
2. Savkin K.P. et al. Glow discharge at atmospheric pressure; radiation, thermal erosion, nanoparticles // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Т. 88. № S4. С. S553-S559.
3. Сайфутдинов А.И., Тимеркаев Б.А., Сайфутдинова А.А. Особенности переходных процессов в микроразрядах постоянного тока в молекулярных газах: от тлеющего разряда в дугу в несвободном или свободном режимом катода // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 112. № 7-8 (10). С. 443-450.
4. Saifutdinova A.A., Purin V.A., Saifutdinov A.I. Influence of water vapor impurities on the characteristics of an atmospheric-pressure glow discharge in argon // High Energy Chemistry. 2025. Т. 59. № 6. С. 642-659.

SELF-OSCILLATIONS OF VOLTAGE IN A DIRECT CURRENT MICRODISCHARGE IN ARGON AT ATMOSPHERIC PRESSURE

G. K. Tazmeev*, K. K. Tazmeev

Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute

423812, Naberezhnye Chelny, Mira Avenue, 68/19

*e-mail: tazmeevh@mail.ru

A direct current electric discharge in argon at atmospheric pressure was experimentally studied in the current range of 5-200 mA. Voltage fluctuations were detected in the frequency range of 0.5-2 MHz. The amplitude of the fluctuations reached up to 30 percent of the nominal voltage. Characteristically, the discharge current remained virtually unchanged.

Key words: electric discharge, microdischarge, gas discharge plasma, voltage fluctuations, argon plasma.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ С ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В ПАРАХ РТУТИ НА КСВ

Д. С. Тарасов^{1,*}, В. С. Желтухин², А. Ю. Савин¹, А. Ю.
Шемахин¹, Г. Б. Киселёв¹

¹Казанский федеральный университет

420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18

²Казанский национальный исследовательский технологический
университет

420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68

*daniltarasov2000@gmail.com

Исследовано влияние геометрии кольцевого устройства ввода ВЧ-сигнала на коэффициент стоячей волны (КСВ) рамочной плазменной антенны с тлеющим разрядом пониженного давления в насыщенных парах ртути. Проведено параметрическое исследование девяти конфигураций: три диаметра кольца (1, 2, 3 см) при трёх расстояниях до трубки (5, 10, 15 см). Оптимальная конфигурация — диаметр 2 см, расстояние 5 см — обеспечивает минимум КСВ 1,077 на резонансной частоте 103,5 МГц, что соответствует электронной плотности $2,66 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. Результаты верифицированы методом графика Больцмана ($T_e = 0,915 \text{ эВ}$) и двумерной гидродинамической моделью разряда в COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: плазменная антенна, тлеющий разряд, коэффициент стоячей волны, резонанс поверхностных волн, электронная плотность, эмиссионная спектроскопия, численное моделирование.

Введение

Электронная плотность является ключевым параметром плазмы, определяющим резонансные свойства плазменных

антенн и эффективность люминесцентных источников света [1, 2]. Существующие методы её измерения — зонд Ленгмюра, микроволновая интерферометрия, лазерное томпсоновское рассеяние — имеют существенные ограничения: инвазивность или высокая стоимость оборудования [3]. Метод, основанный на измерении КСВ рамочной антенны, индуктивно связанной с плазменным столбом, лишён этих недостатков: он неинвазивен и требует лишь простого антенного анализатора [4, 5]. В предыдущей работе авторов [6] метод был реализован для тлеющего разряда в парах ртути с петлевой антенной произвольной формы, однако геометрическая неопределённость петли ограничила воспроизводимость: погрешность резонансной частоты составляла ± 8 МГц, погрешность плотности — около 12 %. Настоящая работа устраняет эти ограничения за счёт применения жёсткой рамочной конструкции и проведения систематического параметрического исследования девяти конфигураций устройства ввода.

Теоретическая основа метода

Физический механизм метода основан на резонансе поверхностных электромагнитных волн на цилиндрической границе плазма–стекло. Диэлектрическая проницаемость плазмы описывается выражением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_{\text{res}}(\omega_{\text{res}} - j\nu_c)} \quad (1)$$

где ω_p - плазменная частота, ω_{res} - резонансная угловая частота, ν_c - частота столкновений.

При выполнении условия $\varepsilon = -1$ на поверхности цилиндрического плазменного столба возникает резонанс поверхностных волн [7, 8]:

$$\omega_{\text{res}} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Фактор $\sqrt{2}$ обусловлен цилиндрической симметрией задачи. Из условия (2) получается рабочая формула метода:

$$n_e = \frac{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e f_{\text{res}}^2}{e^2} \quad (3)$$

где f_{res} — частота первого минимума КСВ, e — заряд электрона, m_e — масса электрона, ε_0 — электрическая постоянная.

Экспериментальная установка

Объектом исследования служила бактерицидная лампа низкого давления на парах ртути (60 Па, мощность 10 Вт, длина разряда 36 см, диаметр трубки 24 мм). Устройством ввода ВЧ-сигнала являлось медное кольцо из провода диаметром 1 мм, индуктивно связанное с плазменным столбом. Несущий каркас размером 1×1 м изготовлен из диэлектрических полипропиленовых труб диаметром 20 мм; трубка фиксируется в патронах G13 с точностью $\pm 0,5$ мм, что исключает паразитные металлические резонансы. По сравнению с гибкой петлей, применявшейся в [6], погрешность резонансной частоты снижена с ± 8 МГц до ± 1 МГц, погрешность определения электронной плотности — с ~ 12 % до $\sim 1,5$ %. Измерения КСВ проводились анализатором SARK-110 в диапазоне 0,1–200 МГц. Параметрически варьировались: диаметр кольца $d_1 \in \{1; 2; 3\}$ см и расстояние $d_2 \in \{5; 10; 15\}$ см от оси кольца до оси трубки — итого девять конфигураций.

Для верификации зарегистрирован эмиссионный спектр разряда в диапазоне 200–1100 нм (спектрометр Avantes AvaSpec-ULS2048, разрешение 0,6 нм). Электронная температура T_e определена методом графика Больцмана по пяти линиям ртути: 253,65; 365,48; 404,66; 435,83; 546,07 нм, константы из базы NIST [9].

Результаты и обсуждение

Все девять кривых КСВ(f) обнаруживают характерный минимум в диапазоне 59–138 МГц, соответствующий поверхностному плазменному резонансу. Основные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Первый минимум КСВ для всех девяти конфигураций ($P = 10$ Вт)

№	d_1 / d_2 , см	f_{res} , МГц	КСВ _{мин}	$n_e, \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$
1	1 / 5	59,1	2,08	1,90
2	1 / 10	70,6	2,68	2,72
3	1 / 15	94,6	2,20	4,89
4	2 / 5	103,5	1,077 ★	2,66
5	2 / 10	100,1	1,61	2,49
6	2 / 15	97,2	1,56	2,35
7	3 / 5	75,1	1,179	0,97
8	3 / 10	69,7	1,31	4,37
9	3 / 15	68,0	1,56	4,20

★ — оптимальная конфигурация ($d_1 = 2$ см, $d_2 = 5$ см).

Оптимальной по совокупности параметров является конфигурация $d_1 = 2$ см, $d_2 = 5$ см: КСВ_{мин} = 1,077 при $f_{res} = 103,5$ МГц, $n_e = 2,66 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$. При увеличении расстояния d_2 минимум КСВ размывается — эффективность индуктивной связи с плазмой снижается. Широкое кольцо ($d_1 = 3$ см) усредняет ВЧ-поле по объёму плазмы, включая периферийные области с пониженной

плотностью, что ухудшает чёткость резонанса. Наблюдаемые закономерности интерпретируются через теорию слоя пространственного заряда (СПЗ): толщина СПЗ

$$\delta = \frac{eE_a}{m_e \omega^2} \quad (4)$$

[10] определяет глубину проникновения ВЧ-поля; узкое кольцо локализует поле в области СПЗ наиболее эффективно.

Электронная температура, определённая методом графика Больцмана, составила $T_e = 0,915$ эВ при $P = 10$ Вт и монотонно снижается до $0,731$ эВ при $P = 4$ Вт. Двумерная осесимметричная гидродинамическая модель разряда в COMSOL Multiphysics (модуль Plasma, пять элементарных реакций, база LXcat/SIGLO для Hg) воспроизводит зависимости $n_e(P)$ и $T_e(P)$; расхождение по T_e с экспериментом не превышает 19 %. Расхождение КСВ-метода и COMSOL по n_e достигает двух раз, что объясняется взаимодействием узкого кольца преимущественно с тонким поверхностным слоем плазмы, тогда как модель даёт усреднённое значение по сечению трубки.

Литература

1. Rayner J.P. et al. Plasma sources as radio frequency antennas // Plasma Sources Sci. Technol. 2004. Vol. 13. P. 479–488.
2. Anderson T. Plasma Antennas. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2021. 390 p.
3. Hutchinson I.H. Principles of Plasma Diagnostics. Cambridge University Press, 2002. 440 p.
4. Dine S. et al. A new technique for plasma electron density measurement using surface wave beating // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 777–786.
5. Haas F.A. et al. Hairpin and impedance probe measurements in a plasma // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. Vol. 14. P. 766–775.
6. Желтухин В.С. и др. Измерение электронной плотности тлеющего разряда в парах ртути методом КСВ // Вестник КФУ. 2024.
7. Tonks L. The high frequency behavior of a plasma // Physical Review. 1931. Vol. 37. P. 1458–1483.

8. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2005. 757 p.
9. NIST Atomic Spectra Database. National Institute of Standards and Technology. URL: <https://physics.nist.gov/asd>.
10. Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1991. 449 p.

EFFECT OF PLASMA ANTENNA GEOMETRY WITH MERCURY VAPOR GLOW DISCHARGE ON VSWR

**D. S. Tarasov¹, V. S. Zheltukhin², A. Yu. Savin¹, A. Yu. Shemakhin¹,
G. B. Kiselyov¹**

¹*Kazan Federal University
420008, Kazan, Kremlevskaya str., 18, Russia*

²*Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia)
420015, Kazan, Karl Marx str., 68 Russia*

* daniltarasov2000@gmail.com

Abstract. The influence of the ring-type RF coupling device geometry on the voltage standing wave ratio (VSWR) of a frame plasma antenna with a low-pressure mercury vapor glow discharge was investigated. A parametric study of nine configurations was conducted: three ring diameters (1, 2, 3 cm) at three distances to the tube (5, 10, 15 cm). The optimal configuration — ring diameter 2 cm, distance 5 cm — yields a minimum VSWR of 1.077 at resonant frequency 103.5 MHz, corresponding to electron density $2.66 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$. Results were verified by the Boltzmann plot method ($T_e = 0.915 \text{ eV}$) and a 2D hydrodynamic COMSOL Multiphysics plasma model.

Key words: plasma antenna, glow discharge, voltage standing wave ratio, surface wave resonance, electron density, emission spectroscopy, numerical simulation.

ДЕПОЛИМЕРИЗАЦИЯ ХИТОЗАНА В ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА

**В.А. Титов^{1,2*}, А.М. Давыдов¹, В.В. Гудкова¹, К.В. Артемьев¹,
И.К. Наумова^{1,3}, Н.Г. Гусейн-заде¹**

¹ *Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38*

² *Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, 153045 Россия, Иваново, ул. Академическая, 1*

³ *Ивановский государственный университет, 153025 Россия, Иваново, ул. Ермака, 39*

**titov25@gmail.com*

Впервые при обработке водных суспензий хитозана импульсным микроволновым разрядом в потоке воздуха без использования дополнительных реактивов получены водорастворимые продукты деполимеризации с суммарным выходом до 90%. Продукты охарактеризованы с использованием методов электронной и колебательной спектроскопии, рентгеновской дифракции, найдены их вискозиметрические молекулярные массы. На примере гороха показано, что полученные продукты стимулируют всхожесть семян и ускоряют раннее развитие растений.

Ключевые слова: микроволновый разряд, хитозан, деполимеризация, биоактивность.

Введение

Взаимодействие неравновесной плазмы с жидкостями представляет интерес для реализации плазмохимических процессов, среди которых – получение водорода и синтез-газа, формирование наноструктур, деструкция или синтез органических соединений, фиксация атмосферного азота и получение жидких удобрений.

ний, модифицирование полимеров [1]. Одно из приложений – модифицирование хитозана – биополимера с антимикробными, ранозаживляющими, фитостимулирующими и другими полезными свойствами. Высокомолекулярный хитозан практически не растворим в воде из-за жесткой структуры, высокой степени кристалличности и межмолекулярных водородных связей в макромолекулах, что ограничивает его применение. Однако при молекулярной массе $M \leq (10 - 25)$ кДа хитозан обладает растворимостью и проявляет выраженную биоактивность, поэтому регулирование молекулярной массы открывает новые перспективы эффективного использования хитозана, в частности, в биомедицине и сельском хозяйстве.

В данной работе представлены результаты деполимеризации хитозана с использованием СВЧ разряда атмосферного давления в потоке воздуха, а также испытаний полученных растворимых в воде продуктов в качестве стимуляторов всхожести и раннего развития растений гороха.

Экспериментальная часть

Схема газоразрядной обработки суспензии показана на рис. 1. Использовали экспериментальную установку, описанную в [2]. Для возбуждения разряда (4) использовали бытовой магнетрон (частота 2.46 ГГц) с высоковольтным генератором прямоугольных импульсов для питания магнетрона. В экспериментах использовался режим $t_{\text{и}} = 50$ мкс при частоте следования импульсов $f = 200$ Гц. Расчетная импульсная микроволновая мощность $P_{\text{иСВЧ}} = 2,8$ кВт. Коаксиальный волновод с укороченным центральным электродом (1) одновременно служил газопроводом. Внешний электрод (2) – сетка с ячейками 1×1 мм². Продолжением внутреннего электрода служила медицинская игла (диаметр ~ 1 мм), на которую надевался кварцевый капилляр (3) с внутренним диаметром 1.2 – 1.5 мм. Расстояние от торца кварцевого капилляра

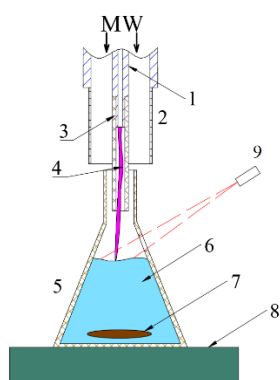
до поверхности жидкости в разных экспериментах составляло от 1 до 1,5 мм. В колбе (5) объемом 50 мл в каждом эксперименте обрабатывали 30 мл водной суспензии хитозана (6) с начальной концентрацией 0.5 или 1.0 мас.%, которую готовили на основе хитозана с молекулярной массой $M_w = 170$ кДа производства ООО Биопрогресс, используя деионизованную воду. С помощью магнитной мешалки (8) и магнитного якоря (7) производилось перемешивание в процессе обработки. После обработки плазмой нерастворимый хитозан отделяли путем центрифугирования с последующим высушиванием. По разнице масс исходной навески и высушенного нерастворимого хитозана после обработки находили массу водорастворимых фракций. Молекулярную массу продуктов деполимеризации определяли по характеристической вязкости их растворов с использованием уравнения Марка – Куна – Хаувинка.

Результаты и обсуждение

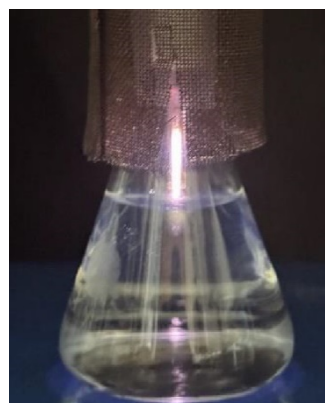
На рис. 2 показана зависимость массы водорастворимых продуктов деполимеризации от времени обработки суспензии разрядом. При времени обработки ~2 часа массовый выход растворимых продуктов достигает 90%. В электронных спектрах поглощения продуктов (рис. 3) со временем обработки растет оптическая плотность полосы при $\lambda = 285$ нм, которая отвечает переходам в группах C=O, появление которых связано с окислительной деструкцией макромолекул хитозана через разрывы β -(1,4)-гликозидных связей. В дифрактограммах продуктов (рис. 4) исчезает пик при $2\theta \sim 12$ град., уменьшается интенсивность и уширяется пик в области 20 град. Эти изменения обусловлены разрушением межмолекулярных водородных связей и снижением доли кристаллических областей в хитозане, что способствует его переходу в водорастворимую форму за счет более эффективной гидратации полимерных цепей. Средневязкостная молекулярная

масса водорастворимых фракций деполимеризации, полученных при действии разряда на суспензии с концентрацией 0.5 и 1 мас. %, составили после 2 часов обработки 2.6 ± 1.6 и 1.7 ± 0.9 кДа соответственно.

Биологическая активность полученных продуктов была показана при проращивании посевного гороха. Найдено, что водорастворимый хитозан увеличивает энергию прорастания семян до $48 \pm 2\%$ по сравнению с контролем ($40 \pm 2\%$), всхожесть до $82 \pm 2\%$ при $70 \pm 3\%$ в контрольной партии, длину проростков на седьмые сутки проращивания ($5,12 \pm 0,22$ см при $2,82 \pm 0,14$ см в контрольной партии). Полученные результаты близки к тем, что достигаются с коммерческим водорастворимым хитозаном с молекулярной массой 12 кДа.



(а)



(б)

Рис. 1. Схема обработки суспензии СВЧ разрядом (а) и фотография разряда (б).

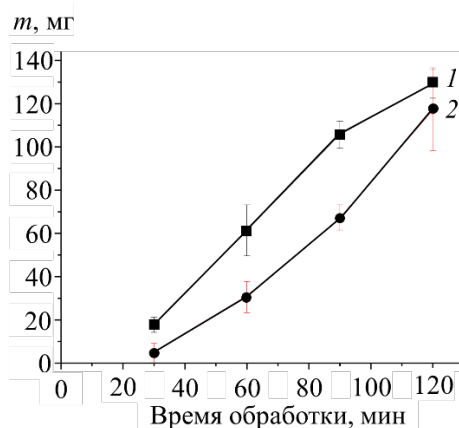


Рис. 2. Масса растворимых продуктов в зависимости от времени обработки при концентрации суспензии 0.5 (1) и 1 мас. % (2).

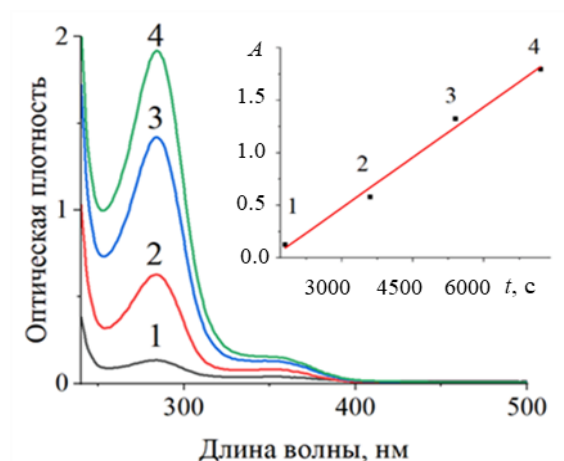


Рис. 3. Электронные спектры поглощения продуктов и зависимости оптической плотности ($\lambda = 285$ нм) от времени воздействия на 0.5% водную суспензию высокомолекулярного хитозана.

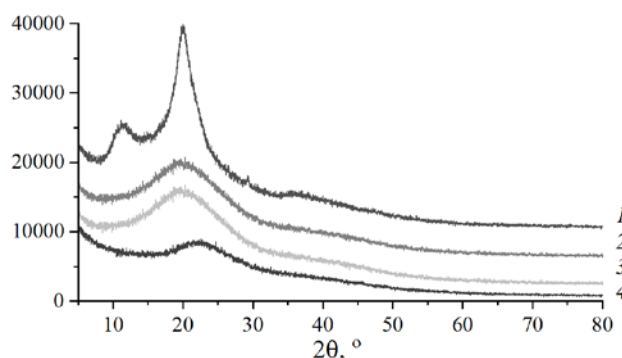


Рис. 4. Рентгенограммы исходного хитозана (1) и водорастворимых продуктов (2-4), полученных обработкой суспензий: 2 – $c=0.5\%$, $f=200$ Гц, $\tau=50$ мкс, $t=7200$ с, 3 – $c=1\%$, $f=200$ Гц, $\tau=50$ мкс, $t=7200$ с, 4 – 1%-ная суспензия, $f=100$ Гц, $\tau=100$ мкс, $t=7200$ с.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-19-00930).

Литература

1. Rezaei F., Vanraes P., Nikiforov A., Morent R., De Geyter N. // Materials. 2019. V. 12. P. 2751.
2. Davydov A.M., Gudkova V.V., Artemyev K.V., Titov V.A. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2026. V. 53. No 1. P. 49-55.

DEPOLYMERIZATION OF CHITOSAN IN AQUEOUS SUSPENSIONS UNDER THE ACTION OF A PULSED MICROWAVE DISCHARGE

V.A. Titov^{1,2*}, A.M. Davydov¹, V.V. Gudkova¹, K.V. Artemyev¹, I.K.
Naumova³, N.G. Gusein-zade¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
119991 Russia, Moscow, Vavilov St., 38*

²*G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy
of Sciences, 153045 Russia, Ivanovo, Akademicheskaja str St., 1*

³*Ivanovo State University, 153025 Russia, Ivanovo, Ermaka St., 39*

**titov25@gmail.com*

For the first time, water-soluble products with a total yield of up to 90% were obtained by treating aqueous chitosan suspensions with a pulsed microwave discharge in an air flow without the use of additional reagents. The influence of energy input, frequency, and duration of the discharge pulses on the yield of water-soluble products was studied. The products were characterized using electron and vibrational spectroscopy and X-ray diffraction, and their viscometric molecular weights were determined. Using peas as an example, it has been shown that the resulting products stimulate seed germination and accelerate early plant development.

Key words: microwave discharge, chitosan, depolymerization, bioactivity.

ИСТОЧНИКИ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

В.Н. Тихонов*, И.А. Иванов, А.В. Тихонов

*Курчатовский комплекс радиологии и агроэкологии,
249035, Калужская область, г. Обнинск, шоссе Киевское, д.1, к.1*

**v.n.tihonov@yandex.ru*

Уникальные возможности и разнообразные технологии применения атмосферной нетермальной плазмы (АНТ-плазмы) в медицине и биологии связаны с тем, что её температура при атмосферном давлении близка к комнатной и это обеспечивает возможность использования такой плазмы для обработки теплочувствительных материалов, включая полимеры и биологические ткани, в том числе *in vivo*. В данной работе представлена линейка микроволновых источников АНТ-плазмы, разработанных в Курчатовском комплексе Радиологии и Агроэкологии и предназначенных для генерации нескольких типов АНТ-плазмы при использовании в промышленности, биологии, медицине и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: микроволновые технологии, микроволновый разряд, плазма, нетермальная плазма, плазменная медицина.

Введение

Нетермальная плазма атмосферного давления (по-другому, атмосферная нетермальная плазма – АНТ-плазма) обладает температурой, близкой к комнатной за счет того, что большая часть подводимой энергии вкладывается в электронную составляющую плазмы, в то время как ионы и нейтральные компоненты плазмы остаются относительно холодными. Это открывает широкие перспективы для многочисленных медицинских, научных и промышленных применений АНТ-

плазмы. И в первую очередь, для модификации свойств различных поверхностей – химической активности, адгезии, пористости, смачиваемости, пластичности, снижения степени бактериальной обсемененности, и т.п., в том числе для обработки таких теплочувствительных материалов, как полимеры и биологические ткани *in vivo*. [1, 2].

Плазменная медицина [3, 4] является одним из новейших направлений современной прикладной плазмохимии. АНТ-плазма, помимо прочего, может инициировать, стимулировать и контролировать сложные биохимические процессы в живых системах, в частности, активировать регенерацию тканей в процессе заживления ран и трофических язв.

Целью данной работы является представление линейки микроволновых источников АНТ-плазмы, разработанных в Курчатовском комплексе Радиологии и Агроэкологии и предназначенных для генерации нескольких типов АНТ-плазмы для использования в биологии, медицине, промышленности и сельском хозяйстве. Основу представляемых аппаратурных комплексов составляют малобюджетные магнетронные СВЧ-генераторы диапазона 2.45 ГГц с высоковольтным источником питания на базе общедоступных компонентов бытовых микроволновых печей [5].

Аппаратурный комплекс «Пластер-СВЧ»

Универсальный аппаратурный комплекс «Пластер-СВЧ» [6] предназначен для генерации как «традиционной» низкотемпературной, так и одного или нескольких типов АНТ-плазмы (рис.1).

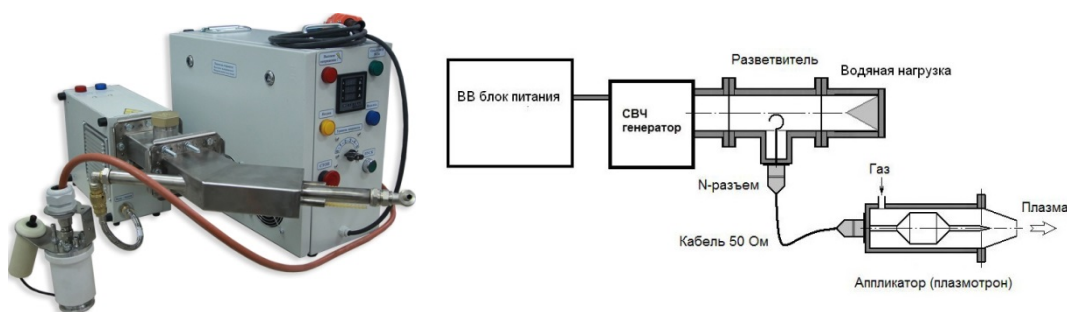


Рисунок 1. Общий вид и блок-схема аппаратного комплекса «Пластер-СВЧ»

Установка «Пластер-СВЧ» обеспечивает удобство осуществления различных медицинских процедур, а также проведение опытов в области биологии и медицины – за счет мобильности самого источника АНТ-плазмы (аппликатора), который питается от аппаратного комплекса с помощью гибкого коаксиального кабеля.



Рисунок 2. Аппликатор установки «Пластер-СВЧ» в работе

Однако мощность, вкладываемая в разряд и, соответственно, производительность установки ограничена пропускной способностью питающей кабельной сборки и слабым теплоотводом от электродов разрядника – до уровня порядка 50-150 Вт.

Источники АНТ-плазмы на основе волноводно-коаксиального перехода

Для обеспечения возможности проведения продолжительных работ при повышенных уровнях мощности, были разработаны стационарные источники АНТ-плазмы на базе волноводно-коаксиального перехода [7]. Основу разрядников составляет отрезок жесткой коаксиальной линии резонансной длины, который проходит сквозь волновод посередине его широкой стенки, перпендикулярно к ней (Рис. 3).



Рисунок 3. Волноводный тракт микроволнового источника АНТ-плазмы
и схема его конструкции.

Разрядный промежуток формируется непосредственно на торце открытого конца внутреннего проводника коаксиальной линии. Были изготовлены и испытаны наконечники с улучшенным теплоотводом из зоны разряда (четырёх-, шести-, восьми- и двенадцати-конечные – Рис. 4).



Рисунок 4. Варианты исполнения наконечников разрядника и соответствующие виды разрядов в них.

Подача рабочего газа в зону разряда может осуществляться либо непосредственно в зазор коаксиальной линии, либо по центральному проводнику, который в этом случае выполняется в виде полый трубки. Для уменьшения температуры исходящей газовой струи может быть предусмотрено принудительное охлаждение как внешнего, так и внутреннего наконечников СВЧ разрядника.

Источники АНТ-плазмы на основе безэлектродного поперечного микроволнового разряда

Описанные выше и известные нам по литературным данным микроволновые источники АНТ-плазмы основаны на использовании СВЧ разряда между металлическими электродами. Это обстоятельство существенно ограничивает допустимый уровень вкладываемой в разряд СВЧ мощности, поскольку может приводить к появлению продуктов эрозии электродов в плазме и дополнительному её нагреву за счет перегрева электродов.

Новый тип микроволнового источника АНТ-плазмы [8] обладает как характеристиками диэлектрического барьерного разряда, так и способностью формировать «чистую» плазменную струю, подобно классическому микроволновому плазмотрону (Рис. 5).

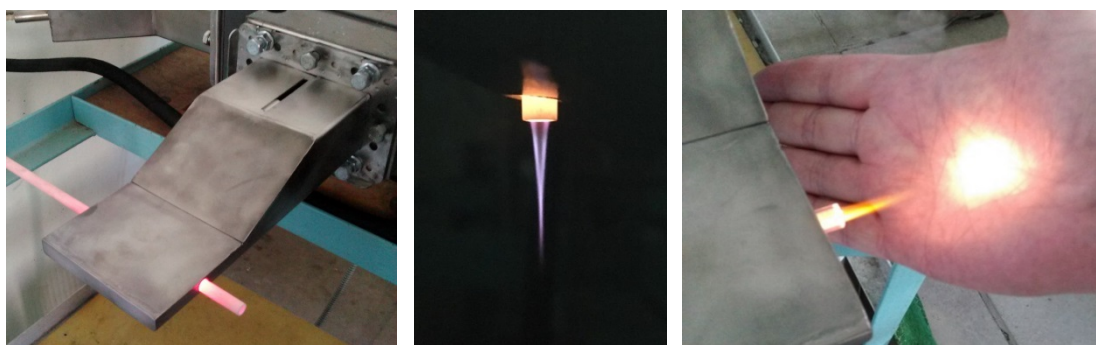


Рисунок 5. Новый тип микроволнового источника АНТ-плазмы

СВЧ-разряд возбуждается в диэлектрической трубке, проходящей поперек волновода перпендикулярно вектору напряжённости электрического поля, поток газа нигде не контактирует с металлическими элементами конструкции.

Заключение

Таким образом, Курчатовский комплекс Радиологии и Агроэкологии имеет возможность производить микроволновые источники нетермальной плазмы атмосферного давления различного типа, а также выполнять разработки таких источников под конкретные задачи, в том числе медицинского назначения.

Литература

1. Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J., Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications. (London, Academic Press, 2016).
2. Vijay Nehra, Ashok Kumar and H.K. Dwivedi, Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources // International Journal of Engineering (2008) Volume (2): Issue (1), pp. 53-68.
3. Алейник А.Н. Плазменная медицина: Учебное пособие, - Томск: ТПУ, 2011.
4. Plasma Medicine (on line) <https://www.begellhouse.com/journals/plasma-medicine.html>
5. Тихонов В.Н., Пугашкин Д.В., Четокин Я.А., Микроволновый генератор. Патент РФ №2480890 от 09.12.2011
6. Ivanov, I. A., Tikhonov V. N., Tikhonov A. V., Microwave complex for obtaining low-temperature plasma at atmospheric pressure. Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. Vol. 1393, No. 1, p. 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012042>
7. Тихонов В.Н., Тихонов А.В., Иванов И.А., Горбатов С.А., Плазменный источник. Патент РФ на полезную модель №207628 от 15.03.2021
8. V. N. Tikhonov, S. A. Gorbатов, I. A. Ivanov, A. V. Tikhonov, A new type of non-thermal atmospheric pressure plasma source based on a waveguide

SOURCES OF NON-THERMAL PLASMA FOR BIOLOGY AND MEDICINE

V.N. Tikhonov*, I.A. Ivanov, A.V. Tikhonov

*¹Kurchatov Complex of Radiology and Agroecology,
249035, Russia, Kaluga region, Obninsk, Kyiv highway, 1*

**e-mail: v.n.tihonov@yandex.ru*

The unique potential and diverse application of atmospheric non-thermal plasma (ANT plasma) in medicine and biology stems from its temperature at atmospheric pressure, which is close to room temperature. This allows for the use of such plasma for treating heat-sensitive materials, including polymers and biological tissues, including in vivo. The aim of this paper is to present a series of ANT plasma microwave sources developed at the Kurchatov Complex of Radiology and Agroecology and designed to generate several types of non-thermal plasma for use in industry, biology, medicine, and agriculture.

Key words: microwave, microwave plasma, non-thermal plasma, plasma technologies, plasma medicine.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМООБРАБОТАННОЙ КОРЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (PINUS SYLVESTRIS) В КАЧЕСТВЕ НЕФТЕСОРБЕНТА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.А. Хубатхузин¹, А.Р. Акберова¹, И.Г. Шайхиев¹,
В.К. Болдышева², М.Ф. Галиханов^{2,*}

¹*Казанский национальный исследовательский технологический универси-
тет*

420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

²*Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татар-
стан,*

420111, Россия, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36А

Исследовано использование плазмообработанной коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в качестве нефтесорбента для удаления пленок нефти с водной поверхности. Показано, что обработка коры сосны высокочастотной емкостной плазмой пониженного давления в среде метана способствует уменьшению водопоглощения и увеличению сорбционных характеристик по нефти.

Ключевые слова: Ключевые слова: кора сосны, высокочастотная плазма пониженного давления, модификация, нефть, водная поверхность.

Введение

Разливы нефти на водной и земной поверхности в результате техногенных аварий в настоящее время являются актуальной экологической проблемой. Для ликвидации разливов нефти и НП на водной поверхности используются различные методы – механические, физико-химические, термические и биологические [1].

Как показывает международный опыт, наиболее часто для удаления пленки углеводородов используется сорбционный метод, который основан на связывании нефти и НП поверхностью различных сорбционных материалов [2]. В настоящее время на практике используются более 200 коммерческих марок нефтесорбентов. Отрицательной чертой использования последних является не всегда высокая нефтеемкость, высокая стоимость и отсутствие в местах разливов углеводородов.

В этой связи, в настоящее время в мировом пространстве интенсивно в качестве нефтесорбентов исследуются различные отходы от переработки сельскохозяйственного сырья и древесины [3, 4]. Одним из многотоннажных отходов деревопереработки является кора деревьев, которая образуется на деревоперерабатывающих предприятиях в результате операции окорки древесины [5]. Одним из путей использования коры деревьев является ее применение в качестве нефтесорбента.

Экспериментальная часть

В настоящей работе для извлечения нефти с водной поверхности исследовался порошок коры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), некоторые свойства которой приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели измельченной коры сосны

Характеристика сорбента	Сосна коры
Насыпная плотность $\rho_{нас}$, г/см ³	0,20
Влажность W , %	9,00
Зольность Z , %	0,45
Плавучесть (72 ч.) P , %	83,5

Определялись значения максимальной нефтеемкости измельченной сосновой коры по отношению к нефтям девонского и карбонового отложений Тумутукского месторождения (Респуб-

лика Татарстан). Определено, что максимальное значение нефтемкости сосновой коры составило 7,38 г/г для нефти карбонового отложения и 5,53 г/г для нефти девонского отложения. Максимальное водопоглощение нативной коры сосны составляет более 3,5 г/г, что может негативно сказаться на извлечении пленок нефти с водной поверхности.

Для увеличения нефтесорбционных характеристик и снижения водопоглощения, измельченная кора сосны подвергалась воздействию высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазмы пониженного давления в среде метана и аргона (соотношение 30:70). Обработка ВЧЕ плазмой пониженного давления проводилась при следующих постоянных параметрах: давление в рабочей камере плазмотрона (P) – 26,6 Па, сила тока на аноде плазмотрона (I_a) – 0,5 А, расход плазмообразующего газа (Q) – 1500 см³/мин, время плазмообработки (t) – 10 минут, мощность приложенная к электродам (W) – 1,5 кВт.

Результаты и их обсуждение

Определено, что плазмообработка в вышеприведенных условиях способствует увеличению показателя максимальной нефтемкости по карбоновой нефти с 7,38 г/г до 12,73 г/г, по нефти девонского отложений – с 5,53 г/г до 10,98 г/г. При этом зафиксировано некоторое снижение максимального водопоглощения – до 3,29 г/г.

С целью подтверждения увеличения гидрофобных характеристик нефтесорбента и повышения олеофильности, проводились эксперименты по удалению пленок нефти с водной поверхности нативной и плазмообработанной корой *Pinus sylvestris*. Для этого к 50 см³ дистиллированной воды в чашке Петри приливалось по 3 см³ нефти того или иного вида, присыпалось и притапливалось по 1 г порошка коры сосны. Через 30 минут с помощью заранее погруженной латунной сеточки известной массы насыщенный нефтью и водой нефтесорбент извлекался, определялось количе-

ство поглощенной нефти и воды. Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Образец коры сосны	Суммарное значение нефте- и водопоглощения, г/г	Нефтепоглощение, г/г	Водопоглощение, г/г	Степень удаления нефти, %
Девонская нефть				
<i>Объем прилитой нефти - 3 см³ (2,53 г)</i>				
Нативный	2,53	2,31	0,40	91,30
После обработки плазмой	3,00	2,40	0,60	94,86
Карбоновая нефть				
<i>Объем прилитой нефти - 3 см³ (2,61 г)</i>				
Нативный	3,42	2,39	1,28	91,57
После обработки плазмой	4,25	2,47	1,78	94,76

Как следует из приведенных в таблице 2 данных, плазмообработка измельченной коры сосны способствует увеличению эффективности извлечения нефти с водной поверхности. Вопреки ожидаемому оказалось увеличение количества поглощенной плазмообработанными нефтесорбентами воды. По всей видимости, вода, ввиду своей малой массы и размеров, раньше заполняет поры коры сосны, а углеводороды нефти занимают внешнюю поверхность материала за счет процесса адгезии.

Литература

1. Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges / P. Keramea, K. Spanoudaki, G. Zodiatis et al. // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. No 2. Article 181. P. 1-38.
2. Sorption as a rapidly response for oil spill accidents: A material and mechanistic approach / L.M.T.M. Oliveira, J. Saleem, A. Bazargan et al. // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 407. Article 124842.

3. Olalekan A.A., Oluwatoyin A.O. Adsorption of crude oil spill from aqueous solution using agro-wastes as adsorbents // Journal of Scientific Research and Reports. 2021. Vol. 27. No 4. P. 27-52.

4. Ifelebuegu A.O., Johnson A. Nonconventional low-cost cellulose-and keratin-based biopolymeric sorbents for oil/water separation and spill cleanup: A review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 47. No 11. P. 964-1001.

5. Состояние и перспективы использования древесной коры / П. Золтан, Г.А. Горбачева, В.Г. Санаев и др. // Лесной вестник/Forestry bulletin. 2020. Т. 24. № 5. С. 74-88.

6. Кора деревьев - перспективный сорбционный материал для извлечения углеводов из водных сред (обзор мировой и отечественной литературы) / И.Г. Шайхиев, Д.Н. Хаматгалимова, Т.Р. Дебердеев, С.В. Свергузова // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 2. С. 10-20.

THE USE OF PLASMA-TREATED BARK OF THE COMMON PINE (PINUS SYLVESTRIS) AS AN OIL SORBENT FOR REMOVING OIL SPILLS FROM THE WATER SURFACE

**A.A. Khubatkhuzin¹, A.R. Akberov¹, I.G. Shaikhiev¹,
M.F. Galikhanov^{2,*}, V.K. Boldysheva²**

¹*Kazan National Research Technological University,
68 K. Marx str., Kazan, 420015, Russia*

²*Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36A Levo-Bulachnaya str., Kazan, 420111, Russia*

** mgalikhanov@yandex.ru*

The use of plasma-treated pine bark (*Pinus sylvestris*) as an oil sorbent for removing oil films from the water surface has been investigated. It is shown that the treatment of pine bark with a high-frequency capacitive plasma of reduced pressure in a methane environment helps to reduce water absorption and increase sorption characteristics for oil.

Key words: pine bark, low-pressure high-frequency plasma, modification, oil, water surface.

РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ЗАКАЛКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНВЕРСИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СВЧ РАЗРЯДАХ

Н.В. Чекмарев*, Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов,
Е.И. Преображенский

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им.
А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
chekmarev@ipfran.ru*

Исследовано разложение CO_2 в низкотемпературной плазме разрядов атмосферного давления, поддерживаемых СВЧ излучением магнетрона (частота 2.45 ГГц) и гиротрона (частота 24 ГГц). Показано, что эффективность разложения ограничивается обратными реакциями, усиливающимися при высоких температурах. Предложен метод быстрой закалки продуктов реакции потоком циркулирующей газовой смеси, обеспечивающий фиксацию состава без разбавления. Применение закалки позволило увеличить степень конверсии до 14.3% и энергоэффективность до 43.9% для 2.45 ГГц, а также более чем втрое повысить конверсию в разряде на 24 ГГц. Полученные результаты подтверждают перспективность метода для промышленной плазмохимической переработки CO_2 .

Ключевые слова: СВЧ плазма, диоксид углерода, разряд атмосферного давления, закалка

В работе исследован процесс разложения углекислого газа ($CO_2 \rightarrow CO + 0.5 O_2$) в низкотемпературной плазме СВЧ разрядов атмосферного давления, возбуждаемых различными источниками излучения: магнетроном с частотой 2.45 ГГц в установке типа СВЧ-аппликатора [1] и гиротроном с частотой 24 ГГц в специально разработанном волноводном плазмотроне [2]. Основной задачей является повышение степени конверсии CO_2 и энергоэф-

фективности процесса, ограниченных протеканием обратных реакций рекомбинации в постразрядной области.

Показано, что ключевыми факторами снижения эффективности являются повышенная температура газа и недостаточная скорость охлаждения, при которых усиливаются процессы V–T релаксации и обратные химические реакции, смещающие равновесие в сторону исходного CO_2 . Для диагностики состава газовой смеси использованы электрохимические и оптические методы, а также ИК-Фурье спектроскопия.

Исследованы зависимости степени конверсии CO_2 и энергоэффективности от мощности СВЧ разряда и расхода газа. Установлено, что для разряда на 2.45 ГГц увеличение мощности приводит к росту степени конверсии при одновременном снижении энергоэффективности, тогда как увеличение расхода газа оказывает противоположное влияние. Для разряда на 24 ГГц устойчивое горение достигается при меньших расходах газа, а максимальная степень конверсии реализуется вблизи минимальной мощности поддержания разряда, что связано с перегревом газовой смеси и усилением роли обратных реакций при увеличении мощности.

Для подавления обратных реакций предложен метод быстрой закалки продуктов реакции: в постразрядной области в основание плазменного факела через систему каналов подается поток холодного газа, обеспечивающий интенсивное смешение и быстрое охлаждение реакционной смеси [3]. В качестве закалочного газа использовалась циркулирующая смесь продуктов реакции (CO_2 , CO , O_2), отбираемая на выходе из реактора и возвращаемой в зону закалки [1,4]. Такой подход позволяет «заморозить» химический состав без разбавления сторонними газами, что существенно упрощает последующее разделение газов при промышленном применении данной технологии.

Показано, что применение закалки в установке на 2.45 ГГц увеличивает степень конверсии CO_2 с 8.5% до 14.3%, а энергоэффективность — с 29% до 43.9% (рост на ~68%). В волноводном плазмотроне на 24 ГГц закалка обеспечивает более чем трехкратное увеличение степени конверсии (с 6.45% до 23.4%), что обусловлено меньшей скоростью потока CO_2 и реализацией закалки вблизи зоны поддержания разряда.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения закалки для приближения параметров процесса к требованиям промышленной плазмохимической переработки CO_2 . Масштабирование технологии потенциально позволяет достичь производительности на уровне десятков тонн CO в год.

Дальнейшее повышение эффективности связано с оптимизацией электродинамики разряда, интенсификацией теплоотвода в зоне закалки и подавлением обратных реакций за счёт селективного удаления кислорода из реакционной смеси.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант номер 25-22-00796

Литература

1. Д.А. Мансфельд, А.В. Водопьянов, Н.В. Чекмарев, Е.И. Преображенский, Письма в Журнал Технической Физики 51 (2025) 55–58.
2. С.В. Синцов, А.В. Водопьянов, Н.В. Чекмарев, Д.А. Мансфельд, Е.И. Преображенский, В.В. Корчагин, Микроволновый Волноводный Плазмотрон Для Создания Разрядов При Атмосферном Давлении, 2024.
3. Н.В. Чекмарев, Д.А. Мансфельд, Е.И. Преображенский, С.В. Синцов, М.А. Ремез, А.В. Водопьянов, Письма в ЖТФ 49 (2023) 31–34.
4. N.V. Chekmarev, D.A. Mansfeld, A.V. Vodopyanov, S.V. Sintsov, E.I. Preobrazhensky, M.A. Remez, Journal of CO_2 Utilization 82 (2024) 102759.

RECIRCULATION QUENCHING METHOD FOR INCREASING CARBON DIOXIDE CONVERSION IN MICROWAVE DISCHARGES

N.V. Chekmarev^{1,*}, D.A. Mansfeld¹, A.V. Vodopyanov¹,
E.I. Preobrazhensky¹

*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of
the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)*

46 Ul'yanov Street, Nizhny Novgorod, 603951, Russia

** chekmarev@ipfran.ru*

The decomposition of CO_2 in low-temperature atmospheric-pressure discharge plasma supported by microwave radiation from a magnetron (2.45 GHz) and a gyrotron (24 GHz) was studied. It was shown that the decomposition efficiency is limited by reverse recombination reactions, which intensify at high temperatures. A method for rapid quenching of the reaction products with a flow of a circulating gas mixture is proposed, ensuring the fixation of reaction product concentrations without dilution. The use of quenching increased the conversion degree to 14.3% and the energy efficiency to 43.9% for 2.45 GHz, as well as more than tripled the conversion in a discharge at 24 GHz. The obtained results confirm the potential of this method for industrial plasma-chemical processing of CO_2 .

Key words: Microwave plasma, carbon dioxide, atmospheric pressure discharge, quenching

УДК 533.9; 541.124

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ДОМЕНОВ В ГРАФЕНЕ ПРИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ: МОРФОЛОГИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

М.Б. Шавелкина*, П.П. Иванов

*Объединённый институт высоких температур РАН
125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2
mshavelkina@gmail.com

Малослойные графеновые структуры с водородными доменами синтезированы плазмохимическим методом в четырёх режимах. СЭМ показал ромбовидные домены ($\sim 120^\circ$). Термодинамическое моделирование выявило концентрацию H_2 0,5–15 об.% при 2700–2500 К. Максимум для Ar/CH_4 (10–15%) коррелирует с наибольшей плотностью доменов.

Ключевые слова: плазменный синтез, графен, водородные домены, морфология, термодинамическое моделирование, интеркаляция.

Введение

Плазмохимические методы позволяют осуществлять одностадийный синтез функционализированных углеродных наноматериалов. Однако связь между параметрами плазмы, составом газовой фазы и морфологией получаемых структур остаётся недостаточно изученной. Цель работы — установить корреляцию между термодинамически рассчитанной концентрацией молекулярного водорода в плазменной струе и экспериментально наблюдаемой плотностью водородных доменов на поверхности графена.

Эксперимент и методы расчёта

Синтез проводили в реакторе с дуговым плазмотроном постоянного тока (мощность 22 кВт для Ar, 38 кВт для He) [1]. Использовали четыре комбинации плазмообразующего газа и прекурсора: (1) Ar/CH₄ , (2) He/CH₄ , (3) He/C₂ H₂ , (4) He/C₃ H₈ – CH₄ , при давлении 710 Торр. Морфологию образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Термодинамический состав плазменной струи моделировали методом минимизации функции Гиббса в квазиодномерном приближении с использованием базы данных ИВТАНТЕРМО [2]. Расчёты выполняли для температурного интервала 4500–2500 К.

Результаты и обсуждение

На СЭМ-изображениях всех четырёх образцов наблюдаются хлопьевидные структуры со вспученной поверхностью. Характерной особенностью является наличие ромбовидных доменов с углом ~120°, локализованных преимущественно на верхних слоях графеновых стопок. Такая геометрия соответствует газонаполненным пузырькам, предсказанным теоретически для графитоподобных поверхностей [3]. При этом плотность доменов существенно различается: максимальное количество зафиксировано для режима Ar/CH₄ , минимальное получено при пиролизе смеси He/C₂ H₂ .

Термодинамическое моделирование показало, что во всех режимах в интервале 2700–2500 К, соответствующем завершению роста графеновых слоёв, газовая фаза содержит молекулярный водород. Однако его концентрация зависит от состава исходной смеси (табл. 1).

Таблица 1. Расчётная концентрация молекулярного водорода в зоне конденсации углерода (2700–2500 K) для четырёх режимов синтеза

Режим	Плазмообразующий газ	Прекурсор	[H ₂], об.%, (2700–2500 K)	Относит. плотность доменов (СЭМ)
1	Ar	CH ₄	10–15	++++ (макс.)
2	He	C ₃ H ₈ – C ₄ H ₁₀	8–12	+++ (высокая)
3	He	CH ₄	1–2	+ (низкая)
4	He	C ₂ H ₂	0.5–0.8	+ (мин.)

Как видно из таблицы, режим с максимальной расчётной концентрацией H₂ (Ar/CH₄) экспериментально демонстрирует и наибольшее число водородных доменов. Пропан-бутановая смесь в гелиевой плазме даёт близкие значения (8–12 об.% H₂), что также соответствует высокой плотности доменов на СЭМ. Это подтверждает, что интеркаляция водорода в межслоевое пространство происходит непосредственно в процессе роста графеновых слоёв и определяется локальным парциальным давлением H₂ в плазменной струе. Различие в концентрации водорода между режимами обусловлено разной кинетикой диссоциации прекурсоров и теплофизическими свойствами плазмообразующих газов.

Заключение

Показано, что морфология графена, синтезированного одностадийным плазмохимическим методом, характеризуется наличием ромбовидных водородных доменов, плотность которых коррелирует с термодинамически рассчитанной концентрацией молекулярного водорода в зоне конденсации углерода. Максимальное

число доменов наблюдается в режиме Ar/CH₄ (10-15 об.% H₂), минимальное — в режиме He/C₂ H₂ (0.5-0.8 об.% H₂). Результаты подтверждают механизм интеркаляции водорода в процессе роста графеновых слоёв и открывают возможность управления плотностью доменов через выбор прекурсора и плазмообразующего газа.

Литература

1. Shavelkina M.B., Ivanov P.P., Bocharov A.N., Amirov R.Kh. Numerical and experimental study of the multichannel nature of the synthesis of carbon nanostructures in DC plasma jets. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2021. Vol. 41. P. 171–189.
2. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. Simulation of equilibrium states of thermodynamic systems using IVTANTHERMO for Windows. *High Temperature.* 2000. Vol. 38. P. 191–196.
3. Eren B., Hug D., Marot L., et al. Pure hydrogen low-temperature plasma exposure of HOPG and graphene: Graphane formation? *Beilstein J. Nanotechnol.* 2012. Vol. 3. P. 852–859.

FORMATION OF HYDROGEN DOMAINS IN GRAPHENE BY PLASMA-CHEMICAL SYNTHESIS: MORPHOLOGY AND THERMODYNAMIC ANALYSIS

M.B. Shavelkina,* P.P. Ivanov

¹ *Joint Institute for High Temperatures RAS
25412, Moscow, Izhorskaya st. 13 Bd.2, Russia
e-mail: mshavelkina@gmail.com*

Abstract. Few-layer graphene with hydrogen domains was synthesized by plasma-chemical method in four regimes. SEM revealed rhomboid domains (~120°). Thermodynamic modeling showed H₂ concentration of 0.5–15 vol.% at 2700–2500 K. Maximum for Ar/CH₄ (10-15%) correlates with highest domain density.

Keywords: plasma synthesis; graphene; hydrogen domains; morphology; thermodynamic modeling; intercalation.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИОНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ГАЗА В МАКЕТЕ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.О. Шуровский, Н.Н. Нагель, С.В. Коробцев, Е.Ю. Брагин,
В.Ю. Плаксин, С.А. Данько, С.С. Гусев, И.А. Костриченко,
Д.С. Кутузов

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

В работе представлены результаты применения разработанного метода определения степени ионизации плазмы с помощью оптической эмиссионной спектроскопии для макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя. Для верификации метода определения степени ионизации аргона проведено сравнение полученных результатов с коэффициентом использования рабочего тела, определенного с помощью зондовых диагностик. Получено соотношение коэффициента ионизации и коэффициента использования рабочего тела в рамках самосогласованной модели плазмы.

Ключевые слова: степень ионизации плазмы, безэлектродный плазменный ракетный двигатель, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Введение

Для решения задач создания плазменных ракетных двигателей с высокими характеристиками разрабатывается БПРД с использованием ВЧ методов создания плазмы. Основными его элементами являются источник низкотемпературной плазмы, где происходят ионизация рабочего вещества, магнитное сопло, в котором формируется создающий тягу направленный плазменный

поток [1]. В источнике требуется получить высокую степень ионизации, в дальнейшем сохраняющуюся до области магнитного сопла, контроль этого параметра является важной задачей диагностики.

Для экспериментального исследования плазменных процессов в безэлектродных двигателях в НИЦ «Курчатовский институт» создана установка ПН-3 [2]. Длина кварцевой трубы разрядной камеры плазмы составляет 0,8 м, внутренний диаметр 100 мм, мощность вводится в объём установки посредством полувинтовой антенны. Рабочим газом является аргон.

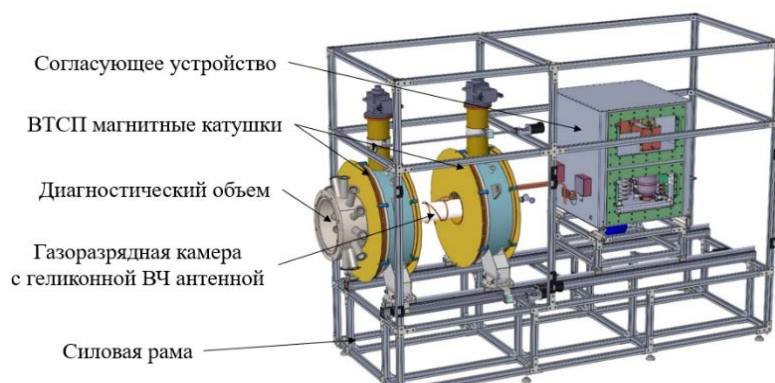


Рисунок 1 – схема установки ПН-3

Методика определения степени ионизации и коэффициента использования рабочего тела

В работе [1] была разработана модель нестационарной зарядовой кинетики для начальной стадии плазменного разряда в стеллараторе LHD, которая была применена для анализа среднехордового зарядового распределения атомов аргона для плазмы установки ПН-3. С использованием спектрометра Avaspec-mini, позволяющего производить измерения в широком спектральном диапазоне, были определены интенсивности линий атомов и ионов Ar^0 и Ar^+ . Температура T_e и плотность N_e определялись с помощью двойного зонда Ленгмюра и интерферометра. Интенсивности линий ионов Ar^{2+} измерить не удалось, поэтому для получения зарядового распределения Ar

уравнение баланса компонент использовалось в упрощённом виде $f_0^{Ar^+} + f_1^{Ar^0} = 1$.

Измеряемое отношение интенсивностей линий ионов Ar^0 и Ar^+ позволяет найти относительные плотности компонент, используя соотношения

$$\frac{I^{Ar^0}}{I^{Ar^+}} = \frac{PEC^{Ar^0}}{PEC^{Ar^+}} \cdot \frac{N^{Ar^0}}{N^{Ar^+}} \quad (1)$$

куда подставлялись фотоэмиссионные коэффициенты (PEC) из базы данных ADAS [2]. Относительная плотность ионов аргона Ar^+ в отсутствии других ионов представляет собой степень ионизации в плазме.

Для верификации полученных результатов для степени ионизации был использован коэффициент использования рабочего тела, определяемый с использованием двойного зонда Ленгмюра.

Экспериментально коэффициент использования рабочего тела определяется как отношение полного ионного тока, создаваемого рабочим телом, участвующем в создании тяги, к эквивалентному току

$$K = \frac{I_{FULL}}{I_{ЭКВ}} \quad (2)$$

I_{FULL} – полный ионный ток в выходном сечении плазмы (сечение диагностического объема), $I_{ЭКВ} = \frac{e}{M} G$ – эквивалентный ток плазменного потока, ионный ток полностью ионизованного газового потока

$$I_{FULL} = \pi \int_{-R}^R i_s(r) r dr \quad (3)$$

Для определения соотношения между коэффициентом ионизации и коэффициентом использования рабочего тела эти параметры были выражены через локальные значения в точке измерения концентрации ионов, нейтралов, скорости ионов n_{i_loc} , n_{0_loc} , V_{i_loc} .

Спектроскопические измерения дают коэффициент ионизации как отношение концентрации ионов к концентрации тяжёлых частиц в точке наблюдения:

$$S = \frac{n_{i_loc}}{n_{o_loc} + n_{i_loc}} \quad (4)$$

Коэффициент использования рабочего тела определяется как отношение потока ионов к потоку подаваемого нейтрального газа (с расходом G):

$$K = \frac{n_{i_loc} \cdot v_{i_loc}}{G} \quad (5)$$

Оба этих параметра (S- коэффициент ионизации, K – коэффициент использования рабочего тела) в приближении самосогласованной модели плазмы, создаваемой индуктивным источником электромагнитного поля, связаны соотношением

$$K = \frac{S}{S + \frac{0.2 \cdot \sqrt{kT_e}}{\sqrt{e \cdot (\varphi_{pl} - \varphi_{loc})}} (1 - S)} \quad (6)$$

T_e – температура электронов в плазме,

φ_{loc} – локальное значение электрического потенциала в точке измерения,

φ_{pl} – потенциал плазмы

В соответствии с (6) величина коэффициента использования рабочего тела превышает значение степени ионизации при различных соотношениях T_e и плазменного потенциала, при очень низких значениях коэффициента использования рабочего тела или при полной ионизации значения этих параметров совпадают.

Результаты измерений и выводы

На установке ПН-3 проведены серии измерений степени ионизации и коэффициента использования рабочего тела при изменении различных параметров – магнитного поля, мощности,

расхода аргона. В диагностическом сечении, где измерения этих параметров проводились вдоль одной хорды, получено хорошее согласие коэффициента использования рабочего тела и коэффициента ионизации, удовлетворяющее соотношению (6).

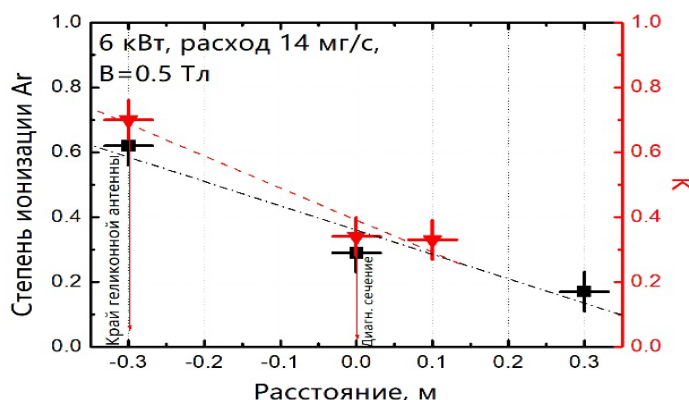


Рисунок 2 – распределение степени ионизации и коэффициента использования рабочего тела вдоль оси установки

Результаты измерений этих параметров вдоль оси установки при фиксированных значениях расхода, магнитного поля и мощности показаны на рисунке 2.

С использованием спектроскопических диагностик определена степень ионизации. С использованием зондовых диагностик определен коэффициент использования рабочего тела. Получено аналитическое выражение, связывающее коэффициент ионизации и коэффициент использования рабочего тела. При наблюдениях вдоль хорды в диагностическом сечении получено хорошее согласие коэффициента использования рабочего тела и коэффициента ионизации, удовлетворяющее предложенному аппроксимационному соотношению.

Эксперименты также показали, что коэффициент ионизации в области антенны достигает 90 % при мощности 12 кВт; на периферии плазменного столба коэффициент ионизации снижается в 2,5 раза.

Литература

1. В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин//Термояд и космос. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 3 DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-5-20Д.О.
2. Шуровский, Д.С. Кутузов, Е.А. Бунин, А.Е. Сухов, Е.Ю. Брагин// Оптические методы диагностики для измерения параметров плазмы в геликонном разряде. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2 DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-97-104
3. Нагель Н.Н., Лисица В.С., Шурыгин В.А., Анализ нестационарной зарядовой кинетики гелия в начальной фазе плазменного разряда в LHD. – ВАНТ. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 3, с. 60–67.
4. Summers H.P. The ADAS User Manual, version 2.6 / H.P. Summers. – 2004.

DETERMINATION OF THE IONIZATION COEFFICIENT OF THE WORKING GAS IN A MODEL OF AN ELECTRODELESS PLASMA ROCKET ENGINE

**D. O. Shurovsky*, N. N. Nagel, S. V. Korobtsev, E. Yu. Bragin,
V. Yu. Plaksin, S. A. Danko, S. S. Gusev, I. A. Kostrichenko,
D. S. Kutuzov**

*National Research Center «Kurchatov Institute»
123182, Moscow, Sq. Akademika Kurchatova, 1*

**Shurovskiy_DO@nrcki.ru*

In this work, the results of applying the developed method for determining the coefficient of plasma ionization using optical emission spectroscopy for a model of a electrode-less plasma rocket engine are presented. To verify the method for determining the ionization coefficient of argon, a comparison of the obtained results with the propellant utilization factor determined using probe diagnostics was carried out. A relationship between the ionization coefficient and the propellant utilization factor was obtained within the framework of a self-consistent plasma model.

Key words: plasma ionization coefficient, electrodeless plasma rocket engine, optical emission spectroscopy

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОШКА

Е.П. Шустова¹, К.П. Шустова², В.Ю. Чебакова^{1,3*},
Минабутдинов Д.К.¹

¹КФУ, 420 008, г.Казань, Кремлевская 18,

²КГЭУ, 420066, г.Казань, ул.Красносельская, д.51

³ИММ ФИЦ КазНЦ РАН, 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261

* vchebakova@mail.ru

При использовании порошковых материалов их форма, размеры и сам гранулометрический состав обладает ключевым значением, определяющим их пригодность. В работе для быстрого анализа данных факторов разработан алгоритм анализа изображений, сделанных с помощью микроскопа. Данный алгоритм может сократить время анализа формы и гранулометрического состава порошков, полученных плазменными методами.

Ключевые слова: анализ изображения, гранулометрический состав порошка, сферические формы

1. Введение

Аддитивные технологии позволяют создавать структуры с заданными физическими и геометрическими свойствами. Цинк используется для создания анодных структур требующих высокой пористости или специфической геометрии, например для аддитивного производства анодов цинк-ионных батарей, позволяя обеспечивать необходимую пористость, регулируемый химический состав и большую площадь поверхности за счет точной послойной печати сложных конструкций [2-4]. Это обеспечивает более равномерное осаждение твердой фазы в проточных батареях гибридного типа и увеличивает время работы за счет увеличе-

ния площади рабочего электрода. Чаще всего применяются методы селективного лазерного спекания (SLS) или прямой лазерной наплавки (DED), при этом важны сферическая форма, обеспечивающая большую насыпную плотность и текучесть порошка, геометрические свойства и определенный гранулометрический состав. Чаще всего используются порошки с размером частиц от 10 до 150 мкм (в зависимости от метода печати). Слишком мелкие частицы (менее 10 мкм) ухудшают текучесть, а слишком крупные — снижают качество поверхности.

Электролитические методы позволяют получать цинк из вторичного сырья, так в [1] получают электролитический порошок из цинковых корпусов отработанных цинково–углеродных аккумуляторов. Плазменные технологии широко используются для получения порошковых материалов[5], однако придание им сферической формы требует дополнительных усилий [6-8]. Так в работе [9] исследовалось влияние гранулометрического состава на текучесть порошков, распыляемых плазмой. Таким образом встает вопрос быстрого определения формы частиц порошка и его гранулометрического состава.

В работе построен алгоритм анализа формы и гранулометрического состава порошка по его изображениям полученным на микроскопе.

2. Эксперимент

В работе рассчитывается гранулометрический состав сферических порошков при обработке фото-снимков, полученных с помощью электронного микроскопа. На изображении эти частицы имеют формы кругов различного диаметра с неоднородной текстурой в оттенках серого. Эти круги могут накладываться и перекрываться случайным образом. Считаем, что пространство между частицами темнее самых темных частиц и интенсивности пикселей границы частицы в α раз меньше среднего значения интен-

сивности текстуры частицы, при этом сами частицы на изображении имеют разный диаметр и текстуру. При предварительной обработке изображений перед анализом на исходном изображении задавались области с разными диапазонами интенсивности. В этих областях программно находились самые темные и самые светлые пиксели. По этим данным для каждой области на изображении строилось линейное преобразование, применяемое его к пикселям этой области. В итоге из входного изображения получали изображение для анализа с более четким визуальным изображением имеющихся частиц на изображении. Далее на всем полученном изображении для анализа проводился поиск кругов каждого типа в соответствии с приведенным алгоритмом.

2. Метод и результаты расчетов

Алгоритм разрабатывался для порошков, все частицы которых имеют форму шаров разных размеров. На изображении одни и те же типы частиц могут иметь разный диаметр и разные текстуры в пределах соответствующих заданных допустимых интервалов.

Сначала заметим, что в результате проведенных экспериментов по поиску кругов на рассматриваемых нами изображениях с помощью встроенных в систему Mathematica методов и имеющихся библиотек для работы с изображениями на Python увидели, что эти методы не годятся для поиска кругов в нашем случае. А известные методы поиска примитивов, кругов в нашем случае, на изображениях порошков не работают [10-13] в силу следующих особенностей:

- разная интенсивность пикселей (текстуры) как отдельных частиц, так и всего изображения
- сильная неоднородность по размеру частиц, наличие шума (более темных неровных зон)
- частицы в разных слоях, а следовательно их примитивы (круги), накладываются и пересекаются

Пусть O_i – частица типа i . Обозначим через $R_i = (r_{1i}, r_{2i})$ – допустимый интервал для радиуса частицы типа i , через $\bar{I}_i$ среднее значение интенсивности текстуры частицы, $D_i = (d_{1i}, d_{2i})$ допустимый интервал для среднего значения интенсивности текстуры частицы и через $(\alpha_{1i}, \alpha_{2i})$ – допустимый интервал для α .

Получение данных для интегральной кривой распределения числа частиц по размерам заключается в поиске частиц i -го типа и подсчета их количества.

В алгоритме под параметрами частицы понимаем радиус частицы R_i и ее текстуру. При поиске частиц будем учитывать следующие параметры текстуры частицы: средняя интенсивность пикселя текстуры частицы, стандартное отклонение от нее, а также допустимый интервал $(\alpha_{1i}, \alpha_{2i})$ для α . Это происходит визуально, кликом курсора на какие-нибудь три точки каждого из двух кругов (наименьшего и наибольшего кругов), соответствующих частице O_i типа i . Алгоритм поиска частиц O_i типа i заключается в итерационном прохождении примитивами изображения, переведенного в оттенки серого. Сами примитивы изначально это четыре четверти белого диска и четыре четверти белой окружности, соответствующие текущим радиусам r искомой частицы O_i типа i . Далее в процессе поиска сектор примитив делится на два. Процесс останавливается, когда связанных площадей, размеры которых больше заданной пользователем площади для шума не остается.

Тестирование алгоритма показало, что не обнаруженных частиц не оказалось; коэффициент необнаруженных частиц в темной области с изначально низкой контрастностью в среднем составил 0.1, а в области с изначально высокой контрастностью – 0.02.

3. Заключение

Предложен алгоритм для анализа гранулометрического состава сферического порошка по изображениям, полученных с помощью электронного микроскопа. Этот алгоритм распознает, отмечает и считает количество частиц каждого типа, а также вычисляет координаты центров и радиусы найденных частиц. В предложенном нами алгоритме учитывается, что частицы одного и того же типа на изображении имеют разный диаметр и текстуру, могут накладываться и перекрываться. В нашем алгоритме процедура улучшения изображения на этапе подготовки его к анализу не приводит к удалению частиц или ухудшению различимости ранее различимых частиц. Предложенный алгоритм обнаружения графических примитивов типа окружность при обработке изображений позволяет использовать его оценки гранулометрического состава для быстрого определения соответствия заданному составу при получении и сферилизации порошков плазменными и электролитическими методами для дальнейшего его применения в аддитивных технологиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 26-21-20016)

Литература

1. Ashour Owais, Mohamed Abdel Hady Gepreel, Essam Ahmed. Production of electrolytic zinc powder from zinc anode casing of spent dry cell batteries//Hydrometallurgy.2015 Vol. 157 P. 60–71
2. Osama Gohar, Iqbal Nisa, Mohsin Saleem, at el. Pang H. 3D printing of metal-organic frameworks for electrochemical energy storage devices//Coordination Chemistry Reviews 2026. Vol. 549, art. 217353
3. Xu Q, Bi P., Tan Y., Ma Jilong, Zhang X., Zhang H., Ma Jinling, Wang Y . 3D-printed polydimethylsiloxane separators with triply periodic minimal surface structure enable uniform zinc deposition//Applied Surface Science. 2026. vol. 728, art 166161

4. Ouyang L-A, Zhu Y., He Y., Xu T, Huang H, Guo Zh. Development and design strategies of Zn powder anodes for aqueous zinc-ion batteries// Journal of Alloys and Compounds 2026. Vol.1060 art. 187286
5. Liu Zh., Chen Q., Wang Zh., Yang L, Wang Ch. Production of titanium dioxide powders by atmospheric pressure plasma jet// Physics Procedia. 2011. Vol. 18 P. 168–173
6. Jiang J., Li Sh, Lai Yu , Wang Q., Liang Sh. Preparation and characterization of a special high speed steel powder prepared by plasma rotating electrode process// Advanced Powder Technology 2025. Vol. 36.art 104886
7. Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н., Ключев С.В., Чебакова В.Ю. Исследование плазменно-электролитного процесса получения наночастиц оксида титана// Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 5. С. 70-79.
8. Song Sh, Li Y., Bai Sh.,Wang Q. Production of spherical polymeric composite powder for selective laser sintering via plasma assisted solid state shear milling: From theory to piezoelectric application// Chemical Engineering Journal 2021. vol 415. Art. 129035
9. Ashrafizadeh S.M., Habibnejad-Korayem M., Yue S., Influence of particle size distribution on the rheological properties and spreadability of plasma-atomized powders// Materials Today Communications 2025. Vol. 49 . art. 114426
10. Болгов А.Н., Фаворская М.Н. Применение преобразования Хафа и его модификаций для нахождения графических примитивов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1, № 7. С. 352.
11. Попов В.Г. Подбор оптимальных параметров алгоритма преобразования Хафа для распознавания круглых печатей на рецептурных бланках методом главного критерия// Вестник науки. 2024. Т. 4, № 6(75). С. 1167-1170.
12. Миссаров М.Д., Шустова Е.П., Шустова К.П. Интерфейс системы "Обработка и анализ изображений и видеопотоков" //Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-1. С. 67-73.
13. Шустова Е.П. Алгоритм обнаружения недопустимых движений в видеопотоке // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5 С. 97-106;

DETERMINATION OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF SPHERICAL POWDER

**E. P. Shustova^{1,*}, K. P. Shustova², V. Yu. Chebakova^{1,3,*},
D.K. Minabutdinov¹**

¹Kazan Federal University , Kazan, 420108, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066, Russia

³Institute of Mechanics and Engineering, Federal Research Center "Kazan
Scientific Center", Russian Academy of Sciences, Kazan, 420111, Russia

vchebakova@mail.ru

When using powder materials, their shape, size, and granulometric composition are key factors that determine their suitability. In this work, an algorithm for analyzing images taken with a microscope has been developed to quickly analyze these factors. This algorithm can reduce the time required to analyze the results of powder spherization using plasma methods.

Key words: translation from Russian.

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ 20Х13 И 40Х13

А.А. Юсупова, С.С. Виноградова

ФГБОУ ВО «КНИТУ»

420015, Российская Федерация, Республика Татарстан,

г. Казань, ул. Карла Маркса, 68 ФГБОУ ВО «КНИТУ»

** matveevaalexandra1@yandex.ru*

Для модификации металлов и сплавов используют различные методы обработки, такие как химическое и физическое осаждение из паровой фазы, химическое травление, электроосаждение или нанесение из неравновесных газовых сред, особенно газообразной плазмы. Несмотря на активное изучение этих процессов, фундаментальные аспекты взаимодействия ионизированных газовых сред с кристаллической решёткой материалов требуют дополнительных исследований. Электрохимическая модификация поверхности в сочетании с низкотемпературным плазменным азотированием усиливает диффузию азота в поверхностный слой и является эффективным способом повышения износостойкости и коррозионной стойкости.

Ключевые слова: Локальная коррозия, плазменное азотирование, питтинг, диффузия, микротвёрдость, плазма пониженного давления, нержавеющие стали, модификация поверхности, электрохимические методы исследования, коррозионная стойкость.

Введение

Мартенситные нержавеющие стали – перспективный класс материалов для производства медицинского инструментария и имплантатов, что обусловлено их комплексом свойств: высокой прочностью и твёрдостью; коррозионной стойкостью; возможно-

стью термической обработки для регулирования структуры и механических характеристик; биосовместимостью, минимизирующей риск отторжения организмом при правильном выборе марки стали и поверхностной обработке [1, 2].

Локальная коррозия — критический фактор снижения эксплуатационной надёжности мартенситных нержавеющей сталей, обусловленный комплексным взаимодействием химического состава, термической обработки, микроструктуры и условий среды [3]. Методы обработки поверхности играют ключевую роль в поведении локальной коррозии мартенситных сталей: гладкие поверхности с однородным пассивным слоем обладают лучшей коррозионной стойкостью [4]. Вопросы модификации поверхности стали очень актуальны, поскольку свойства поверхности обычно неудовлетворительны с точки зрения смачиваемости, адгезии, коррозионной стойкости [5].

Азотированием представляет собой химико-термическую модификацию поверхностного слоя металлов, за счет создания диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при. Традиционно азотирование проводится при 500-600°C (низкотемпературное азотирование). Результатом азотирования сталь является повышение твердости на поверхности, не изменяющуюся при нагреве до 400-450 °C; износостойкости и низкую склонность к задирам; предел выносливости; кавитационной стойкости; сопротивляемости к коррозии в атмосфере, пресной воде и паре [6].

Исследовано влияние ВЧЕ разряда пониженного давления на модификацию поверхности стали 20X13 и 40X13. Установлено, что шероховатость необработанных образцов по осям X, Y изменяется незначительно по сравнению с образцами, обработанными плазмой. В результате коррозионного исследования гальваностатическим и потенциодинамическим методами было выявлено, что при мощности обработки 1 и 1,5 кВт состояние поверхности ухудшается, а при 2 кВт происходит улучшение коррозионной

стойкости поверхности 20Х13 и 40Х13, что говорит о необходимости увеличения мощности плазменной обработки при дальнейших исследованиях. По результатам исследования кинетических закономерностей установлено, что коррозионный потенциал для образцов, покрытых плазмой, смещается в отрицательную сторону от значения -195,7 мВ до -290,6 мВ, ток коррозии на образце с мощностью 1 и 1,5 кВт увеличивается, при 2 кВт практически не изменяется относительно контрольного. Обнаружена тенденция увеличения коррозионной стойкости в режиме модификации мощности разряда 2.0 кВт. частоте генератора 13,56 МГц, давлении в камере 26-30 Па, плазмообразующий газ аргон, время обработки 60 мин.

2. Результаты и их обсуждения

Целью работы являлось исследование микроструктуры, фазового состава, микро- и макро-искажений кристаллической решетки, насыщения газами, твердости, коррозионной стойкости обработанных в ВЧ- плазме сталей 20Х13, 30Х13, 40Х13.

Один из основных принципиальных вопросов взаимодействия ВЧ-плазмы и материалов – это степень проникновения, растворения плазмообразующих газов в обрабатываемом материале. Для увеличения относительного объема газа в изделии по отношению ко всему объему обрабатываемого образца, а, следовательно, повышения точности анализа содержания газа проведена ВЧ-обработка фольги толщиной 0,15 мм.

Для более подробного изучения поверхности фольги использовался ЭПР-спектрометр системы Bruker (модель ESR5000). Результаты исследований для стали 20Х13 показали, что в образцах из стали 20Х13 зафиксировано наличие аргона. В количестве 0,8 ат•% он присутствует в исходном образце. Это является следствием насыщения аргоном поверхности в процессе ионного травления. Однако в обработанном образце в слое на глубине 40-

100 Å его содержание превышает «фоновое» в 1,5-2 раза, что говорит о том, что аргон внедрился в поверхность образца во время плазменной обработки.

Изменение ширины линии, параметра решетки стали 40X13 в зависимости от режимов плазменной обработки показаны в таблице 1. Коррозионная стойкость обработанных по всем режимам образцов выше, чем у исходного.

Таблица 1 Результаты изменения параметров для стали 40X13 после плазменной обработки

Режимы обработки	Ширина линии, рад. 10 ⁻³		α , Å	H _μ , МПа
	β (110) α	β (220) α		
исходный	6,0	11,25	2,8703	2000
Ar+N ₂ , G _r =0,06 г.с ⁻¹	6,11	11,66	2,8714	2050
Ar+N ₂ , G _r =0,08 г.с ⁻¹	6,15	11,71	2,8713	2100
Ar+O ₂ , G _r =0,06 г.с ⁻¹	6,22	11,88	2,8715	2080
Ar+O ₂ , G _r =0,08 г.с ⁻¹	6,41	11,86	2,8724	2200

Рентгенографические исследования стали 30X13 и 20X13 показали, что после 30 минут плазменной обработки в поверхностном слое образуются нитридные фазы: CrN и Fe₃N (ξ-фазы) с преобладанием нитрида CrN. С увеличением времени обработки состав поверхности существенно не меняется. В поверхностном слое стали 30X13 не обнаружен нитрид Fe₄N (γ' - фаза). На части рентгенограммы кроме нитридов присутствуют линии аустенита.

Установлено, что с повышением температуры обработки (при одном и том же времени) сильнее уменьшается ширина ли-

ний α -твердого раствора (что соответствует классической закономерности разупрочнения с повышением температуры отжига, отпуска). 2. С увеличением времени тенденция к сужению линий матрицы выражена менее чётко. Она существует для серии – 700° С во всем временном интервале, для 610 и 550°С – в интервале 15-45 минут, а после 60, 90 минут наблюдается некоторое уширение линий. Для серии 500° С в эту зависимость не укладываются 45 и 90 минут. Уширение линий α –твёрдого раствора при больших τ может быть кажущимся – истинную ширину может вуалировать нитридный слой на поверхности.

Металлографические исследования стали 30X13 показали, что при всех режимах обработки азотированный слой выглядит как темно-травящийся слой с мелкодисперсными более светлыми выделениями округлой формы. По морфологии эти частицы соответствуют нитриду хрома CrN. С увеличением времени обработки так же, наблюдается тенденция к росту зерна стали и выделение, скопление нитридов по границам зерен. У образцов, охлаждавшихся в вакууме, наблюдалось выкрашивание поверхностного слоя.

Коррозионные электрохимические испытания в 1Н растворе HCl коррозионной стойкости показали, что стационарный потенциал стали после азотирования смещается в более положительную область, что позволяет сделать вывод о повышении коррозионной стойкости.

Таким образом, проведенный комплекс исследований выявил режим, который можно рекомендовать для обработки технологических изделий.

Сравнение микроструктур стали 20X13 в исходном состоянии и после нагрева в вакууме и Ar плазме показали их значительное различие. В исходном состоянии образцы имели структуру отпускаемого мартенсита и твердость 5600 МПа. Изотермическая выдержка в течение часа при 550° с в вакууме привела к дальнейшему распаду мартенсита, формированию структуры ти-

па троостита, отпуску и снижению твердости стали до 4900 МПа. Часовая выдержка при этой же температуре в Ar плазме привела к значительно большему снижению твердости – до 3000 МПа, увеличению количества структурно-свободного феррита в структуре стали по сравнению с печным отпуском, укрупнению, коагуляции карбидной фазы.

Суммируя полученные результаты исследований, можно сделать следующие заключения: 1) увеличение толщины азотированного слоя с повышением температуры от 500 до 610° С; 2) стабилизация толщины слоя при 610° С при $\tau = 60$ мин; 3) размытие нитридного слоя при $t = 700^\circ \text{C}$ и уменьшение его твердости. В зависимости от температуры при ВЧИ-азотировании наблюдаются закономерности те же, что и для классического азотирования – снижение твердости и изменение структуры азотированного слоя при повышении температуры выше оптимальной.

Литература

1. Костина М. В., Ригина Л. Г., Костина В. С. и др. Обзор исследований коррозионностойких сталей на основе Fe – ~13 % Cr: термическая обработка, коррозионная- и износостойкость // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия, 2023.– Т. 66, № 1, С. 8–26.
2. Перелыгина, Ю. П. Коррозия и защита металлов от коррозии : учебное пособие / Ю. П. Перелыгина, И. С. Лось, С. Ю. Киреева. — Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. С. 88.
3. Davis, J. R. Corrosion of Stainless Steels / ASM International. – Ch. 5: Surface Analysis by AFM, 2020. С. 112–125.
4. Паршутина, В. В. Новые способы повышения коррозионной стойкости металлов химико-термической обработкой при анодном электролитном нагреве / В. В. Паршутина, Е. А. Пасинковский, А. М. Парамонов, А. В. Коваль, Н. В. Чернышева // ЭОМ. Т.1. 2012. С. 88–92.
5. T. Moskaliovienė, A. Galdikas / Stress induced and concentration dependent diffusion of nitrogen in plasmanitrided austenitic stainless steel. Vacuum 86, 2012. Pp.1552-1557

6. Boris Brzhozovskii, Marina Brovkova, Irina Gots, Helena Zinina, Vladimir Martynov. Study of the low-temperature plasma treatment effect on the structure, physical and chemical surface characteristics of 40X13 steel, 2019.

**EFFECT OF NON-EQUILIBRIUM LOW-TEMPERATURE PLASMA
TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND PHYSICOCHEMI-
CAL PROPERTIES OF 20X13 AND 40X13 STEELS**

A.A. Yusupova, S.S. Vinogradova

KNRTU, 420015 Kazan, 68 Karl Marx street

KNRTU, 420015 Kazan, 68 Karl Marx street

matveevaalexandra1@yandex.ru

Various processing methods, such as chemical and physical vapor deposition, chemical etching, electrodeposition, and deposition from non-equilibrium gaseous media, particularly gaseous plasma, are used to modify metals and alloys. Despite the extensive research on these processes, the fundamental aspects of the interaction between ionized gaseous media and the crystal lattice of materials require further investigation. Electrochemical surface modification, combined with low-temperature plasma nitriding, enhances the diffusion of nitrogen into the surface layer and provides an effective method for improving wear resistance and corrosion resistance.

Key words: Local corrosion, plasma nitriding, pitting, diffusion, micro-hardness, low-pressure plasma, stainless steels, surface modification, electrochemical research methods, corrosion resistance.

УДК 539.1

ПРОБЛЕМА ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНА И МЕТОД ПЕРЕПРОЕЦИРОВАНИЯ

М.Ю. Яковлев*, А.К. Беляев

¹*Российский государственный педагогический университет*

им. А. И. Герцена

191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки 48

** yakovlev.max2000@yandex.ru*

Доклад освещает проблему переноса электрона, возникающую в подходе Борна-Оппенгеймера. В работе изложен метод перепроецирования, позволяющий учесть ненулевые асимптотические радиальные матричные элементы неадиабатической связи. Метод обеспечивает сходимости в расчёте сечений неупругих процессов.

Ключевые слова: неупругие столкновения атомов, ионов, неадиабатические переходы, подход Борна-Оппенгеймера, проблема переноса электрона, метод перепроецирования, сечения, константы скоростей.

Введение

Сечения и константы скоростей неупругих процессов определяют характеристики газовых и плазменных сред. В работе [1] отмечено, что учёт неупругих процессов при моделировании атмосфер звёзд в условиях отклонения от локального термодинамического равновесия приводит к значительно лучшему согласию рассчитанных и наблюдаемых профилей спектральных линий. Наиболее широко используемым подходом для исследования столкновений атомов является подход Борна-Оппенгеймера, в рамках которого задача разделяется на два этапа: исследование 1) электронной структуры молекулы при неподвижных ядрах; 2) ядерной динамики.

Однако, подход Борна-Оппенгеймера не лишён ряда проблем. Одна из них – проблема переноса электрона или же проблема молекулярных состояний [2-5], состоящая в следующем. Не умоляя общности, рассмотрим систему, состоящую из двух ядер A и B и одного электрона, как квазимолекулу. Наиболее удобными координатами для её описания являются молекулярные координаты Якоби (рис 1. а), где $\vec{R}$ – вектор, соединяющий ядра, а $\vec{r}$ – вектор, соединяющий электрон с центром масс ядер. Неадиабатические переходы между молекулярными состояниями определяются радиальными матричными элементами неадиабатической связи (см. ниже). Стандартно предполагается, что в асимптотической области (при больших межъядерных расстояниях) неадиабатические связи между состояниями отсутствуют. Однако, анализ электронных структур показывает наличие ненулевых асимптотических радиальных матричных элементов, что приводит к расходимости сечений неупругих процессов по межъядерному расстоянию и квантовому числу полного орбитального момента значениям, что нефизично [5].

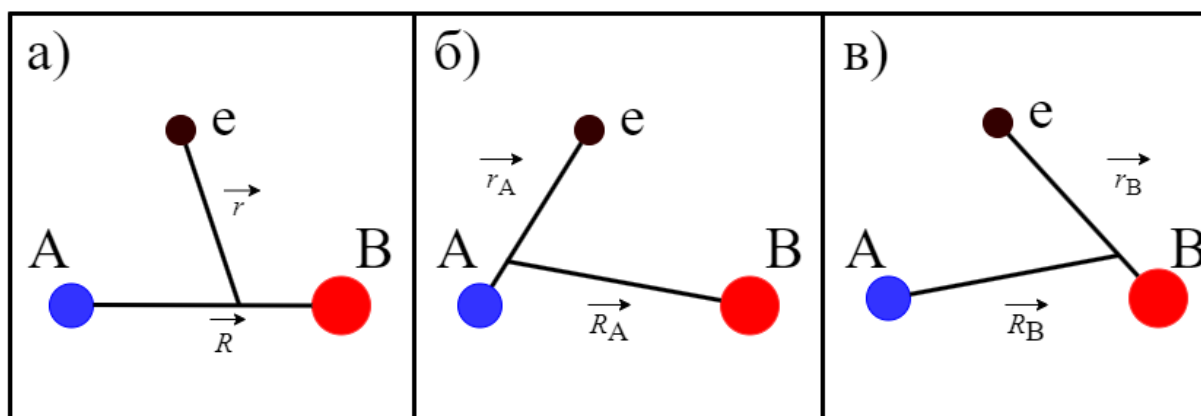


Рис. 1. Различные наборы координат Якоби.

В работах [2-5] был предложен метод перепроецирования, позволяющий скорректировать подход Борна-Оппенгеймера и разрешить проблему переноса электрона.

Метод перепроецирования

Рассмотрим стационарное уравнения Шрёдингера:

$$(\hat{H}_e + \hat{T}_N)\Psi(\vec{r}, \vec{R}) = E\Psi(\vec{r}, \vec{R}), \quad (1)$$

где $\Psi(\vec{r}, \vec{R})$ – полная волновая функция, E – полная энергия, $\hat{T}_N$ – оператор кинетической энергии движения ядер, $\hat{H}_e$ – электронный гамильтониан, для которого известны собственные функции $\varphi_k(\vec{r}; R)$ и собственные значения $U_k(R)$. Полная волновая функция может быть разложена по парциальным волнам и базису электронных волновых функций $\varphi_k(\vec{r}; R)$:

$$\Psi(\vec{r}, \vec{R}) = \sum_{J, M_J} \sum_k \frac{F_k(R)}{R} Y_{J, M_J}(\theta, \phi) \varphi_k(\vec{r}; R). \quad (2)$$

где $F_k(R)$ – радиальная ядерная волновая функция, $Y_{J, M_J}(\theta, \phi)$ – сферическая функция. Подставляя (2) в (1), получаем систему связанных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{\hbar^2}{2M} \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{\hbar^2}{2M} \frac{J(J+1)}{R^2} + U_j(R) - E \right) F_j(R, t) = \\ & = \frac{\hbar^2}{M} \sum_{k \neq j} \left\langle \varphi_j \left| \frac{\partial}{\partial R} \right| \varphi_k \right\rangle \frac{\partial F_k(R)}{\partial R} + \frac{\hbar^2}{2M} \sum_k \left\langle \varphi_j \left| \frac{\partial^2}{\partial R^2} \right| \varphi_k \right\rangle F_k(R) \end{aligned} \quad (3)$$

где M – приведённая масса ядер. Радиальные матричные элементы, стоящие в правой части равенства, отвечают за неадиабатические переходы между состояниями молекулы.

Для решения системы уравнений (3) необходимо задать граничные условия. При малых межъядерных расстояниях, из-за взаимодействия ядер имеется классически запрещённая область, в связи с чем естественными условиями для волновой функции являются:

$$F_j(R) \rightarrow 0, \quad \frac{\partial F_j(R)}{\partial R} \rightarrow 0, \quad R \rightarrow 0. \quad (4)$$

При больших расстояниях граничные условия соответствуют разлёту ядер на бесконечно большое расстояние. Из физических

соображений очевидно, что в таких условиях атомы уже не способны формировать квазимолекулу. Таким образом, ситуация сводится к взаимодействию атома, состоящего из ядра и электрона, и голого ядра. Такую систему уместно рассматривать в координатах рассеяния Якоби (рис 1. б, в), где $\vec{R}_\alpha$ – вектор соединяющий атом с электроном, $\vec{r}_\alpha$ – вектор соединяющий центр масс атома и ядро ($\alpha = A$ или $\alpha = B$ в зависимости от того, с каким ядром связан электрон). В таком случае, электронные волновые функции зависят только от $\vec{r}_\alpha$, а значит радиальные матричные элементы однозначно принимают нулевые значения в асимптотической области. Тогда асимптотические граничные условия могут быть записаны в виде суммы плоских волн:

$$F_j(R_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{K_j}} (a_j^+ \exp(iK_j R_\alpha) + a_j^- \exp(-iK_j R_\alpha)), \quad R_\alpha \rightarrow \infty. \quad (5)$$

где $a_j^\pm$ – амплитуды, $K_j = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - U(R) - \langle \varphi_j | \frac{\partial^2}{\partial R^2} | \varphi_j \rangle)}$ – волновой вектор.

Используя связь между двумя наборами координат, можно переписать выражение (5) в молекулярных координатах:

$$F_j(R) = \sum_n \frac{1}{\sqrt{K_n}} (a_n^+ t_{jn}^+ \exp(iK_n R) + a_n^- t_{jn}^- \exp(-iK_n R)), \quad R \rightarrow \infty, \quad (6)$$

где

$$t_{jn}^\pm = \delta_{nj} \pm \frac{iK_n \hbar^2}{M (U_j(\infty) - U_n(\infty))} \left\langle \varphi_j \left| \frac{\partial}{\partial R} \right| \varphi_n \right\rangle_\infty \quad (7)$$

Таким образом, метод перепроецирования позволяет решить проблему переноса электрона за счёт учёта ненулевых радиальных матричных элементов неадиабатической связи в асимптотической области посредством использования корректных граничных условий (6).

Вероятности неадиабатических переходов могут быть вычислены с помощью формализма $\mathbf{R}$ - и $\mathbf{F}$ -матриц. Первая из них связывает радиальные ядерные волновые функции и их производные:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{F}' \quad (8)$$

где $\mathbf{F}$ – фундаментальная матрица, $\mathbf{F}'$ – производная фундаментальной матрицы. Вторая – может быть вычислена по следующей формуле:

$$\mathbf{S} = (-1)^J \mathbf{Q} \mathbf{K}_s (\mathbf{t}^+ - i \mathbf{R} \mathbf{t}^+ \mathbf{K})^{-1} (\mathbf{t}^- + i \mathbf{R} \mathbf{t}^- \mathbf{K}) \mathbf{K}_s^{-1} \mathbf{Q}, \quad (9)$$

где $[\mathbf{Q}]_{jk} = \exp(-iK_j R_0) \delta_{jk}$, $[\mathbf{K}_s]_{jk} = \sqrt{K_j} \delta_{jk}$, $[\mathbf{K}]_{jk} = K_j \delta_{jk}$, $[\mathbf{t}^\pm]_{jk} = t_{jk}^\pm$, R_0 – некоторая точка в асимптотической области. Выражение (9) отличается от формулы, используемой в рамках стандартного подхода Борна-Оппенгеймера, наличием матриц $\mathbf{t}^\pm$. Вероятность неадиабатического перехода из состояния i в состояние f определяется как:

$$P_{if} = |S_{if}|^2. \quad (10)$$

Метод перепроецирования позволяет добиться сходимости по межъядерному расстоянию и квантовому числу полного орбитального момента, а, следовательно, получить физически обоснованные, корректные атомные данные (сечения и константы скоростей).

Данная работа поддержана внутренним грантом РГПУ им. А. И. Герцена (проект №46-ВГ).

Литература

1. Asplund M. New light on stellar abundance analyses: departures from LTE and homogeneity //Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2005. Т. 43. №. 1. С. 481-530.
2. Grosser J., Menzel T., Belyaev A. K. Approach to electron translation in low-energy atomic collisions //Physical Review A. 1999. Т. 59. №. 2. С. 1309.
3. Belyaev A. K. et al. Electron translation and asymptotic couplings in low-energy atomic collisions //Physical Review A. 2001. Т. 64. №. 5. С. 052701.

4. Belyaev A. K., Dalgarno A., McCarroll R. The dependence of nonadiabatic couplings on the origin of electron coordinates //The Journal of Chemical physics. 2002. T. 116. №. 13. C. 5395-5400.
5. Belyaev A. K. Revised Born-Oppenheimer approach and a reprojection method for inelastic collisions //Physical Review A. 2010. T. 82. №. 6. C. 060701.

ELECTRON TRANSLATION PROBLEM AND REPROJECTION METHOD

M.Yu. Yakovlev*, A.K. Belyaev

*Herzen State Pedagogical University of Russia
191186, St. Petersburg, 48 Moika Embankment,
yakovlev.max2000@yandex.ru*

The work describes the electron translation problem appearing within the Born-Oppenheimer approach. The paper discusses the reprojection method, which allows one to take into account non-zero asymptotic matrix elements of the radial non-adiabatic couplings. The method provides the convergence in calculation of inelastic cross sections.

Key words: inelastic atomic and ions collisions, non-adiabatic translations, the Born-Oppenheimer approach, the electron translation problem, the reprojection method, cross sections, rate coefficients.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ ЕВРОПИЯ С ВОДОРОДОМ

С.А. Яковлева

Российский государственный педагогический университет

им. А.И. Герцена

191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д.48

cvetaja@gmail.com

Неупругие процессы, происходящие при столкновениях ионов европия с атомами и ионами водорода, исследованы в рамках асимптотического подхода. Расчеты сечений проведены с использованием модели Ландау-Зинера с учетом многоканальности системы. Рассчитаны матрицы констант скоростей для температур от 1000 до 10000 К. Полученные данные используются при моделировании формирования линий ионов европия в атмосферах звезд с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия.

Ключевые слова: европий, водород, неадиабатические переходы, неупругие процессы

1. Введение

Половина всех тяжелых элементов в природе была синтезирована в г-процессе – процессе быстрого захвата нейтронов ядрами, происходящем в условиях взрыва либо при слиянии нейтронных звезд, либо по завершении эволюции массивных, быстро вращающихся звезд с сильным магнитным полем. Европий – наилучший кандидат для тестирования моделей нуклеосинтеза в г-процессе и моделей эволюции Галактического содержания элементов г-процесса, так как практически весь европий во Вселенной образован в быстром процессе нейтронных захватов, и европий – самый легко наблюдаемый из элементов г-процесса в звезд-

дах. Резонансные линии Eu^+ находятся в видимой части спектра, в связи с чем достаточно большое количество работ посвящено определению содержания европия в звездах различной металличности. Большая часть этих работ, однако, использует предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР), а учет отклонений от ЛТР требует знания данных о множестве радиативных и столкновительных процессов, в частности, неупругих процессов, происходящих при столкновениях с атомами и ионами водорода [1]. В настоящей работе представлены результаты расчетов сечений и констант скоростей неупругих процессов, происходящих при столкновениях $\text{Eu}^+ + \text{H}$, проведенных с помощью асимптотического модельного подхода.

2. Теоретическая часть

Неупругие процессы, происходящие при столкновениях с атомами и ионами водорода, исследуются в рамках подхода Борна-Оппенгеймера, который разделяет задачу на два этапа: моделирование электронных структур квазимолекулы и расчеты ядерной динамики. Асимптотический модельный подход [2] предлагает провести моделирование электронных структур, учитывающее поведение молекулярных термов при больших межъядерных расстояниях, и таким образом описать области неадиабатичности, связанные с ионно-ковалентным взаимодействием, обеспечивающим доминирующий механизм в случае неупругих процессов, происходящих при столкновениях различных атомов и ионов с водородом. Исследование неадиабатической ядерной динамики проводится с помощью модели Ландау-Зинера, которая хорошо описывает неадиабатические переходы в дальнедействующие области неадиабатичности, при этом строгая последовательность областей неадиабатичности на больших расстояниях позволяет применять аналитические выражения для учета многоканальности задачи. Само взаимодействие ионной и ковалентной конфи-

гураций квазимолекулы рассчитывается с помощью полуэмпирической формулы для одноэлектронной перезарядки [3]. При этом в рассмотрение могут быть включены только молекулярные состояния той же симметрии, которую имеет ионный терм.

3. Результаты

Ионное состояние квазимолекулы $\text{EuH}^+ \text{Eu}^{2+}(4f^7 \ ^8S) + \text{H}^-(^1S)$ порождает молекулярные состояния $^8\Sigma^-$ симметрии, и в исследование включены молекулярные состояния $\text{Eu}^+(^7,^9L) + \text{H}(^2S)$, обладающие $^8\Sigma^-$ симметрией. Данные об электронных конфигурациях и экспериментальных значениях энергии Eu^+ и Eu^{2+} взяты из базы данных NIST [4]. Стоит отметить, что у многих состояний Eu^+ не определены электронная конфигурация и квантовые числа полного углового L и спинового S момента электронов, и поэтому большое количество состояний невозможно включить в рассмотрение в L-S представлении из соображений симметрии. Всего в расчетах учтено 17 каналов рассеяния $\text{Eu}^+(^7,^9L) + \text{H}(^2S)$ и один ионный терм $\text{Eu}^{2+}(4f^7 \ ^8S) + \text{H}^-(^1S)$, асимптотические энергии которых усреднены по квантовому числу J . Проведены расчеты сечений неупругих процессов, связанных с переходами между всеми этими состояниями, а также констант скоростей для температур от 1000 до 10000 K.

Расчеты констант скоростей неупругих процессов при столкновениях ионов европия с водородом были ранее проведены [5] с помощью ЛКАО-подхода [6], который также как и асимптотический подход учитывает только ионно-ковалентное взаимодействие в моделировании электронных структур, а для расчетов сечений используется многоканальный подход Ландау-Зинера. Сравнение констант скоростей для процессов нейтрализации приведено на рисунке 1.

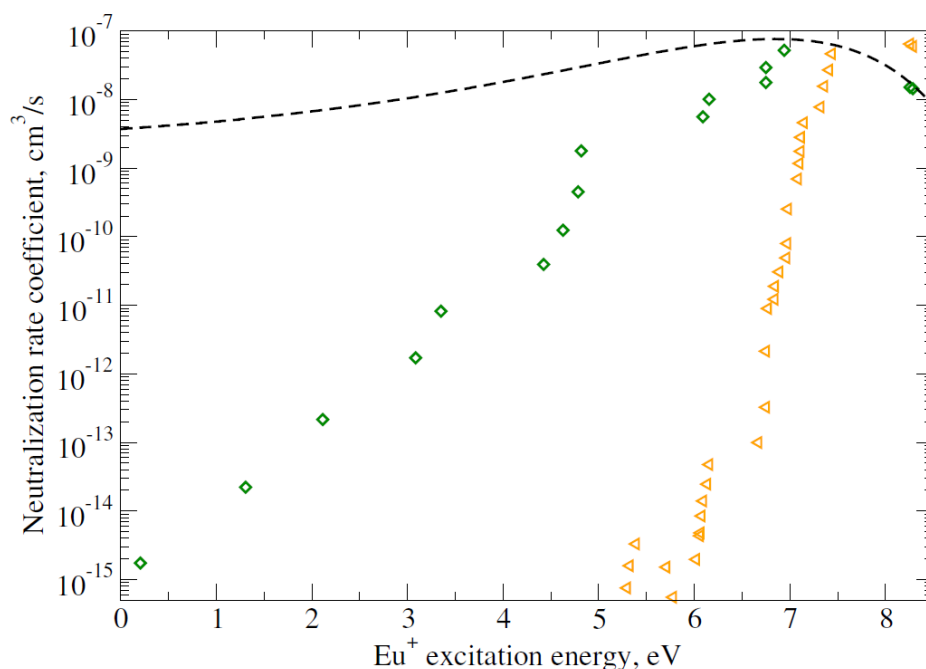


Рисунок 1. Зависимость констант скоростей процесса взаимной нейтрализации при столкновениях $\text{Eu}^{2+} + \text{H}^-$ от энергии связи однократного иона европия в конечном канале. Ромбами приведены результаты этой работы, треугольниками – результаты из работы [5], пунктиром приведена зависимость константы скорости, полученная в рамках двухканального приближения.

Стоит отметить, что в расчеты [5] было включено большое число состояний, электронная структура которых не определена, в предположении, что все они образуют термы сигма симметрии. Учет большего количества молекулярных состояний приводит к тому, что эффект многоканальности в этих расчетах намного более выраженный, это проявляется в том, что константы скоростей для переходов в более низколежащие молекулярные состояния значительно меньше за счет перераспределения тока вероятности между промежуточными молекулярными состояниями.

Данная работа поддержана внутренним грантом РГПУ им. А.И. Герцена (проект №46-ВГ)

Литература

1. Mashonkina L. I., Yakovleva S. A. Non-LTE corrections for determinations of europium abundances in F-G-K stars in a broad metallicity range // arXiv:2604.22249 (astro-ph)
2. Belyaev A. K. Model approach for low-energy inelastic atomic collisions and application to $\text{Al}^+ \text{H}$ and $\text{Al}^{++} \text{H}^-$ // Physical Review A. 2013. T. 88. № 5. C. 052704.
3. Olson R. E., Smith F. T., Bauer E. Estimation of the coupling matrix elements for one-electron transfer systems. Applied Optics. 1971, V. 10, № 8, C. 1848–1855.
4. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2024). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
5. Storm N. et al. 3D NLTE modelling of Y and Eu Centre-to-limb variation and solar abundances // Astronomy & Astrophysics. 2024. T. 683. C. A200.
6. Barklem P. S. Excitation and charge transfer in low-energy hydrogen-atom collisions with neutral atoms: Theory, comparisons, and application to Ca // Physical Review A. 2016. T. 93. № 4. C. 042705.

A STUDY OF INELASTIC PROCESSES IN COLLISIONS OF EUROPIUM IONS AND HYDROGEN

S.A. Yakovleva

*Herzen State Pedagogical University of Russia
48 Moika Emb., Saint Petersburg, 191186
* cvetaja@gmail.com*

Abstract. Inelastic processes in collisions of europium ions with hydrogen atoms and ions are investigated using the asymptotic model approach. Cross sections are calculated with multichannel Landau-Zener model. Rate coefficients matrices are calculated for temperatures from 1000 to 10000 K. These data is used in modeling the non-LTE line formation for ionized europium in stellar atmospheres.

Key words: europium, hydrogen, non-adiabatic transitions, inelastic processes

Научное издание

ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Всероссийская (с международным участием) конференция

Казань, 1-5 октября 2026 г.

Сборник статей

Научный редактор

Кашапов Н.Ф. – д-р техн. наук, член-корр. АН РТ,
академик-секретарь Отделения физики, энергетики, наук о земле АН РТ,
заместитель руководителя ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

Подписано в печать 28.05.2026 г.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16.
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 26,04. Тираж 300 экз.

Издательство Академии наук
Республики Татарстан
420011, г. Казань, ул. Баумана, 20
e-mail: izdat.anrt@yandex.ru