

На правах рукописи

Семенов Александр Владимирович

**Исследование модификации поверхности частиц
меламин-формальдегида (MF-R) в комплексной
плазме**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Петрозаводск
2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петрозаводский государственный университет»

Научный руководитель: Пергамент Александр Лионович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет».

Официальные оппоненты: Полищук Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, заведующий сектором электронной микроскопии, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

Попель Сергей Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах, ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Москва, Российская Федерация)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН) (Москва, Российская Федерация)

Защита состоится «14» _____ октября _____ 2016 г. в _14_ часов _00_ минут на заседании диссертационного совета Д 212.190.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петрозаводский государственный университет» по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, ауд. 221.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Петрозаводского государственного университета и на сайте: <http://dssp.petrso.ru/ds/index.php/candidats/37-av-semenov>

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент

В. Б. Пикулев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие теории комплексной плазмы связано с необходимостью получения знания о количестве и форме существования в плазме микрочастиц конденсированной дисперсной фазы (КДФ), их зарядового состояния, процессов на поверхности частиц, стимулированных компонентами плазмы. Данная информация необходима для обоснования и проверки адекватности теоретических моделей. Развитие приложений определяется наличием конкретных знаний по вопросам физики комплексной плазмы и из-за недостаточно развитой теории требует экспериментального определения вышеупомянутых характеристик для реальных объектов и условий их существования. Для этого необходимо найти адекватные экспериментальные методики и аппаратуру, позволяющие решить поставленные задачи. Основная трудность изучения воздействия компонентов плазмы на поверхность частиц, составляющих упорядоченную плазменно-пылевую структуру (УППС), заключается в отсутствии возможности анализа данного воздействия непосредственно в плазме, т.е. в момент существования УППС. В частности, известные на сегодняшний день оптические методы [1-4] также не способны решить данную задачу.

Взаимодействие частиц КДФ с различными компонентами низкотемпературной плазмы может повлиять не только на изменение морфологии и состава поверхности микрочастицы, но и вызвать структурную модификацию в объеме тела самой частицы. В настоящее время проводятся интенсивные исследования, направленные на изучение взаимодействия компонентов низкотемпературной плазмы с различными материалами поверхностей, окружающих плазму [5-7], тогда как исследованию модификации поверхности погруженных в плазму полимерных микро- и наноразмерных частиц в литературе практически не уделено внимания. Комплексная плазма как объект для научного исследования стимулирует изучение процессов взаимодействия компонентов плазмы с веществом, погруженным в нее, а также плазмохимических процессов, которые могут оказывать влияние на условия существования УППС [8-11]. Кроме того, фундаментальные исследования закономерностей физико-химических процессов, протекающих в системе плазма-полимер, требуют комплексного исследовательского подхода и во многом отстают от насущных потребностей, обусловленных необходимостью решения современных технологических и прикладных задач. Это связано, в первую очередь, со сложностью и многофакторностью плазменных процессов, требующих для анализа их механизмов широкого набора экспериментальных данных, полученных с использованием адекватных данной задаче физических методик и построения теоретических моделей.

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование возможного существования частиц КДФ (меламин-формальдегид (MF-R)) в комплексной плазме и их модификации при взаимодействии с компонентами среды этой плазмы, включая и взаимодействие между собой.

Частицы меламин-формальдегида в целом обладают свойствами эталонных объектов, как в плане размера, так и в плане поверхностного рельефа, поэтому данные о

поверхностных свойствах частиц других материалов, размещаемые в составе УППС, могут быть сравнены с полученными результатами. Кроме того, частицы данного материала широко применяются в экспериментах по исследованию комплексной плазмы, включая эксперименты в условиях невесомости на международной космической станции. Технология изготовления подобных частиц является коммерческой тайной компании-производителя, вследствие чего многие свойства, которые проявляют такие частицы в условиях воздействия на них низкотемпературной плазмы, можно проверить только экспериментально.

В настоящей работе для исследования поверхностной структуры частиц меламин-формальдегида использовался сканирующий атомно-силовой микроскоп (АСМ). Данный инструмент был выбран ввиду предоставляемой им возможности наиболее прецизионного описания поверхностной структуры исследуемых частиц по сравнению с другими методами, а разработанная методика исследования поверхности сферических частиц меламин-формальдегида с помощью АСМ, которая до этого не применялась для исследования поверхностного рельефа подобных частиц, также подтверждает актуальность работы.

Проведенные исследования могут служить основой для развития технологии всесторонней модификации микро- и наноразмерных частиц органических материалов и биополимеров в комплексной плазме с целью их дальнейшего применения в области медицины и фармакологии.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании закономерностей модификации поверхностной структуры микрочастиц, входящих в состав самоорганизованных упорядоченных плазменно-пылевых структур, с использованием методов атомно-силовой микроскопии, а также оценка влияния компонентов среды комплексной плазмы на структуру и свойства вещества, существующего в данных условиях.

Для достижения данной цели в работе были решены следующие **задачи**:

- разработан экспериментальный метод модификации поверхности частиц меламин-формальдегида, составляющих УППС в низкотемпературной плазме аргона, неона, смеси аргон-кислорода. Сформулированы ограничения и условия применимости метода;
- разработана методика извлечения проэкспонированных в плазме образцов частиц, составлявших УППС, а также способ специальной подготовки проэкспонированных в плазме образцов частиц для дальнейшего исследования с помощью методов атомно-силовой микроскопии;
- разработана методика исследования поверхностной структуры микрочастиц с помощью атомно-силового микроскопа. Выработаны критерии сравнения и анализа поверхностной структуры частиц до погружения в плазму и после извлечения из нее при исследовании экспериментальных образцов в атомно-силовом микроскопе;
- адаптирован математический метод триангуляции расчета фрактальной размерности поверхности частиц меламин-формальдегида, составлявших УППС в условиях комплексной плазмы, по результатам изображений, полученных с помощью атомно-силового микроскопа. Рассчитана реальная площадь участков поверхности частиц,

проэкспонированных в условиях комплексной плазмы. Оценена реальная площадь всей поверхности, которую приобретает частица после экспозиции в плазме при конкретных условиях;

- экспериментально реализован метод масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы. Сформулированы ограничения и условия применимости разработанного метода;

- экспериментально исследован состав и структура микрочастиц меламина-формальдегида, проэкспонированных в комплексной плазме методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Разработана методика фильтрации полученных спектров от фона подложки. Выявлены основные спектральные линии, соответствующие химическим связям в молекуле меламина-формальдегида;

- проведены теоретические оценки потоков энергии активных компонентов плазмы на поверхность частиц, приводящих к ее модификации в условиях комплексной плазмы. Рассчитаны температуры поверхности частиц для всех условий экспозиции УППС в плазме аргона, неона и смеси аргон-кислорода.

Научная новизна работы заключается в том, что получены и проанализированы новые экспериментальные данные о модифицированной поверхности частиц меламина-формальдегида, составлявших УППС в комплексной плазме тлеющего разряда при малых плотностях постоянного тока (19-94 мкА/см²) и низких давлениях газа (30-40 Па) в зависимости от вида плазмообразующего газа (аргон, неон, смесь аргон-кислород (Ar-90%, O₂-10%)) и времени экспозиции частиц в плазме (10, 20, 40, 60 минут). В частности, были получены численные данные о модифицированной поверхностной структуре микрочастиц меламина-формальдегида, характере и степени изменения поверхности частиц, проэкспонированных в плазме.

Проведена численная оценка реальной площади поверхности частиц меламина-формальдегида и параметра фрактальной размерности поверхности эталонных частиц и частиц, проэкспонированных в плазме, при помощи математического метода аппроксимации поверхности способом триангуляции. В работе предлагается новый подход к экспериментальной возможности проведения всесторонней модификации поверхностной структуры вещества, размеры которого очень малы (от сотен нанометров до десятков микрометров).

Оценены потоки энергии активных компонентов плазмы на поверхность частиц, приводящих к ее модификации в условиях комплексной плазмы. Рассчитаны температуры поверхности частиц для всех условий экспозиции УППС в плазме аргона, неона и смеси аргон-кислорода.

Впервые были получены экспериментальные данные масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы с упорядоченными плазменно-пылевыми структурами, состоящими из частиц меламина-формальдегида.

Впервые проведены исследования состава и структуры поверхности частиц меламина-формальдегида после их экспозиции в комплексной плазме методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Обнаружены изменения спектров, связанные с модификацией материала в условиях комплексной плазмы.

Научная и практическая ценность работы заключается в том, что результаты исследований могут служить экспериментальной базой для более глубокой проработки и развития теории комплексной плазмы с целью определения новых свойств упорядоченных плазменно-пылевых структур в зависимости от компонентного состава плазмы, условий их формирования и зарядки, а также процессов деструкции вещества в данных условиях, что является важным для широкого круга практических задач. Кроме того, практическая ценность работы заключается в применении способа всесторонней поверхностной модификации в низкотемпературной плазме инертных газов для малых (микро- и наноразмерных) объектов и веществ, которые невозможно всесторонне модифицировать другими способами и методами. Результаты масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы важны для экспериментального изучения комплексной плазмы в условиях микрогравитации при использовании закрытых газоразрядных камер и трубок.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования методом АСМ параметров шероховатости участков поверхности частиц меламин-формальдегида, составлявших УППС в плазме тлеющего разряда постоянного тока.
2. Результаты расчетов реальной площади поверхности частиц после их экспозиции в плазме тлеющего разряда постоянного тока при помощи фрактального анализа.
3. Результаты масс-спектрометрических исследований изменения состава газовой среды комплексной плазмы в радиочастотном разряде.
4. Экспериментальные результаты исследования спектров комбинационного рассеяния микрочастиц меламин-формальдегида, проэкспонированных в комплексной плазме, и их интерпретация на основе сопоставления интенсивностей линий, соответствующих химическим связям в MF-R.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях и выставках:

- 1) 5-ая Всероссийская конференция по физической электронике ФЭ – 2008, Махачкала, Россия, 2008 г.
- 2) Конференция научно-образовательных центров Pan-REC 2008, Нижний Новгород, Россия, 2008 г.
- 3) Конкурс-конференция студентов и аспирантов в области физики, Москва, Россия, 2009 г. (приз за лучший стендовый доклад)
- 4) 61-я Научно-практическая конференция в Петрозаводском государственном университете, Петрозаводск, Россия, 2009 г.
- 5) 19-й Международный симпозиум по плазмохимии (ISPC-19), Бохум, Германия, 2009 г.
- 6) Конференция научно-образовательных центров Pan-REC-2010. Воронеж, Россия, 2010 г.
- 7) 37-ая Международная конференция по плазмофизике, Норфолк, США, 2012 г.
- 8) 3-я Международная конференция по плазменной медицине, Грайфсвальд, Германия, 2010 г.
- 9) 6-я Международная конференция по физике пылевой плазмы, Гармиш-Патеркирхен,

Германия, 2011 г.

- 10) Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2011, Петрозаводск, Россия, 2011 г.
- 11) Конференция-конкурс молодых физиков России 2012, Москва, Россия, 2012 г. (Первое место)
- 12) Конференция научно-образовательных центров Pan-REC-2012. Ярославль, Россия, 2012 г. (приз за лучший стендовый доклад)
- 13) 20-я Юбилейная конференция по медицинской физике (ICMP-2013), Брайтон, Англия, 2013 г.
- 14) Международная выставка «БИОИНДУСТРИЯ- 2014», Санкт-Петербург, 2014 г. (Золотая медаль)
- 15) 11-я Международная выставка-конгресс «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (HI-TECH) - 2015, Санкт-Петербург, 2015 г. (Серебряная медаль)

В ходе выполнения работы автором был получен Грант Президента РФ для обучения за рубежом. Стажировка состоялась в 2011 г. в Институте внеземной физики научного общества им. Макса Планка (научные руководители стажировки: проф. Грегор Морфилл, проф. Хубертус Томас), Гархинг, Германия. В ходе данной стажировки были получены представленные в работе результаты масс-спектрометрических исследований и проведены эксперименты по исследованию модификации поверхности частиц меламина-формальдегида (MF-R) в условиях комплексной плазмы. Кроме того, работа частично выполнялась при финансовой поддержке следующих проектов:

- 1) Грант Федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.1 в области физики плазмы по теме «Комплексная плазма, методы получения и диагностики», 2012-2013 гг.
- 2) Грант по программе BRNE американского фонда гражданских исследований CRDF. Тема проекта: «Studying Self-Organization Processes of Matter» 2012-2013 гг.
- 3) Гранты в рамках Программы стратегического развития ПетрГУ по теме «Комплексная плазма: модификация поверхности» (2013 г.) и «Исследование механизмов модификации поверхности вещества в системах комплексной плазмы» (2014 г.).
- 4) Грант Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Умник». Название проекта: «Разработка способа внутривлазменной обработки поверхности частиц-носителей лекарственных средств для биомедицинских приложений», 2009-2011 гг.
- 5) Грант Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Умник на Старт». Название проекта: «Разработка технология модификации физических и химических свойств микро- и наноразмерных биообъектов в плазме инертных газов для приложений в области медицины и фармакологии», 2013-2016 гг.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 7 публикаций в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны

быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад автора

Все основные результаты работы получены лично диссертантом. Вклад диссертанта в работу является определяющим.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа содержит **124** страницы, **75** рисунков, **14** таблиц. Список использованной литературы включает **153** наименования.

Благодарности

Автор выражает благодарность научным руководителям - профессору А.Д. Хахаеву, и профессору А.Л. Пергаменту за помощь в выполнении исследований по теме диссертации.

Отдельно выражаю благодарность доценту Л. А. Луизовой, профессору В.Ю. Карасеву, профессору Г.Б. Стефановичу, профессору В.И. Сысуну, А.И. Щербине, А.А. Пикалеву за помощь, ценные замечания и предложения, выдвигаемые в процессе выполнения исследований.

Выражаю благодарность профессору Г. Морфиллу, Х. Томасу, профессору В.Н Цытовичу, М.Ю. Пустыльнику, В. А. Носенко, Б.А. Клюмову, М. Рубин-Зуцику, С. Шимицу, А.В. Ивлеву, С. Митичу за помощь и ценные советы в проведения экспериментальных исследований в Институте веземной физики научного общества им. Макса Планка (Гархинг, Германия).

Основное содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, отмечены основные вопросы, которым уделялось наибольшее внимание.

В первой главе рассматривается физическое явление упорядоченных плазменно-пылевых структур (УППС), условия их существования в плазме, влияние внутренних и внешних условий на вид ППС. Рассмотрены механизмы модификации поверхности различных полимерных материалов в низкотемпературной плазме.

На основе анализа литературных данных показано, что достаточно хорошо изучены физические процессы формирования плазменно-пылевых структур в различных условиях, а также механизмы модификации поверхности полимерных пленок наиболее распространенных материалов (ПЭ, ПП, ПВДФ, ПЭВД, ПЭНД) в низкотемпературной плазме. В то же время, данные об экспериментальном исследовании модификации поверхности микрочастиц в условиях комплексной плазмы в научной литературе практически отсутствуют. Также крайне мало информации о поверхностных свойствах частиц меламин-формальдегида как основного материала для исследования УППС.

Во второй главе описаны автоматизированные лабораторные программно-аппаратные комплексы для исследования УППС. Приводятся основные характеристики и

параметры экспериментальных установок. Представлена схема измерительно-вычислительного комплекса, структура основных компонентов и модулей.

Общая схема макета экспериментальной установки показана на рисунке 1.

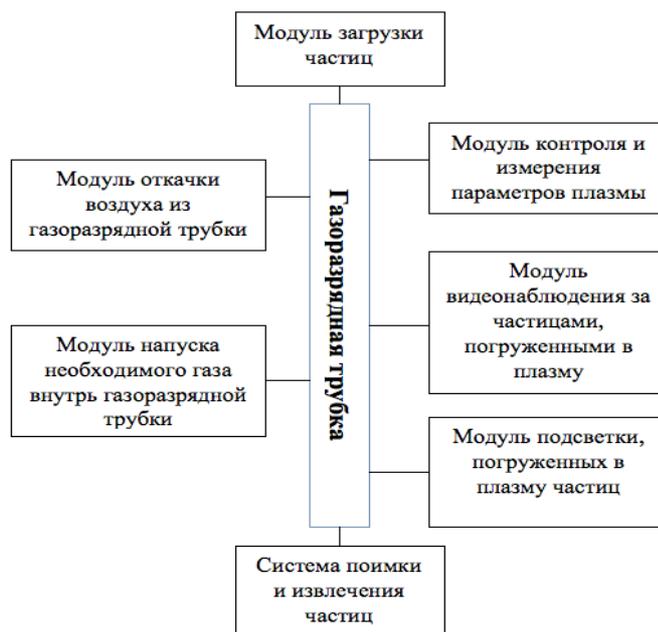


Рис. 1 Общая схема макета экспериментальной установки.

Изложена методика проведения экспериментальных исследований по изучению модификации поверхности частиц меламин-формальдегида, входивших в состав УППС в низкотемпературной плазме при различном сочетании плазмообразующего газа и времени экспозиции частиц в плазме. Основные характеристики экспериментальных исследований по изучению модификации поверхности частиц УППС в плазме инертных газов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики экспериментальных исследований по изучению модификации поверхности частиц УППС в плазме инертных газов

Параметр	Значение
Разряд плазмы	стратифицированный тлеющий разряд постоянного тока
Газы	Ar, Ne, смесь Ar-O ₂ (90% Ar – 10% O ₂)
Давление газа в газоразрядной трубке (mbar)	0.3
Остаточное давление в газоразрядной трубке после полной откачки (mbar)	2.4×10^{-3}
Величина протока газа (sccm)	0.18 - 0.2
Ток разряда (мА)	1 – 2
Время экспозиции частиц в плазме (мин)	10, 20, 40, 60
Частицы	меламин-формальдегид (MF-R, код MF-R-8050)
Диаметр частиц (мкм)	4.12 ± 0.09

Описана методика исследования поверхностного рельефа с помощью атомно-силового микроскопа. Выработаны ограничения и требования к проведению измерений

поверхности образцов частиц УППС. Схема методики проведения анализа поверхности частиц, входивших в состав УППС, с помощью атомно-силового микроскопа приведена на рисунке 2.

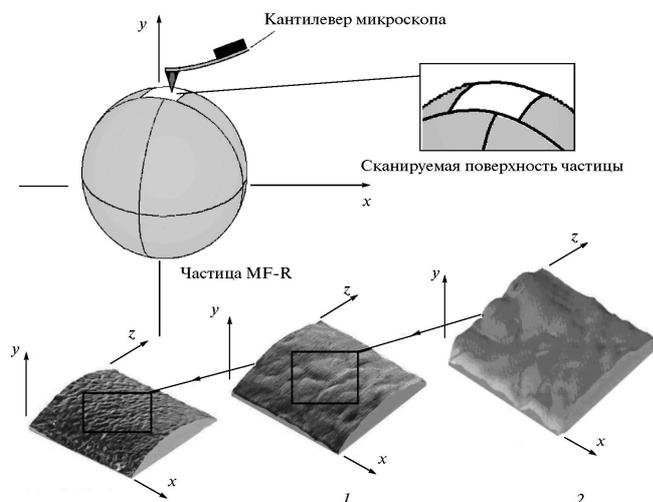


Рис. 2 Схема методики проведения анализа поверхности частиц, входивших в состав УППС, с помощью атомно-силового микроскопа.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований поверхностной структуры частиц УППС до и после погружения в плазму, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии. Приведены численные значения параметров шероховатости исследованных участков поверхности частиц меламин-формальдегида до погружения в плазму и после извлечения из нее (Рис. 3).

Для анализа и сравнения шероховатости поверхности частиц, входящих в состав УППС, были выбраны определенные параметры, которые характеризуют отклонения реальных поверхностей от номинально гладких (все выбранные параметры регламентированы стандартами, см. [12-14]). К таким параметрам относятся: средняя шероховатость (R_a), среднеквадратичная шероховатость (R_q), максимальная высота профиля (R_t), максимальная глубина впадины профиля (R_v), максимальная высота пика профиля (R_p), параметр асимметрии (R_{sk}), параметр эксцесса (R_{ku}).

В целом характер поверхности имеет очень похожую структуру до 40 минут экспозиции в плазме, а при 40 и 60 минутах экспозиции заметны большие различия в шероховатостях поверхности частиц. Из всех приведенных выше параметров, наиболее полно характеризуют степень изрезанности профиля параметры асимметрии и эксцесса (Рис. 4, Рис. 5). Эти параметры являются безразмерными величинами. Из данных графиков видно, что наблюдается схожесть поведения кривых для газов аргона и смеси аргон-кислород при различном времени экспозиции. Шероховатость поверхности частиц, экспонируемых в смеси газов аргон-кислорода не сильно отличается от параметров шероховатости частиц, экспонируемых в плазме аргона. Из этого следует, что вклад примеси кислорода в газовой среде в такой пропорции не внес значительных изменений в структуру поверхности частиц в плазме (вклад оценивается пропорционально примеси кислорода на уровне $\sim 10\%$). Однако, данный факт возможно учитывать для ускорения процессов модификации поверхностного рельефа частиц в условиях комплексной плазмы

в дальнейшем.

Методами электронной микроскопии был оценен диаметр частиц меламин-формальдегида после экспозиции в плазме в течение 60 минут при различных видах плазмообразующего газа. Измерения показали, что после часа экспозиции размеры частиц уменьшились: в неоне на 70-90 нм, в аргоне на 190-230 нм, в смеси аргон-кислород на 290-350 нм.

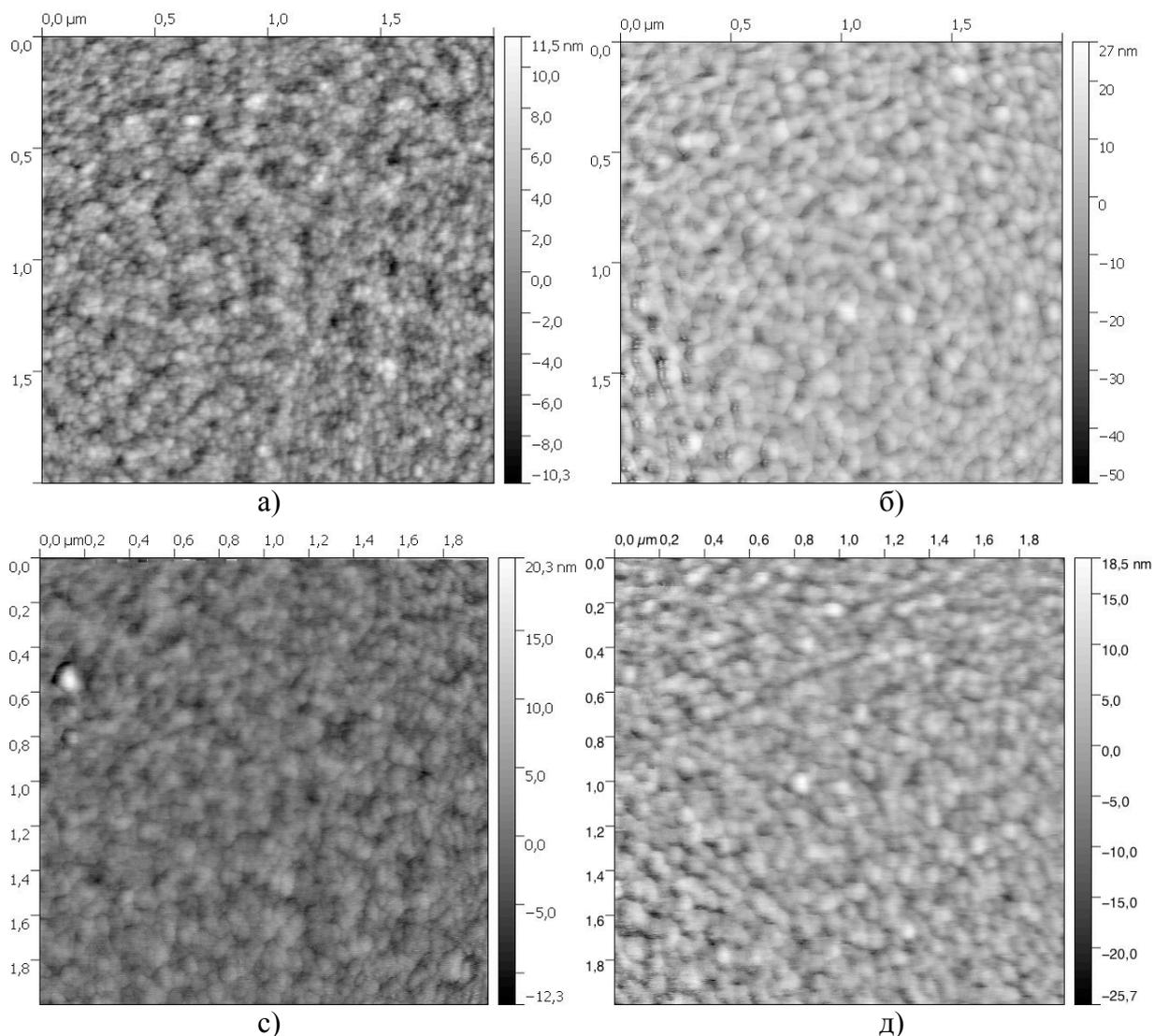
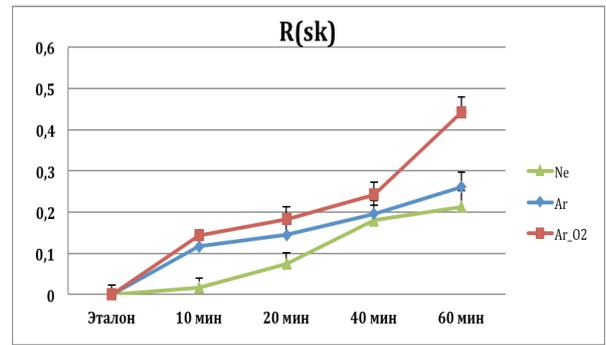
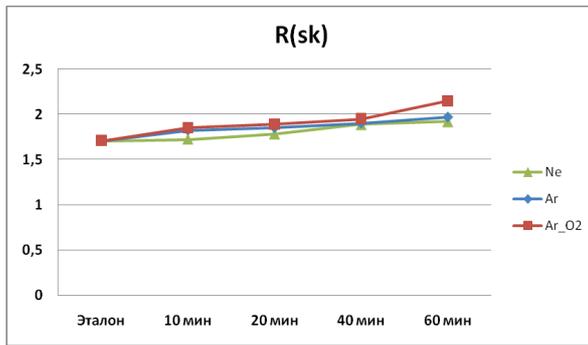


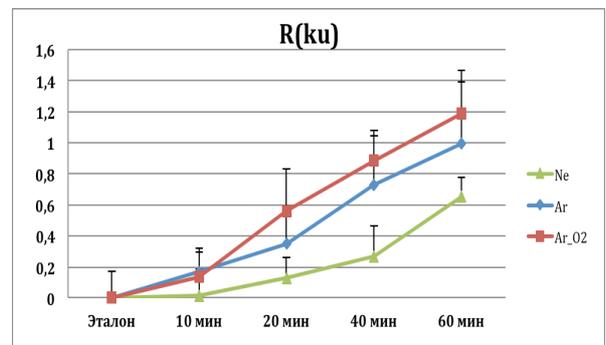
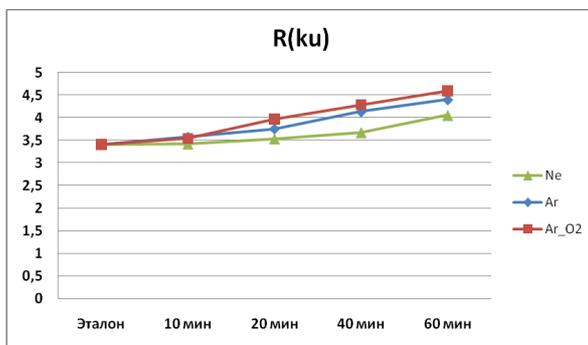
Рис. 3 Изображения участков поверхности частиц меламин-формальдегида. Время экспозиции – 60 минут, размер кадра – 2 x 2 мкм. (а) – до погружения в плазму, (б) – Ar, (с) – смесь Ar-O₂, (д) – Ne.



а)

б)

Рис. 4 Зависимости рассчитанного параметра асимметрии $R(sk)$ для сочетания плазмообразующий газ - частицы КДФ: Ar – MF-R, Ar-O₂ – MF-R, Ne – MF-R. (а) – значение абсолютной величины параметра; (б) – разность значений величины параметра относительно эталона.



а)

б)

Рис. 5 Зависимости рассчитанного параметра эксцесса $R(ku)$ для сочетания плазмообразующий газ - частицы КДФ: Ar – MF-R, Ar-O₂ – MF-R, Ne – MF-R. (а) – значение абсолютной величины параметра; (б) – разность значений величины параметра относительно эталона.

По результатам расчетов фрактальной размерности рельефа поверхности частиц меламин-формальдегида удалось оценить реальную площадь поверхности просканированных участков, а также рассчитать реальную площадь всей поверхности, которую приобретают частицы после погружения в плазму в зависимости от длительности их экспозиции и вида плазмообразующего газа (Табл. 2).

Значение реальной площади поверхности исследованного участка (S_{real}) вычислялось по следующей формуле:

$$S_{real} = S_w \delta^{2-D_f} \quad (1)$$

где S_w – топологическая (видимая площадь поверхности), D_f – фрактальная размерность поверхности, δ – характеристика измерительного масштаба для заданной площади. В нашем случае $\delta = 1/512$, что соответствует величине, обратной разрешению просканированного кадра [15].

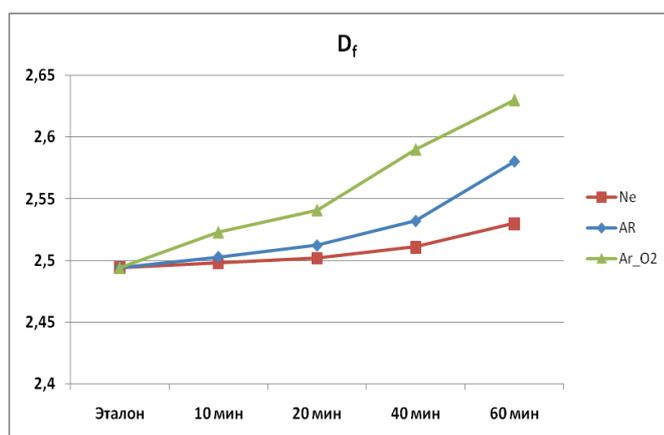


Рис. 6 Зависимость фрактальной размерности (D_f) рельефа поверхности частиц меламина-формальдегида от вида газа и времени экспозиции в плазме.

Значение реальной площади всей поверхности частицы рассчитывалось следующим образом: рассчитывалась площадь всей поверхности частицы по формуле $S_{нов} = 4\pi R^2$ ($S_{нов} = 53.29 \text{ мкм}^2$, при $R = 2.06 \pm 0.04 \text{ мкм}$), затем рассчитывалось количество исследованных площадей, которое может поместиться на всей площади и, путем экстраполяции рассчитанного результата реальной площади поверхности для конкретного участка частицы на всю площадь, удалось численно оценить реальную площадь (S_{MF-R}) всей частицы меламина-формальдегида после ее экспозиции в плазме при каждом конкретном условиях. Для частиц, проэкспонированных в плазме, учитывалась поправка для расчета всей площади поверхности ($S_{нов}$) с учетом уменьшения их радиуса.

Таблица 2. Рассчитанные параметры фрактальной размерности (D_f), реальной площади поверхности участков частиц (S_{real}), реальной площади всей поверхности частиц меламина-формальдегида (MF-R) (S_{MF-R}) при значении видимой топологической площади ($S_w = 4.00 \pm 0.05 \text{ мкм}^2$).

Вид плазмообразующего газа	Время экспозиции (мин)	D_f (± 0.05)	S_{real} (мкм^2) (± 7)	S_{MF-R} (мкм^2) (± 140.00)
Эталон		2.49	87	1163
Ar	10	2.5	92	1228
Ar	20	2.51	97	1302
Ar	40	2.53	110	1436
Ar	60	2.58	149	1780
Ne	10	2.49	89	1191
Ne	20	2.5	92	1221
Ne	40	2.51	97	1291
Ne	60	2.53	109	1398
Ar-O ₂	10	2.52	104	1392
Ar-O ₂	20	2.54	116	1557
Ar-O ₂	40	2.59	158	1904
Ar-O ₂	60	2.63	203	2284

Для интерпретации свойств поверхности и химических изменений в составе материала частиц, экспонируемых в условиях комплексной плазмы, были рассчитаны значения потоков энергии активных компонентов плазмы, направленных на поверхность частицы, а также потоков энергии, уходящих от ее поверхности (Рис.7).

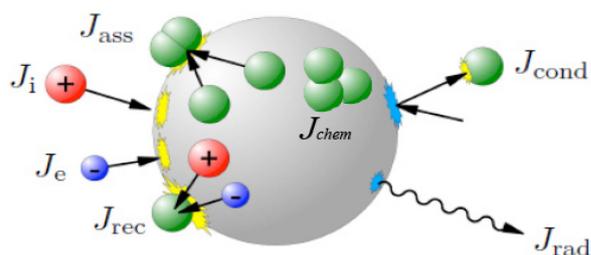


Рис. 7 Потоки энергии, направленные на поверхность частицы, а также уходящие от нее в плазме [16].

Общую плотность потока энергии (J_{in}) на поверхность частицы можно записать в виде выражения:

$$J_{in} = J_e + J_i + J_{rec} + J_{ass} + J_{chem} \quad (2)$$

где J_e , J_i – плотности потоков кинетической энергии электронов и ионов; J_{rec} – плотность потока энергии, которая выделяется при рекомбинации положительными ионами на поверхности частицы; J_{ass} – плотность потока энергии, которая выделяется при ассоциации газовой компоненты (например, атома кислорода (O)) в молекулу кислорода (O_2) на поверхности частицы; J_{chem} – плотность потока энергии, которая выделяется при химической реакции между компонентами плазмообразующего газа и поверхностью частицы.

Плотность потока энергии, уходящей от поверхности частицы (J_{out}) состоит из таких компонентов как плотность потока энергии, передающейся окружающему газу путем теплопроводности (J_{th}) и плотности потока энергии излучения, уходящего с поверхности частицы (J_{rad}).

Для плазмы аргона и неона выражение (2) будет состоять из плотности потоков энергии электронов (J_e), ионов (J_i) и рекомбинирующих ионов (J_{rec}) на поверхности частицы. При этом вклад рекомбинационной составляющей будет доминировать над кинетической энергией взаимодействия электронов и ионов с поверхностью частицы. Вкладами энергий ассоциации и химических реакций на поверхности можно пренебречь в виду инертности плазмообразующих газов. В расчетах плотности потоков энергии температура ионов принималась равной комнатной температуре – 300 К, температура электронов составляла – 3 эВ, концентрации электронов для плазмы аргона и неона в экспериментах составляли – $3.7 \times 10^{15} \text{ м}^{-3}$ и $2.1 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$ соответственно. Концентрации ионов для обоих газов считались равными концентрации электронов. Значение потенциала поверхности частицы (V_{bias}) было оценено по теории ограниченных орбит [17] 7.5 В для плазмы аргона и 16.3 В для плазмы неона.

Для расчета уходящей энергии с поверхности частиц принимались значения коэффициента Пуассона (γ) равное 1.66 и температуры газа (T_g) равное 300 К для обоих видов плазмообразующих газов. Температура поверхности частиц рассчитывалась из

условия равенства входящих и исходящих потоков энергии на поверхности и составила 330 К для плазмы аргона и 309 К для плазмы неона, погрешность расчетов составила ± 5 К. Значение коэффициента излучения (ϵ) для меламин-формальдегида принималось равным 0.9. [18]

Рассчитанные значения потоков энергии на поверхности частицы в плазме аргона и неона представлены в таблице 3. Оценки плотностей потоков энергии проведены с точностью до двух значащих цифр. Значения суммарной энергии ионов (кинетическая энергия и энергия рекомбинации) в экспериментах составила 23.2 эВ для плазмы аргона и 37.93 эВ для плазмы неона соответственно.

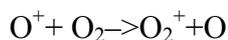
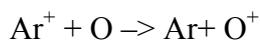
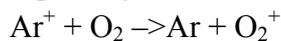
В оценке энергетических потоков на поверхность пылевой частицы учтены метастабильные и резонансные атомы плазмообразующего газа, которые также могут оказывать влияние на поверхностные свойства. Концентрация таких атомов, как правило, высока, однако их поток на поверхность частицы мал по сравнению с потоком ионов и определяется геометрическим сечением пылевой частицы.

Таблица 3. Рассчитанные значения потоков энергий на поверхности частицы в плазме аргона и неона.

	$J_e,$ (Вт/м ²)	$J_i,$ (Вт/м ²)	$J_{rec},$ (Вт/м ²)	$J_{in},$ (Вт/м ²)	$J_{th},$ (Вт/м ²)	$J_{rad},$ (Вт/м ²)	$J_{out},$ (Вт/м ²)
Аргон	97	122	251	470	270	200	470
Неон	43	47	60	150	100	50	150

Для плазмы смеси газов аргона и кислорода при соотношении 90% – 10% в дополнение к плотностям потоков энергии $J_e, J_i, J_{rec}, J_{th}, J_{rad}$ были оценены плотности потоков энергии за счет ассоциации молекул кислорода на поверхности пылевой частицы (J_{ass}) и за счет ее поверхностных химических реакций частицы (J_{chem}).

При добавке кислорода в разряде происходит нейтрализация ионов аргона с образованием ионов кислорода (молекулярных и атомарных), в результате концентрация ионов аргона уменьшается:



Кислородная часть смеси фактически трансформирует плазму из электрон-ионной плазмы (в чистом аргоне или неоне – $e, Ar^+; e, Ne^+$) в ион-ионную плазму, в которой основными ионами являются ионы кислорода O^+ и O_2^+ , а электронная часть сильно подавлена [19]. Важным фактором является быстрота протекания реакции перезарядки иона аргона на молекуле кислорода $Ar^+ + O_2 \rightarrow Ar + O_2^+$. Обратная реакция практически ингибирована при комнатной температуре из-за большой разницы между потенциалом ионизации аргона и молекулярного кислорода, а также химической реакции диссоциативного прилипания электрона к молекуле кислорода $O_2 + e \rightarrow O^- + O + e$ [19].

Для расчетов плотности потоков энергии на поверхность пылевой частицы использовались следующие параметры: $n_{O_2}^+ = 15.2 \times 10^{15} \text{ м}^{-3}$ [19], $V_{bias} = 1.5$ эВ, $T_i = 300$ К. Плотность потока электронов и ионов рассчитывалась из соотношения равенства потоков

отрицательных и положительных зарядов на поверхности частицы в стационарных условиях. Расчет уходящего потока энергии с поверхности частицы, передающейся окружающему газу путем теплопроводности (J_{th}), рассчитывался отдельно для кислорода и аргона, а затем суммировался.

Рассчитанные значения плотности потоков энергии для данной смеси плазмообразующих газов представлены в таблице 4. В связи с малой точностью ряда расчетных параметров аргон-кислородной плазмы, оценки плотностей потоков энергии проведены с точностью до одной значащей цифры. В результате расчетов температура поверхности частицы составила 324 ± 10 К. Значения суммарной энергии ионов (кинетическая энергия и энергия рекомбинации) составила 15.1 эВ.

Таблица 4. Рассчитанные значения плотности потоков энергии на поверхности частицы в плазме смеси аргона-кислорода (90% - 10%)

	$J_e,$ (Вт/м ²)	$J_i,$ (Вт/м ²)	$J_{rec},$ (Вт/м ²)	J_{ass} (Вт/м ²)	J_{chem} (Вт/м ²)	$J_{in},$ (Вт/м ²)	$J_{th},$ (Вт/м ²)	$J_{rad},$ (Вт/м ²)	$J_{out},$ (Вт/м ²)
Ar-O₂	128	30	200	3	2	363	216	147	363

Из проведенных расчетов видно, что наибольшие значения плотностей потоков энергии взаимодействия компонентов плазмы с поверхностью пылевых частиц возникают в плазме аргона. При данных условиях экспозиции достигается наивысшая температура поверхности частицы (330 К). Добавка кислорода в смеси газов аргон-кислорода принципиально меняет состав и транспортные свойства плазмы, преобразуя ее из электрон-ионной в ион-ионную. Вместе с тем значение температуры поверхности пылевой частицы в плазме смеси аргон-кислорода не увеличилось, значение суммарной энергии ионов также не возрастает, вследствие чего можно предположить, что развитый рельеф поверхности достигается в основном за счет химических реакций и процессов ассоциации атомов кислорода на поверхности пылевой частицы. Наименьшие значения плотностей потоков энергии и максимальное значение суммарной энергии ионов (кинетическая энергия и энергия рекомбинации) возникают в плазме неона, что отражается на степени модификации поверхностной структуры частиц при данных условиях экспозиции.

В четвертой главе приведена методика измерения и результаты масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы.

Цель данной части работы заключалась в проведении дополнительных экспериментальных исследований по анализу состава газовой среды комплексной плазмы, состоящей из частиц меламин-формальдегида методами масс-спектрометрии. Исследования проводились путем сравнения состава газовой среды без присутствия частиц в газоразрядной камере и после их инъекции в рабочий объем плазмы. Важно отметить, что масс-спектрометрические исследования проводились в момент когда частицы образовывали УППС, а не находились на стенках или основании камеры.

Условия проведения экспериментальных исследований по изучению масс-спектрометрического состава газовой среды комплексной плазмы отличались от тех, в которых проводились исследования по модификации поверхности частиц, составлявших

УППС. Главной задачей являлось создание условий, при которых концентрация частиц в рабочем объеме плазмы была максимальной. Чтобы достичь данного параметра, в экспериментах использовались частицы меламина-формальдегида размеры которых составляли $D=1.31 \pm 0.07$ мкм. Основные параметры эксперимента приведены в таблице 5. На рисунках 8 и 9 представлены масс-спектры состава газовой среды аргон-кислородной плазмы с частицами меламина-формальдегида (MF-R) и в отсутствие их.

Таблица 5. Основные параметры эксперимента.

Разряд	радиочастотный разряд (RF)
Частицы	MF-R, диаметр $D = 1.31 \pm 0.07$ мкм
Газ	Готовая смесь Ar-O ₂ (90%-Ar, 10%-O ₂)
Проток газа (ссм)	0.08
Прикладываемая мощность разряда (W)	~ 1.6
Давление в камере (mbar)	0.36
Давление в масс-спектрометре (mbar)	1.5×10^{-5}
Время измерений (мин)	60

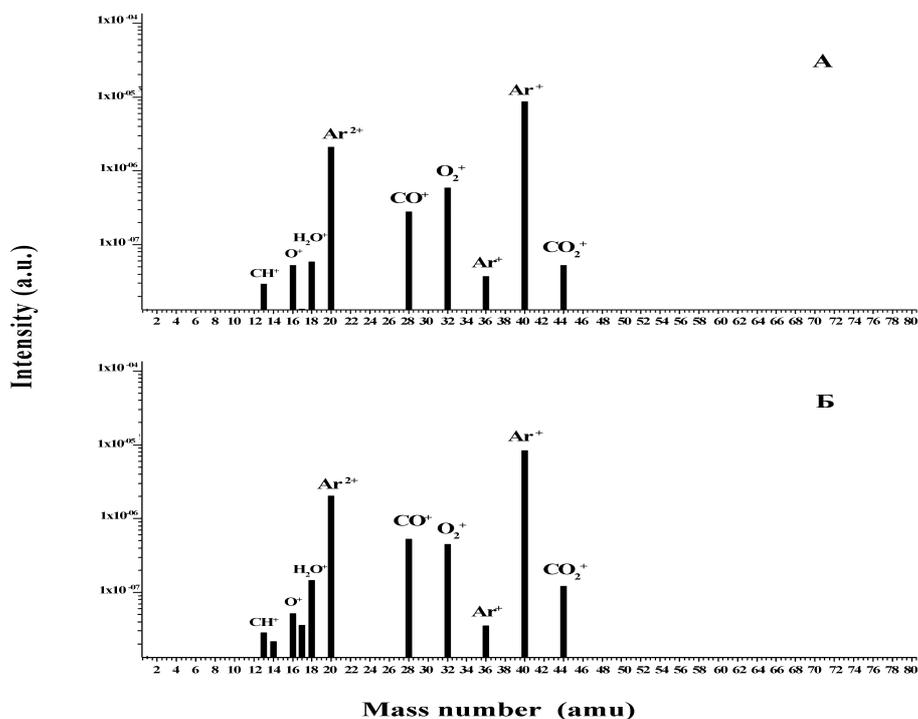


Рис. 8 Масс-спектр Ar-O₂ плазмы без частиц.

(А) - в начальный момент времени, (Б) - через 1 час экспозиции.

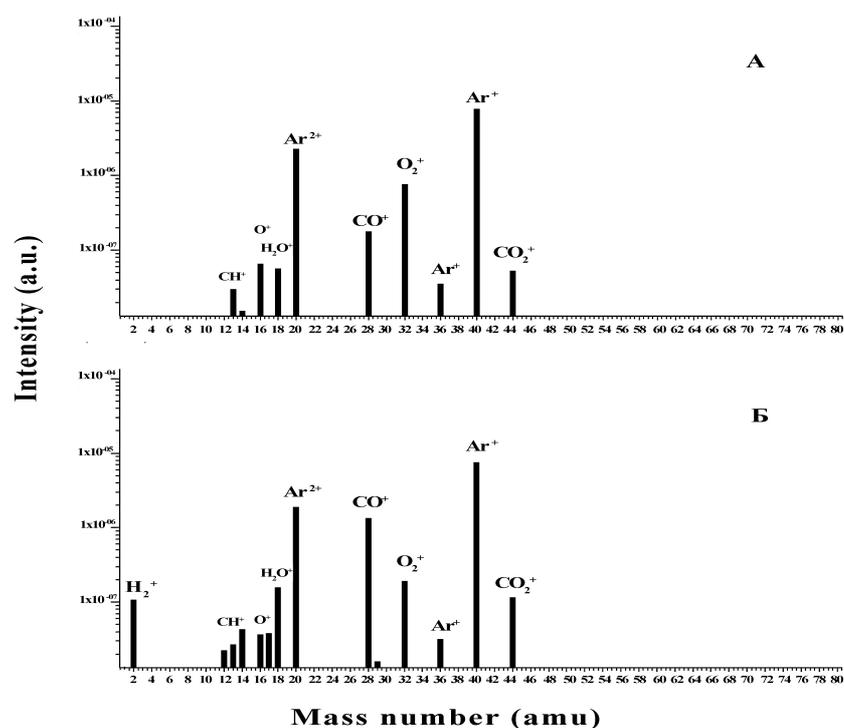


Рис. 9 Масс-спектр Ar-O₂ плазмы с частицами меламина-формальдегида (MF-R).
(А) - в начальный момент времени, (Б) - через 1 час экспозиции.

В результате исследования в спектре масс с присутствием частиц в плазме, в отличие от спектра масс плазмы без частиц, можно отметить присутствие новых пиков, интенсивность которых не была столь высока: водород (H_2^+ : m/e = 2 а.е.м.), углерод (C^+ : m/e = 12 а.е.м.), этила ($\text{CH}_2\text{-CH}_3$ (C_2H_5^+): m/e = 29 а.е.м.) [20-23]. Также стоит отметить значительное изменение некоторых масс в спектре: уменьшение кислорода (O_2^+ : m/e = 32 а.е.м.) в 1.46 раза и кислорода (O^+ : m/e = 16 а.е.м.) в 1.35 раза, уменьшение радикала OH^+ (OH^+ : m/e = 17 а.е.м.) в 3.06 раза, и увеличении количества углекислого газа (CO^+ : m/e = 28 а.е.м. и CO_2^+ : m/e = 44 а.е.м.). Однако, величина отношения интенсивностей данных масс углекислого газа приблизительно схожа с величиной отношения интенсивностей масс в отсутствии частиц в камере. Уменьшение содержания кислорода возможно связано с образованием кислород-содержащих комплексов, концентрация которых находится на пределе чувствительности прибора.

В период экспозиции частиц в плазме в масс-спектре наблюдались летучие молекулярные фрагменты углеводородов (C_2H_5^+ , C^+) и водорода (H_2^+), которые были высвобождены с поверхности частиц под действием энергетических компонентов плазмы. Это вызвано такими физическими процессами как разрыв химических связей под действием ионной компоненты плазмы или энергетической метастабильностью, а также процессами химического травления, индуцированных реактивными радикалами и атомами в плазме. Данные о величине энергии и длине химической связи в молекуле меламина-формальдегида [26] подтверждают возможность разрыва и образования фрагментов, которые были детектированы в масс-спектре.

В пятой главе приведены результаты исследования состава материала частиц меламина-формальдегида после их экспозиции в комплексной плазме методом

спектроскопии комбинационного рассеяния в сравнении с эталонными образцами частиц. В измерениях использовался спектрометр с опорным пучком, длина волны которого составляла 532 нм и диаметр 0.7 мкм. Мощность лазера –20 мВт. Спектральный диапазон измерений 100 - 4000 см^{-1} , погрешность измерений составила $\pm 3 \text{ см}^{-1}$. На рисунке 10 представлены спектры образцов частиц после 60 минут экспозиции в плазме при различных видах плазмообразующего газа относительно эталона (кривая 1).

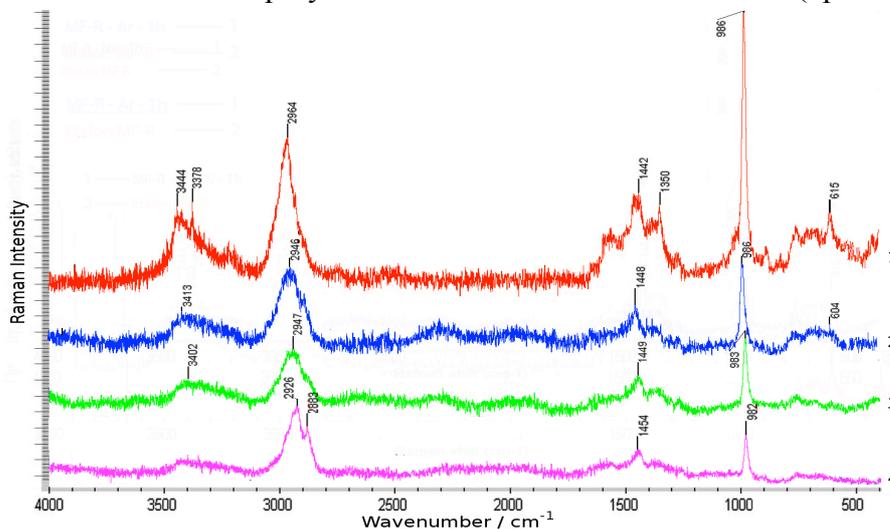


Рис. 10 Спектры комбинационного рассеяния частиц меламина-формальдегида в сравнении с эталонными спектрами – (1) и после 60 минут экспозиции в плазме: (3) – аргона, (2) – неона, (4) – смеси аргон-кислорода.

На основании полученных спектров комбинационного рассеяния можно сделать вывод, что под действием компонентов плазмы, происходит частичное разрушение частиц меламина-формальдегида. Этот вывод подтверждается уменьшением интенсивности частот, соответствующих как формальдегидной С-Н (2960), так и меламиновой С-Н и N-N-связям в спектре комбинационного рассеяния (1443, 1517, 1556, и 1574 см^{-1} [24]).

Диапазон частот 970-990 см^{-1} , связанный с колебаниями триазинового кольца в молекуле меламина-формальдегида, претерпевает наиболее значительные изменения. В то время, когда наибольшие изменения спектров для всех образцов наблюдаются после воздействия плазмы аргона и смеси аргон-кислорода, для частиц, подвергающихся воздействию плазмы неона эти изменения являются менее выраженными. Можно предположить, что частичное разрушение поверхности частиц меламина-формальдегида может быть связано с бомбардировкой ионами плазмы и их дальнейшей рекомбинацией на поверхности, а также усилено небольшой долей поглощения УФ-излучения [25] и локальным нагревом поверхности частиц в плазме [16]. Данные факторы будут приводить к активации валентных электронов у атомов углерода, водорода и азота, которые образуют ковалентные связи в молекуле, способствуя, тем самым, их ослаблению. Это, в свою очередь, может привести к разрушению химических связей под действием ионной бомбардировки в плазме. В этом случае, можно ожидать разрушение, в первую очередь, самых слабых связей, которой, например, является С-N связь с энергией связи 2.3-2.4 эВ [26], в отличие от связей С-Н или N-H с энергиями связи ~ 3.8 и 3.6 эВ [26] соответственно. Возможно, именно поэтому наиболее значительное снижение

интенсивности в спектрах наблюдается в области, соответствующей триазиновому кольцу, содержащему три C-N связи.

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются основные выводы и результаты проведенных исследований.

Основные результаты и выводы диссертационного исследования состоят в следующем.

1. В ходе работы были разработаны и экспериментально опробованы специальные методики, позволяющие решить поставленные задачи, а именно:

- экспериментальный метод модификации поверхности частиц меламин-формальдегида, составляющих УППС в низкотемпературной плазме аргона, неона, смеси аргон-кислорода; сформулированы ограничения и условия применимости данного метода;
- методика извлечения проэкспонированных в плазме образцов частиц, составлявших УППС, а также способ специальной подготовки проэкспонированных в плазме образцов частиц для дальнейшего исследования с помощью методов атомно-силовой микроскопии;
- методика исследования поверхностной структуры сферических микрочастиц с помощью атомно-силового микроскопа; выработаны критерии сравнения и анализа поверхностной структуры частиц до погружения в плазму и после извлечения из нее при исследовании экспериментальных образцов в атомно-силовом микроскопе; адаптирован математический метод триангуляции расчета фрактальной размерности поверхности частиц меламин-формальдегида, составлявших УППС в условиях комплексной плазмы, по результатам АСМ изображений;
- метод масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы; сформулированы ограничения и условия применимости разработанного метода;
- метод исследования состава и структуры частиц, составлявших УППС с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния; разработана методика фильтрации полученных спектров от фона подложки и фиксирующего частицы состава, позволяющая выявить основные спектральные линии, характерные для материала меламин-формальдегида.

2. В результате экспериментальных исследований были получены и проанализированы данные о модифицированной поверхности частиц меламин-формальдегида, составлявших УППС в комплексной плазме тлеющего разряда при малых плотностях постоянного тока ($19-94 \text{ мкА/см}^2$) и низких давлениях газа (30-40 Па) в зависимости от сорта плазмообразующего газа (аргон, неон, смесь аргон-кислород (Ar-90%, O₂-10%)) и времени экспозиции частиц в плазме (10, 20, 40, 60 минут).

3. Получены численные данные о модифицированной поверхностной структуре и свойствах микрочастиц меламин-формальдегида, характере и степени изменения поверхности частиц, проэкспонированных в плазме. Показано, что менее всего заметны различия в величине высот поверхностных шероховатостей у образцов частиц, экспонируемых в плазме неона, по сравнению с эталонными образцами. Однако, сам характер поверхностных глобул заметно меняется, образуя в ряде случаев протяженные (гантелеобразные) объекты, в то время как у эталонных образцов такой структуры поверхностных глобул не наблюдалось. Кривые зависимости параметров шероховатости поверхности частиц меламин-формальдегида от времени их экспозиции качественно подобны для различных плазмообразующих газов. В целом характер поверхности имеет

сходную структуру до 40 минут экспозиции в плазме, а при 40 и 60 минутах экспозиции различия в шероховатостях поверхности частиц становятся более заметными (шероховатость поверхности за 60 минут экспозиции увеличивается в среднем на 2.2 ± 0.3 нм). Графики зависимости параметров асимметрии и эксцесса, наиболее полно характеризующих степень изрезанности профиля, от времени экспозиции проявляют схожесть своего вида для всех трех плазмообразующих газов. Так значение параметра асимметрии увеличивается за 1 час экспозиции в плазме аргона на 0.26, неона – на 0.21, и смеси аргон-кислорода – на $0.45 (\pm 0.03)$.

4. Определено изменение диаметра частиц меламин-формальдегида после экспозиции в плазме в течение 60 мин. Измерения показали, что в данных условиях размеры частиц уменьшились: в неоне на 70-90 нм, в аргоне на 190-230 нм, в смеси аргон-кислорода на 290-350 нм.

5. По результатам расчетов фрактальной размерности рельефа поверхности частиц меламин-формальдегида проведена оценка реальной площади поверхности просканированных участков, а также рассчитана реальная площадь всей поверхности, которую приобретают частицы после погружения в плазму в зависимости от длительности их экспозиции и вида плазмообразующего газа. Расчеты показали, что реальная площадь просканированных участков поверхности в среднем в 25 раз больше видимой топологической площади и возрастает с ростом времени экспозиции частиц в плазме.

6. Изменение рельефа поверхности частиц происходит за счет взаимодействия с активными компонентами плазмы. Математические оценки плотности потоков энергии активных компонентов плазмы на поверхность частиц показывают, что наибольший поток энергии, приходящий на поверхность в данных плазмообразующих газах, достигается за счет рекомбинации ионов. При этом суммарный поток энергии на поверхность частиц в плазме аргона более чем в 2 раза превосходит суммарный поток энергии в плазме неона. По данным расчетов температура поверхности частицы составила 330 ± 5 К в плазме аргона и 309 ± 5 К в плазме неона. Для плазмы смеси аргон-кислорода значение температуры поверхности частицы составила 324 ± 10 К, а значение суммарной энергии ионов составило 15.1 эВ. Добавка кислорода в смеси газов аргон-кислорода принципиально меняет состав и транспортные свойства плазмы, преобразуя ее из электрон-ионной в ион-ионную. Вместе с тем значение температуры поверхности пылевой частицы в плазме смеси аргон-кислорода не увеличилось, значение суммарной энергии ионов также не возрастает, вследствие чего можно предположить, что развитый рельеф поверхности достигается в основном за счет химических реакций и процессов ассоциации атомов кислорода на поверхности пылевой частицы.

7. Получены экспериментальные данные масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы с упорядоченными плазменно-пылевыми структурами, состоящими из частиц меламин-формальдегида. Полученные спектры масс указывают на выделение отдельных элементов и небольших химических соединений из состава материала частиц, которые образуют другие более устойчивые химические соединения уже непосредственно в самой газоразрядной камере. В частности, в период экспозиции частиц в плазме в масс-спектре наблюдались летучие молекулярные

фрагменты углеводородов ($C_2H_5^+$, C^+) и водорода (H_2^+), которые были высвобождены с поверхности частиц под действием энергетических компонентов плазмы.

8. Исследования структуры и свойств материала частиц меламина-формальдегида после их экспозиции в комплексной плазме методом спектроскопии комбинационного рассеяния показали, что под действием компонентов плазмы происходит частичное разрушение частиц меламина-формальдегида, на что указывает факт уменьшения интенсивности пиков на частотах, соответствующих химическим связям как формальдегидной (C-H), так и меламиновой (C-N и N-H) части структуры частиц. При этом пик в диапазоне частот $970 - 990 \text{ см}^{-1}$, связанный с колебаниями триазинового кольца в молекуле меламина-формальдегида, претерпевает наиболее значительные изменения. Наибольшие изменения спектров для всех образцов наблюдаются после воздействия плазмы аргона и смеси аргон-кислорода, тогда как для частиц, подвергающихся воздействию плазмы неона, эти изменения являются менее выраженными.

9. Учитывая полученные экспериментальные данные можно сделать вывод о том, что при данных малых значениях параметров плазмы тлеющего разряда энергии ее активных компонентов достаточны для разрушения химических связей в частицах полимера меламина-формальдегида при их экспозиции в составе УППС. Также схожесть картины поверхностного рельефа относительно большого набора частиц при различных временах экспозиции свидетельствует о возможности получения всесторонне-модифицированной поверхности частиц при подобном размещении их в составе упорядоченных структур и быть основой для реализации нового подхода для модификации вещества в плазме.

10. Результаты исследований могут служить экспериментальной базой для более глубокой проработки и развития теории комплексной плазмы с целью определения новых свойств упорядоченных плазменно-пылевых структур в зависимости от компонентного состава плазмы, условий их формирования и зарядки, а также процессов деструкции вещества в данных условиях, что является важным для широкого круга практических задач. Кроме того, в работе продемонстрирована возможность реализации нового подхода поверхностной модификации в низкотемпературной плазме инертных газов малых объектов и веществ, которые невозможно всесторонне модифицировать другими способами и методами. Результаты масс-спектрометрических исследований состава газовой среды комплексной плазмы имеют важное значение для проведения экспериментов в условиях микрогравитации при использовании закрытых газоразрядных камер и трубок.

Публикации по теме диссертации

В журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1) Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И., Величко А. А. Исследование модификации поверхности частиц плазменных кристаллов. // Физическое образование в вузах. Приложение. Труды конференции – конкурса молодых физиков. Под редакцией Н. В. Калачева и М. Б. Шапочкина, – 2009.–Т.15. –№1.– С. 48-49.

2) Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И., Пискунов А. А., Жариков Н. Е., Подрядчиков С. Ф. Модификация свойств плазменно-пылевых структур и микрочастиц в

комплексной плазме. // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, – 2010. – №6. – С. 99-108.

3) Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И., Величко А. А. Поверхностная и объемная модификация микрочастиц меламина-формальдегида (MF-R), взвешенных в комплексной плазме. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - Наука, – 2012. – № 2. – С. 1-8.

4) Семенов А. В., Пергамент А. Л., Пустыльник М. Ю. Масс-спектрометрические исследования состава газовой среды комплексной плазмы с частицами меламина-формальдегида // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. - Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, – 2012. – № 8. – С. 99-102.

5) Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И., Величко А. А. Пылевая плазма как новый способ всесторонней модификации поверхности микро- и наноразмерных частиц для биомедицинских приложений. // Физическое образование в вузах. Приложение. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 33.

6) Семенов А. В., Пергамент А. Л., Щербина А. И., Пикалев А. А. Исследование модификации поверхности микрочастиц меламина-формальдегида (MF-R) в комплексной плазме. // Прикладная физика, – 2016. – № 2. – С. 57-61.

7) Semenov A. V., Pergament A. L., Pikalev A. A. Raman spectroscopy of melamine-formaldehyde resin microparticles exposed to processing in complex plasma. // Journal of Raman Spectroscopy, 2016, DOI: 10.1002/jrs.4958. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4958/abstract>

В других изданиях:

1) Пискунов А. А., Подрядчиков С. Ф., Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И. Экспериментальные исследования феномена упорядоченных пылевых структур в комплексной плазме. // Физическая электроника: Материалы V Всероссийской конференции ФЭ-2008. – Махачкала: ИПЦ ДГУ, – 2008. – С. 298.

2) Khakhaev A. D., Semenov A. V., Sherbina A. I., Velichko A. A. Surface research of plasma crystal particles // 19 International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC -19), Bochum, – 2009. – С.594.

3) Семенов А. В. Исследование деструкции частиц меламина-формальдегида (MF-R) в условиях упорядоченных плазменно-пылевых структур. // Материалы 61-й научной студенческой конференции. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, – 2009. – С. 205.

Список цитируемой литературы

1. Дзалиева Е. С., Ермоленко М. А., Карасев В. Ю. Анализ размеров и формы полидисперсных пылевых частиц в комплексной плазме в тлеющем разряде. //Журнал технической физики,– 2012.– Т. 82. – Вып. 7.– С. 51-55.
2. Samarian A. A., Vaulina O. S., Nefedov A. P., Petrov O. F., Denisenko A. I. Optical Diagnostics of Plasma and Particle in an Atmospheric Pressure Dusty Plasma. //Phys. Scr., – 2002. – V.66.– Pp. 82.
3. Block D., Melzer A., Imaging Diagnostics in Dusty Plasmas. //Introduction to Complex Plasmas Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, – 2010. – V.59. – Pp. 135-153.
4. Morfill G. E., Thomas H. M., Konopka U., Rothmel H., Zuzic M., Ivlev A., Goree J. Condensed Plasmas under Microgravity. // Phys. Rev. Lett. 83, – Pp.1598
5. Svirachev D. M., Tabaliov N. A. Plasma Treatment of Polymer Surfaces in Different Gases. //Bulg. J. Phys. –2005. –№32. – Pp. 22–33.

6. Slepíčka P., Trostová S., Slepíčková Kasálková N., Kolská Z., Sajdl P., Švorčík V. Surface Modification of Biopolymers by Argon Plasma and Thermal Treatment. //Plasma Processes and Polymers –2012. – V. 9, – № 2, – Pp. 197–206.
7. Rachel M., Thurston John D., ClayMichael D. Schulte Effect of Atmospheric Plasma Treatment On Polymer Surface Energy and Adhesion. //Journal of Plastic Film and Sheeting –2007. –V.23. –№1. – Pp. 63-78.
8. Фортов В. Е., Якубов И. Т. Неидеальная плазма. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
9. Thomas H., Morfill G. E., Demmel V. et. al //Phys. Rew. Lett. –1994. –V. 73. – Pp. 652.
10. Фортов В. Е., Владимиров В. И., Депутатова Л. В., Молотков В. И., Нефедов А. П., Рыков В. А., Торчинский В. М., Худяков А. В. //Доклады Академии Наук. – 1999. – Т. 366. – С. 1.
11. Нефедов А. П., Петров О. Ф., Фортов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц. //УФН. – 1997. – Т. 167. – № 11. – С. 1215 - 1226.
12. Библиотека международных стандартов [электронный ресурс] /Режим доступа: <https://www.asme.org/products/codes-standards/b461-2009-surface-texture-surface-roughness>
13. Библиотека международных стандартов [электронный ресурс] /Режим доступа: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=10132
14. Библиотека ГОСТов [электронный ресурс] /Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/43/43751.shtml>
15. Торхов Н.А., Божков В.Г., Ивонин И.В., Новиков В.А. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе. //Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 3.
16. Maurer H.R., Kersten H. On the heating of nano- and microparticles in process plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. – V. 44. – №. 17, Pp. 174029.
17. Фортов В. Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.. Пылевая плазма. Успехи физических наук. –2004. – Т. 174. – №5. – С. 495-544.
18. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 75th ed., edited by P. R. Lide and H. P. R. Frederikse CRC, Boca Raton, FL, – 1994.
19. Клумов Б.А., Ивлев А. В., Морфилл Г. Е., Роль отрицательных ионов в экспериментах с комплексной плазмой. //Письма в ЖЭТФ. – 2003. – Т. 78. – № 5. – С. 747–752.
20. Beynon J. H., Mass Spectrometry and its Applications to Organic Chemistry, Elsevier, Amsterdam – 1960. – V. 83. – №.12. – Pp. 2787–2787.
21. Budzikiewicz H., Djerassi C., and Williams D. H., Mass Spectrometry of Organic Compounds, Holden-Day Inc., San Francisco – 1968. – V. 57. – № 2. – P. 355.
22. Hill H. C., Introduction to Mass Spectrometry, Heyden, London – 1966.
23. McLafferty F. W., Benjamin W. A. Interpretation of Mass Spectra. //Inc., New York –1966.
24. Marchewka M. K., Pietraszko A., Feki H., Abid Y. Crystal structure and vibrational spectra of melaminium 2,5-dinitrophenolate monohydrate: FT-IR, FT-Raman and quantum chemical calculations. //Vibrational Spectroscopy. – 2011. – V.56 – Pp. 255–264.
25. Jablonowski H., Bussiahn R., Hammer M. U., Weltmann K. -D., Th. von Woedtke, Reuter S. Impact of plasma jet vacuum ultraviolet radiation on reactive oxygen species generation in bio-relevant liquids. //Physics of plasmas. – 2015. – №22. – Pp. 122008-1-122008-11.
26. Краткий справочник физико - химических величин под редакцией К.П. Мищенко и А. А. Равделя. – Л.: Химия, – 1974.

Подписано в печать 02.08.2016. Формат 60x841/16.
Бумага офсетная. Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Изд. № 380.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Отпечатано в типографии Издательства ПетрГУ
Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.