

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

На правах рукописи

Йе Хлаинг Тун

**Генерация и свойства электронно-пучковой плазмы вблизи
поверхности твёрдых тел и жидкости**

Специальность: 01.04.08 – «Физика плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Долгопрудный – 2021 г.

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

Научный руководитель: **Васильев Михаил Николаевич**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой логистических систем и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

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

Защита состоится «16» декабря 2021 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета ФАКТ.01.04.08.005 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

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

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

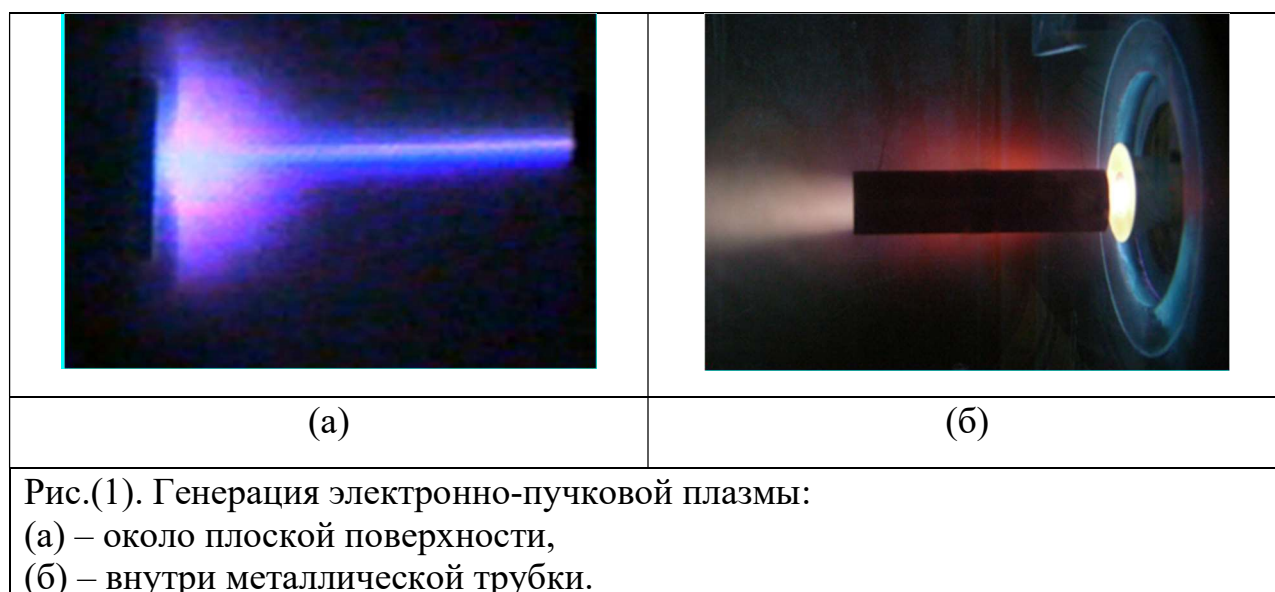
Введение

Актуальность работы: Уже более двух десятилетий ведутся исследования, нацеленные на разработку плазмотехнических систем, в которых плазма возбуждается электронными пучками (Electron-Beam Generated Plasma) при их взаимодействии с достаточно плотной газообразной средой. Рассматриваются применения таких систем в производственных, аэрокосмических технологиях, а также для решения медико-биологических и экологических задач. При этом эффективно используются уникальные свойства пучково-плазменных систем – возможность генерации больших объемов сильнонеравновесной химически активной плазмы практически любых газов. Обычным диапазоном рабочих давлений для таких систем являются давления форвакуумного диапазона (0,1-100 Торр), а температура газовой среды может варьироваться в весьма широком диапазоне в зависимости от мощности электронного пучка, используемого для генерации плазмы, и от особенностей решаемой технической задачи.

Наиболее успешно продвинулись разработки пучково-плазменных реакторов, предназначенных для плазмохимической модификации материалов со сложной молекулярной структурой, таких синтетические и природные полимеры (биополимеры), поскольку именно эти соединения оказались наиболее восприимчивыми к многофакторному воздействию электронно-пучковой плазмы. Для таких задач возникает принципиальное ограничение на температуру реакционного объема, так как большинство органических и биологических материалов не выдерживают сколько-нибудь заметного нагрева. В плазмохимических реакторах, предназначенных для обработки термолабильных материалов, удастся использовать одно из наиболее значимых преимуществ электронно-пучковой плазмы – высокую химическую активность при низких, вплоть до комнатных, температурах. Химическая активность достигается интенсивной наработкой атомов, ионов, и радикалов при достаточно высоких давлениях, недоступных большинству известных генераторов холодной плазмы.

При этом весьма полезной оказалась совместимость электронных пучков с другими источниками химически активной плазмы, например газоразрядными системами форвакуумного давления, что позволило создать особый класс плазмохимических реакторов – реакторов гибридного типа. В таких реакторах удастся в полной мере объединить преимущества электронно-пучковой и газоразрядной плазмы и добиться высокой управляемости реакционным объемом при давлениях, более высоких, чем в обычных газоразрядных системах.

Важной особенностью пучково-плазменных систем является то обстоятельство, что в большинстве прикладных задач имеет место контакт электронно-пучковой плазмы с какой-либо поверхностью, например, с поверхностью обрабатываемого изделия (см. рис.1-а) или частиц аэрозоля, если обработке подвергаются материалы в виде порошков или капелек жидкости. Плазма также может контактировать со сплошным слоем жидкости, если решается соответствующая технологическая задача. И наконец, в реальных плазмохимических реакторах плазма контактирует с внутренними стенками реакционной камеры, как показано на рисунке (1-б) на примере реакционной камеры цилиндрической геометрии.



Свойства электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности твердого тела или жидкости могут значительно отличаться от свойств плазмы, генерируемой в неограниченном пространстве, даже если параметры электронного пучка и характеристики плазмообразующей среды одинаковы. Это различие обусловлено физико-химическими процессами, которые происходят вблизи границы контакта плазма-поверхность, причем с обеих сторон этой границы. При конструировании пучково-плазменных реакторов чрезвычайно важным является учет реальной геометрии реакционной камеры и условий взаимодействия плазмы с поверхностью, например – наличие (или отсутствие) плазменного потока на границе раздела фаз.

Таким образом, разнообразие физико-химических процессов в условиях, когда происходит взаимодействие электронно-пучковой плазмы с

твердой или жидкой поверхностью в реакционных объемах реальных плазмохимических реакторов, определяет сложность физических и технических задач, решаемых при проектировании таких устройств и отработке технологий, основанных на их применении. Именно это определяет актуальность темы диссертационной работы, в которой экспериментально изучаются процессы генерации приповерхностной электронно-пучковой плазмы и исследуются некоторые ее свойства, важные с точки зрения приложений.

Цели диссертации. Целью настоящей работы является накопление, анализ и обобщение экспериментальных данных о формировании приповерхностной электронно-пучковой в газовых, парогазовых и двухфазных газожидкостных системах применительно к конструированию и испытаниям пучково-плазменных плазмохимических реакторов с реакционными камерами различных конструкций, которые предназначены для обработки твердых, жидких и порошкообразных материалов и изделий.

Задачи исследования:

1. Разработать специализированные блоки для существующей экспериментальной установки с целью изучения процессов, которые протекают вблизи поверхности мишеней и элементов конструкции реакционных камер пучково-плазменных реакторов и сопровождаются эмиссией теплового и оптического излучения. Отработать методики проведения экспериментов.
2. Изучить нагрев элементов конструкций реакционных камер и плазмообразующей среды в различных режимах работы пучково-плазменного реактора, выявить зависимость температурных полей в реакционных камерах от ключевых параметров, характеризующих рабочие режимы реакторов.
3. Изучить оптическое излучение, генерируемое внутри и вне реакционных камер, изготовленных из различных материалов, применительно к задачам оптической диагностики реакционного объема и неконтактного измерения температуры стенок реактора.
4. Доказать возможность генерации электронно-пучковой и гибридной плазмы вблизи поверхности диэлектрической жидкости.
5. Экспериментально изучить неоднородности, которые могут возникать в реакционных объемах при генерации электронно-пучковой плазмы в однофазных и двухфазных плазмообразующих средах.

Научная новизна проведенного исследования заключается в том, что полученные результаты экспериментально подтвердили принципиально

важное предположение: газ (неподвижный или газовый поток), находящийся в реакционной камере, нагревается за счет теплообмена с горячими стенками реакционной камеры или нагретыми элементами ее внутренней оснастки. В свою очередь, стенки и внутренние элементы камеры нагреваются в результате бомбардировки быстрыми электронами пучка. В условиях наших экспериментов прямым нагревом газа электронным пучком при его релаксации в чистом газе можно пренебречь, и температуру в приповерхностном слое ЭПП чистого газа можно считать приблизительно равной температуре поверхности твердого тела, контактирующей с плазмой. В электронно-пучковой плазме, содержащей конденсированную дисперсную фазу, это предположение может оказаться верным лишь в части, касающейся плазмы вблизи поверхности отдельных частиц КДФ.

Было также установлено, что приповерхностная электронно-пучковая плазма является оптически тонкой в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. Это обосновывает применимость оптических методов, в том числе оптической пирометрии и эмиссионной спектроскопии, для исследования процессов в пристеночных слоях плазмы и плазмохимических реакций на поверхности обрабатываемого материала.

В экспериментах с приповерхностной электронно-пучковой плазмой локализованной внутри цилиндрического диэлектрического контейнера, обнаружено образование ярких неподвижных или медленно движущихся периодических структур, похожих на страты в тлеющем газовом разряде, которые имеют поперечные размеры, равные диаметру контейнера. Ранее такие структуры наблюдались только в неограниченном объеме пучковой плазмы и имели характерный размер, приблизительно равный диаметру рассеивающегося пучка.

Был также обнаружен эффект развития зоны горения приповерхностной плазмы в широком (вплоть до ≈ 50 мм) зазоре между мишенью и заземленным вспомогательным электродом.

Практическая значимость работы

Эксперименты по исследованию генерации и свойств приповерхностной плазмы дают ценную информацию для конструирования пучково-плазменных реакторов с реакционными камерами, изготовленными проводящих и диэлектрических материалов.

Установленный в экспериментах факт, что приповерхностная электронно-пучковая плазма является оптически тонкой, обосновывает применимость неконтактных измерений температуры для мониторинга процессов на поверхности материалов в процессе их плазмохимической обработки.

Успешно проведенные эксперименты по генерации электронно-пучковой и комбинированной плазмы над поверхностью жидкого диэлектрика открывают возможности создания плазмохимических реакторов застойного и проточного типов для пучково-плазменной обработки жидкостей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты модернизации существующей установки, которые обеспечили проведение экспериментов по генерации электронно-пучковой плазмы в пристеночных областях реакционных камер плазмохимических реакторов, предназначенных для обработки твердых материалов, жидкостей и газожидкостных смесей:
 - в коаксиальной и планарной конфигурации реакционной камеры;
 - в неподвижной плазме и в плазменном потоке;
 - при инъекции непрерывного и импульсно-периодического электронного пучка.
2. Результаты исследования температурных полей в пристеночных зонах реакционных камер пучково-плазменных реакторов и влияния на эти поля:
 - давления плазмообразующего газа;
 - интенсивности прокачки плазмообразующей среды через реакционную камеру.
3. Экспериментальное доказательство предположений о том, что:
 - нагрев газа в приповерхностном слое электронно-пучковой плазмы происходит за счет теплоотдачи от нагреваемой бомбардировкой быстрыми электронами твердой поверхности (стенок реакционной камеры или обрабатываемого материала);
 - приповерхностная плазма является оптически тонкой в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах.
4. Результаты экспериментов по генерации электронно-пучковой и комбинированной плазмы над поверхностью жидкого диэлектрика:
 - в неподвижном плазмообразующем газе;
 - при обдуве поверхности жидкого диэлектрика потоком плазмообразующего газа.
5. Результаты экспериментов, в которых наблюдались нестационарные явления, сопровождавшиеся:
 - образованием ярких неподвижных или движущихся периодических структур, похожих на страты в тлеющем газовом разряде;
 - развитием зоны горения приповерхностной плазмы в широком зазоре между мишенью и торцевой стенкой реакционной камеры.

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

1. 12-ая конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва. ВЦ, Сокольники, 2017.
2. VIII Международный симпозиум «Теоретическая и прикладная плазмохимия», г. Иваново, Россия, 2018.
3. 61-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2018.
4. 14-ая Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», (Москва, 2019).
5. Ежегодный саммит молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки», Университет СИРИУС (Сочи), 2019.
6. 62-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2019.
7. 27-я научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (ТОК «Судак», Республика Крым, 2020).
8. 15-ая Международная выставка вакуумного и криогенного оборудования, Москва, Россия, 2020.
9. 63-ая Всероссийская научная конференция, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия, 2020.

Публикации: По теме диссертационного опубликовано 11 работ, из них 5 статей - в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из них 1 статья - в изданиях, индексируемых в международных базах данных (SCOPUS). Доклады, сделанные на российских и международных конференциях, опубликованы в 5 сборниках.

Личный вклад соискателя заключается в следующем:

- автор непосредственно участвовал в планировании и постановке экспериментов, в выборе методик их проведения; им была получена значительная часть экспериментальных данных, проведен их анализ и обобщение;
- автор выполнил вычислительные эксперименты, позволившие существенно уменьшить объем и снизить трудоемкость физических экспериментов; автором сформулированы выводы и рекомендации по

практическому использованию результатов диссертационного исследования.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и список литературы. Общий объем диссертации 99 страниц, включая 67 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

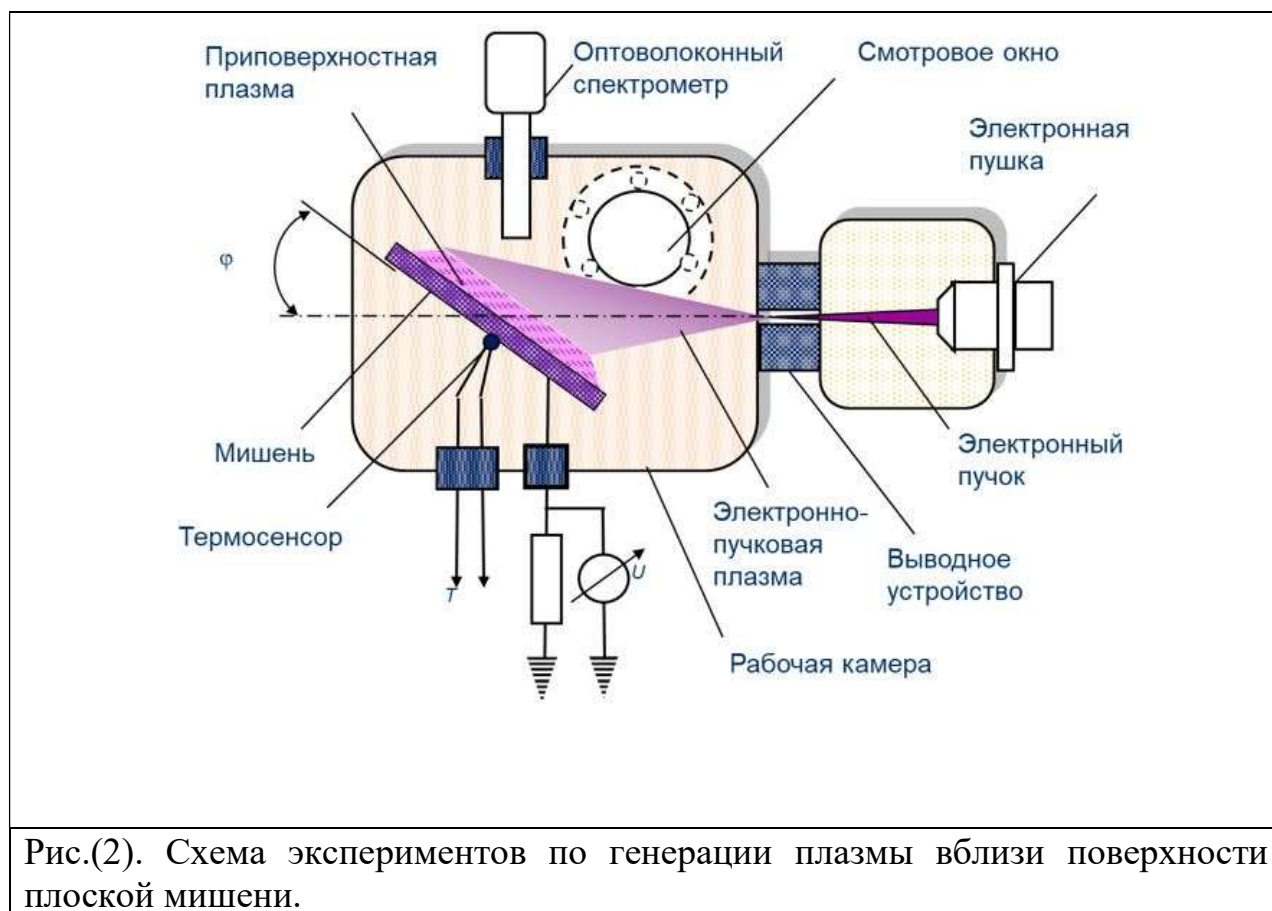
Первая глава содержит краткий обзор наиболее значимых работ, относящихся к тематике диссертационного исследования. При этом основное внимание было уделено работам, в которых рассматриваются физические и химические процессы, сопровождающие взаимодействие электронно-пучковой плазмы с поверхностью. Специальные разделы обзора посвящены приложениям электронно-пучковой плазмы, основанным на ее воздействии на компактные твердые тела, жидкости, двухфазные и многофазные среды.

В главе 2 на основании проделанного анализа современного состояния научно-технических проблем, относящихся к тематике диссертационного исследования, и доступной литературы конкретизирована цель работы и сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Охарактеризована научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены данные об апробации работы и публикациях автора, по теме диссертационного исследования.

В главе 3 описаны экспериментальная установка и методики проведения экспериментов. Общая постановка задачи экспериментального исследования иллюстрируется рисунком (2). Тонкий электронный пучок (ЭП), предварительно сформированный в высоковакуумной камере электронной пушкой, инжектируется в заполненную плазмообразующим газом рабочую камеру через выводное устройство (газодинамическое окно). Из-за упругих и неупругих процессов, сопровождающих распространение ЭП в газе, пучок рассеивается и деградирует. В результате, формируется облако

электронно-пучковой плазмы (ЭПП); в облако ЭПП может быть помещена плоская мишень, твердая или жидкая. Направление оси инжекции пучка образует угол φ с плоскостью мишени.

В ходе наших экспериментов измерялся потенциал металлической мишени U и ее температура T_w ; регистрировался спектр излучения приповерхностной плазмы на фоне спектральной люминесценции мишени и непрерывного спектра ее теплового излучения. Варьировались давление плазмообразующего газа P_m (в диапазоне 10^{-1} - $2 \cdot 10^1$ Торр) и ток пучка I_b (от 1,0 до 100 мА). Эксперименты проводились для различных углов φ в следующих газах: воздух, кислород, инертные газы (гелий, аргон), газообразные углеводороды (метан, пропан). Во время многих экспериментов велась видеозапись наблюдавшихся процессов.



Принципиальные схемы измерения температуры стенки реакционной камеры представлены на рис.(3). Рис.(3-а) иллюстрирует методику неконтактного измерения температуры T_w с помощью ИК-пирометра через окно из селенида цинка (ZnSe). Такая схема наиболее подходит для реакционных камер коаксиальной конфигурации без теплоизоляции внешней

поверхности. Для теплоизолированных камер в силу очевидных причин более удобными являются контактные измерения: миниатюрные термодатчики могут быть установлены в различных точках реакционной камеры, как показано на рис.(3-б).

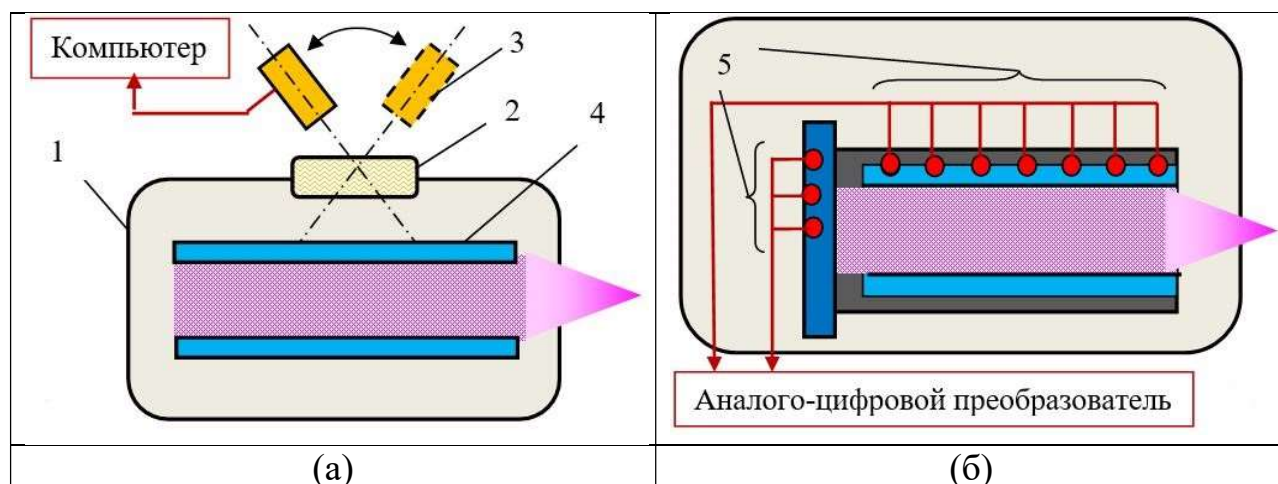


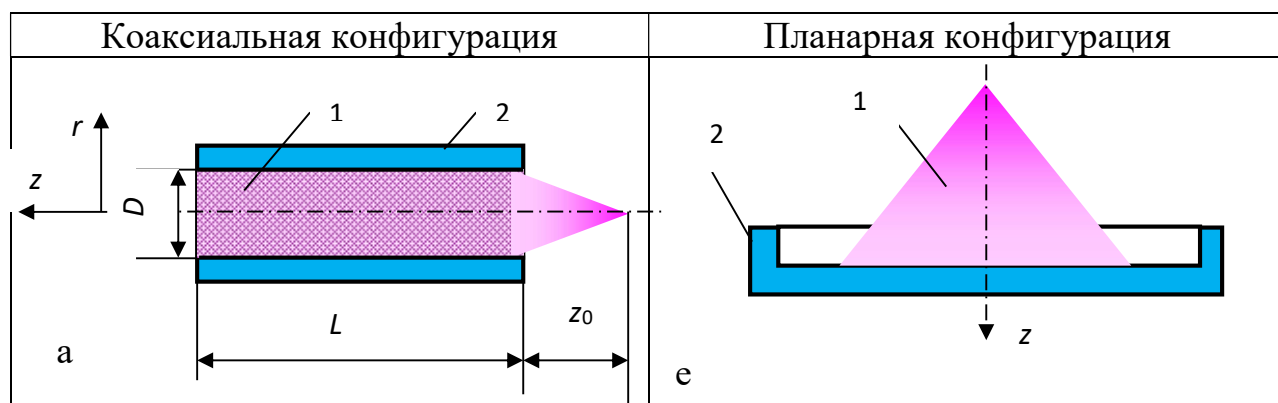
Рис.(3). Схема измерения температуры стенок реакционной камеры.

(а) – пирометрия, (б) – контактными термодатчиками:

(1) – рабочая камера, (2) – окно ZnSe, (3) – пирометр, (4) – реакционная камера, (5) – термодатчики.

Рис.(4) иллюстрирует варианты проведения экспериментов по исследованию приповерхностной ЭПП:

- в коаксиальной (а-д) и планарной конфигурациях (е-к);
- в неподвижном газе (а-в, е-з) и в газовом потоке (г, д, и, к);
- у твердой (а-е) и жидкой (ж-к) поверхности;
- при наложении внешнего электромагнитного поля (з, и).



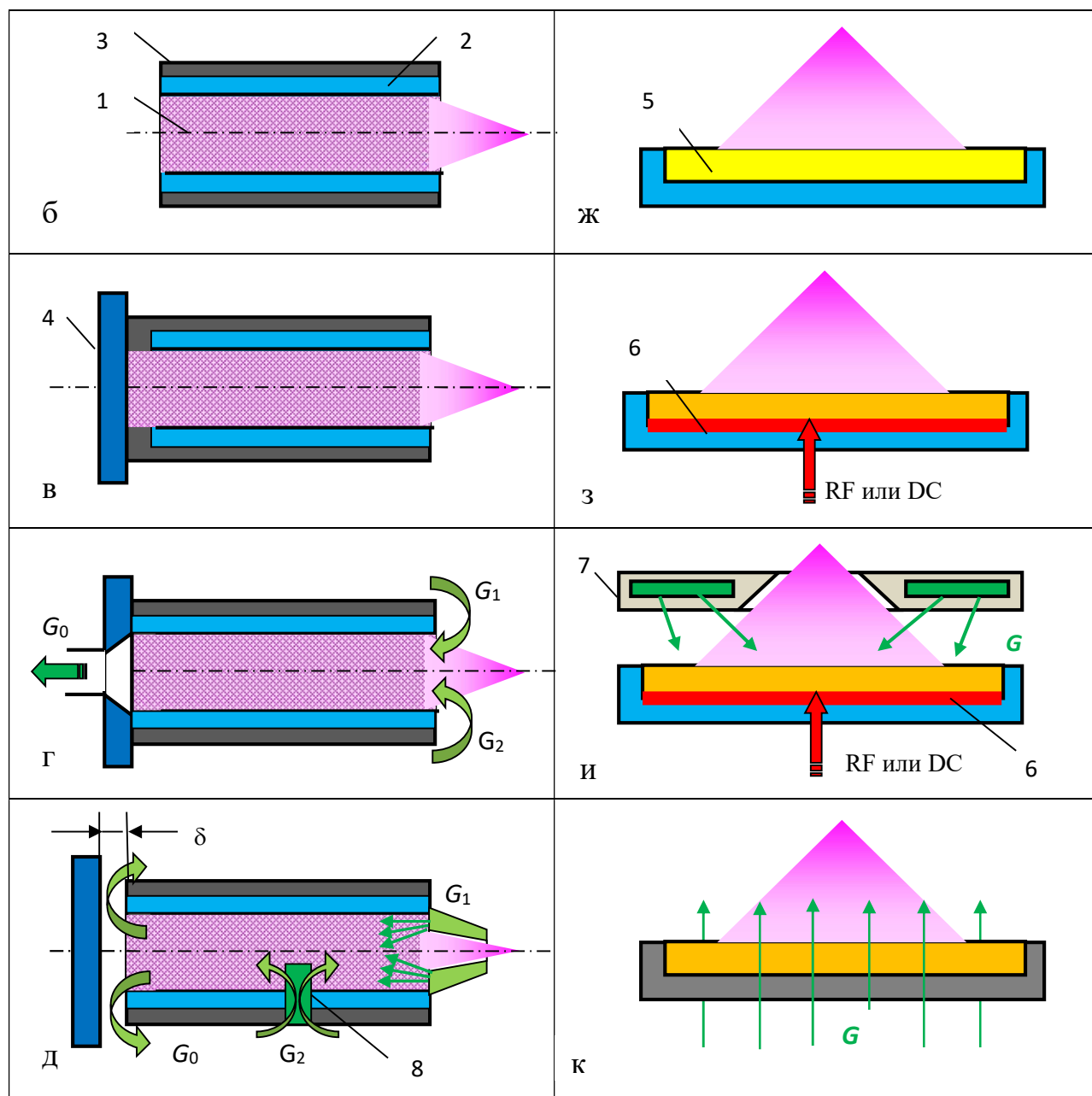


Рис.(4). Генерация плазмы в пучково-плазменном реакторе с коаксиальной (а-д) и планарной (е-к) конфигурацией реакционной камеры:

(1) – электронно-пучковая плазма, (2) – реакционная камера, (3) – теплоизоляция, (4) – торец реакционной камеры, (5) – жидкость, (6) – активный электрод, (7) – пассивный электрод, (8) – инжектор дополнительного газа, пара или жидкости.

В таблицах (1) и (2) сведена информация о всех приборах, которые использовались в наших экспериментах для тепловых и оптических измерений, а именно для исследования функций:

- $T_w(z)$ и $T_w(r)$, характеризующих нагрев реакционной камеры в различных условиях проведения экспериментов (координата z направлена вдоль оси инъекции ЭП, а координата r отсчитывается в направлении, перпендикулярном z);
- $B = B(P_m)$, $B_\lambda = B_\lambda(P_m)$, характеризующих интегральную B и спектральную B_λ интенсивности излучения ЭПП в зависимости от мощности инжестируемого пучка N_b , и давления плазмообразующего газа P_m .

Для оптических измерений применялись:

- спектральные приборы (большинство экспериментов проведено с использованием системы эмиссионной спектроскопии Avantes);
- широкополосные приемники излучения (фотодиоды и фотоумножители);
- эталонные источники света (вольфрамовая лампа и калибровочный источник системы Avantes).

Различные схемы проведения оптических измерений иллюстрируются рисунком (5).

Таблица (1). Состав и характеристики элементов системы измерения температуры стенок реакционной камеры.

Элемент	Марка, Изготовитель	Основные технические характеристики	
Инфракрасный пирометр	OptrisLS, OptrisGmbH,Germany	Диапазон измерений, °C	-35...900
		Спектральный отклик, μm	8...14
		Геометрическое разрешение, мм	1...16
Окно из селенида цинка	ООО«Электростекло», Россия	Диапазон пропускания, μm	3...14
		Размер, мм	50x5
		$\Delta P > 1$ бар	
Программное обеспечение	OptrisConnect, OptrisGmbH,Germany		
Термопары	W-Re 5/20, МЭЛЗ, Россия	Диапазон температур, °C	0...+1900
Терморезисторы	HEL-775AU,	Диапазон измерений, °C	-55...+150

	Honeywell,	Чувствительность	8,7 $\Omega/^{\circ}\text{C}$
	HRTS-5760-BHoneywell	Диапазон измерений, $^{\circ}\text{C}$	-200...+260
		Чувствительность	3,37 $\Omega/^{\circ}\text{C}$
	HRTS-61Honeywell	Диапазон измерений, $^{\circ}\text{C}$	-75...+425
		Чувствительность	3,3 $\Omega/^{\circ}\text{C}$

Таблица (2). Система эмиссионной спектроскопии Avantes, Нидерланды.

Элемент системы	Марка,	Основные технические характеристики	Фактический рабочий диапазон	Функция в системе
Спектрометр УФ- и видимого диапазона	AvaSpec-2048-2,	Волновой диапазон измерений: 200-1100 нм	350-950 нм	Регистрация спектров излучения и поглощения плазмы. Регистрация спектров люминесценции поверхности.
Фокусирующая коллимационная линза	UV/VIS/NIR	Диапазон пропускания 200-2500 нм	350-950 нм	Фокусировки падающих потока излучения на торце оптического волокна
Оптоволоконный кабель	FC-UV(IR)400-1(2)-ME,	Диапазон пропускания UV/VIS: 200-800 нм IR: 350-2000 nm.	350-950 нм	Соединение спектрометра и коллимационной линзы
Программное обеспечение	AvaSoft 7.0 USB1 (USB 2)			Удаленное управление системой эмиссионной спектроскопии
Калибровочная лампа	AvaLight Hal-Cal	Эталонный источник света для диапазона 350-2500 нм	350-950 нм	Калибровка спектрометра

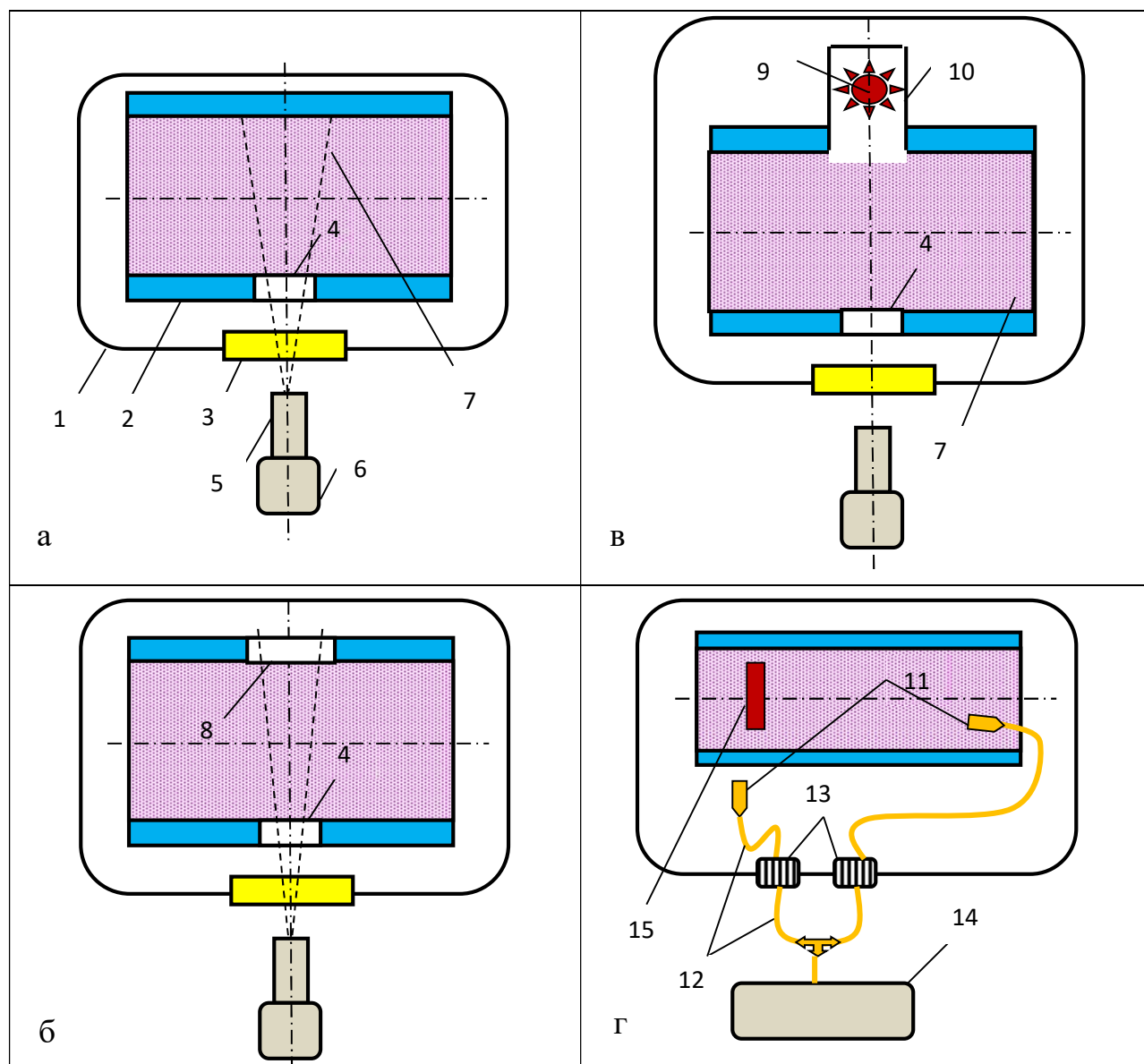


Рис.(5). Методики оптических измерений:

(а-в) – с помощью фотоприемников установленных вне рабочей камеры;

(г) – с помощью оптоволоконного спектрометра.

(1) – рабочая камера; (2) – реакционная камера; (3) – окно ТФ-5; (4,8) – отверстия в стенке реакционной камеры; (5) – объектив; (6) – фотоприемник или спектральный прибор; (7) – плазменный объем; (9) – эталонный источник света; (10) – «черная» полость; (11) – коллимационные линзы; (12) – оптоволоконные линии; (13) – оптоволоконные шайбы; (14) – спектрометр AvaSpec-2048, (15) – мишень.

В главе 4 представлены результаты экспериментов. Температурное поле в реакционной камере во многом определяет условия протекания плазмохимических реакций, как в плазменном объеме, так и на поверхности камеры, контактирующей с плазмой. Прямые измерения локальных значений температуры плазмообразующей среды с помощью контактных датчиков (например, термопар или термометров сопротивления) крайне затруднительны и ненадежны: будучи внесенным в неподвижное облако или поток ЭПП контактный датчик измеряет не температуру газообразной среды, а поток энергии от бомбардирующих его быстрых электронов. В то же время измерения температуры в различных точках корпуса реакционной камеры могут дать полезную информацию о тепловых режимах работы реактора и об условиях протекания плазмохимических реакций вблизи ее поверхности, поскольку температуру поверхности и пристеночного слоя газа можно считать примерно одинаковыми.

Таблица (3) иллюстрирует влияние продувки плазмообразующего газа на продольное распределение температуры в цилиндрической реакционной камере (коаксиальная конфигурация). Видно, что в газовом потоке температура стенки камеры нагревается слабее, чем в неподвижном, а максимум температуры T_w может сместиться в сторону меньших z .

Таблица (3). Аксиальное распределение температуры цилиндрической стенки реакционной камеры $T_w(z)/[T_w(z)]_{\max}$ в неподвижном газе (аргоне) и при продувке через нее аргона. Параметры ЭП: $U = 28,5$ кВ, $I_b = 3,5$ мА, $P_m = 5$ Торр; размеры реакционной камеры: $D = 30$ мм, $L = 250$ мм; скорость газового потока: $w = 16$ м/с.

Направление вдува газа	$(T_w)_{\max}, \text{K}$	z, mm				
		50	90	130	170	210
Неподвижный газ	218	0,47	0,86	1	0,86	0,65
К выводному устройству	156	0,86	1	0,72	0,48	0,35
От выводного устройства	115	0,8	1	0,72	0,61	0,57

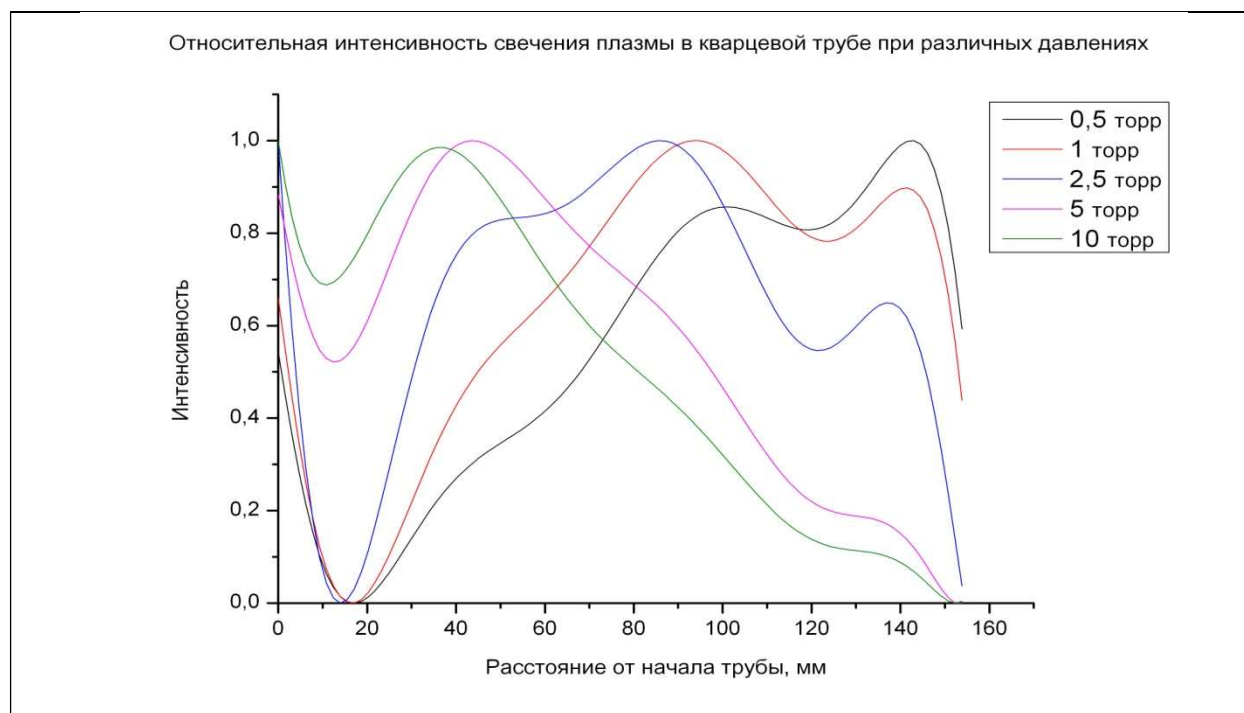
Важно также, что $[T_w(z)]_{\max}$ и положение z^* (z^* – сечение цилиндрической реакционной камеры, в котором T_w имеет максимальное значение) зависят от направления вдува газа, а также от величины расхода газа G и скорости течения w : чем выше скорость прокачки газа, тем менее нагретой оказывается цилиндрическая стенка реакционной камеры.

На рис.(6-а) приведены данные, характеризующие влияние давления плазмообразующего газа на вид функции $B(z)$ для кварцевых трубок с

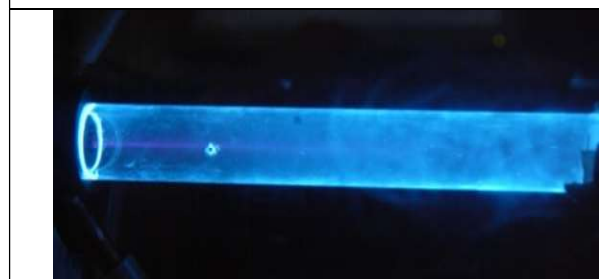
металлическим дном. Видно, что эти функции имеют максимумы при некоторых z^* . Если говорить о положении максимумов на достаточно больших расстояниях от торцов трубы, то при относительно низких давлениях P_m эти максимумы находятся на дальней от выводного окна части трубы (т.е. на больших z). По мере увеличения давления плазмообразующего газа (в этих экспериментах – воздуха) максимумы смещаются в сторону меньших z . Наличие таких максимумов и влияние условий генерации плазмы на их локализацию нами неоднократно обсуждалось в опубликованных нами работах.

Обращают на себя внимание максимумы на малых расстояниях от переднего (открытого) торца трубы, которые наблюдаются при всех P_m , и максимумы вблизи донной части трубы, которые регистрируются только при меньших P_m . Наличие этих максимумов объясняется следующими обстоятельствами.

- Выходной участок газодинамического окна, через которое ЭП инжeksiруется в рабочую камеру, является сильно нагретым, а потому яркой точкой. Излучение этого участка выводного окна падает на торец кварцевой трубки, вызывая ее интенсивную люминесценцию. Люминесценцию переднего торца кварцевой трубки иллюстрирует рис. (6-б). В той или иной мере это явление наблюдается при любых P_m , но наиболее оно заметно при больших P_m , когда нагрев выводного окна велик.
- Свечение дна реакционной камеры порождает максимум функции $B(z)$ на дальнем от выводного окна конце трубы. Это свечение может быть следствием двух причин: нагревом дна быстрыми электронами и люминесценцией (например, когда дно тоже кварцевое). Очевидно, что с ростом P_m поглощение и рассеяние ЭП на длине трубки увеличиваются, и все меньше быстрых электронов достигают ее дна. Именно поэтому дополнительный максимум функции $B(z)$ имеет место при низких давлениях плазмообразующего газа, как показано на рис. (6-в).



(а)



(б)



(в)

Рис.(6). Интенсивность $B(z)$ излучения стенок цилиндрической реакционной камеры (кварцевая труба, $d = 18$ мм), заполненной неподвижной ЭПП воздуха при различных давлениях P_m :

(а) – профиль интенсивности $B(z)$;

(б) – люминесценция переднего (обращенного к выводному окну) торца камеры;

(в) – свечение дна камеры при малых P_m .

Интенсивность излучения слоя плазмы, проинтегрированная по некоторому поперечному сечению трубки, измерялась также с помощью широкополосных фотоприемников ВРХ-90, как показано на рис.(5-б). Результаты экспериментов, проведенных по этой методике, представлены на рис.(7). Они иллюстрируют зависимости интегральной интенсивности

излучения (B) ЭПП аргона от давления P_m при фиксированном токе ЭП и от силы тока пучка (I_b) при фиксированном давлении P_m .

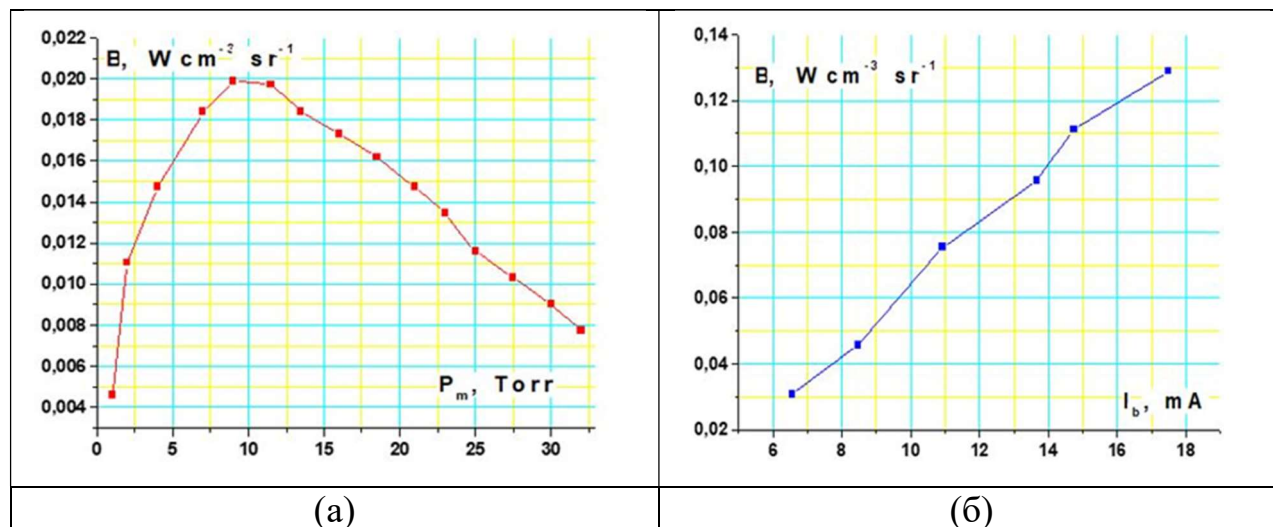


Рис.(7). Интегральная интенсивность излучения (B) ЭПП аргона, измеренная широкополосным фотоприемником ВРХ-90, как функция:

(а) – давления газа, $I_b = 4,5\ mA$, $z_0 = 130\ mm$.

(б) – силы тока электронного пучка, $P_m = 9\ Torr$, $z_0 = 130\ mm$.

В экспериментах, выполненных по схеме «на просвет» (см. рис.5-в), было установлено, что ЭПП является оптически тонкой в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. Это обосновывает применимость оптических методов, в том числе оптической пирометрии и эмиссионной спектроскопии, для исследования процессов в пристеночных слоях плазмы и плазмохимических реакций на поверхности обрабатываемого материала (см., например, схему, представленную на рис.(5-г)).

На рис.(8) приведены фотографии плазменного облака над горизонтально расположенной металлической пластиной (медным диском толщиной 1 мм), поверх которой тонким слоем налита диэлектрическая жидкость. Этими жидкостями служили касторовое масло, кремний-органическая жидкость ПФМС, диэтиленгликоль, т.е. жидкости с низким давлением насыщенного пара, что позволило избежать их кипения при форвакуумном давлении плазмообразующего газа. Толщина слоя жидкости могла варьироваться от 1 до 5 мм. Такая простейшая конфигурация изображена на рис.(4-з).

Металлическую пластину можно было подключать к ВЧ генератору или источнику постоянного напряжения; кроме того, над жидким слоем можно было поместить кольцевой электрод, как показано на рис.(4-и).

Обычно этот электрод заземлялся. В кольцевом электроде могли быть сделаны специальные отверстия для подачи дополнительного газа или пара в зону формирования приповерхностной плазмы. Продувка газа сквозь слой жидкости могла быть организована и снизу, как показано на рис.(4–к). Для этого металлическая пластина изготавливалась из газопроницаемого порошкового материала.

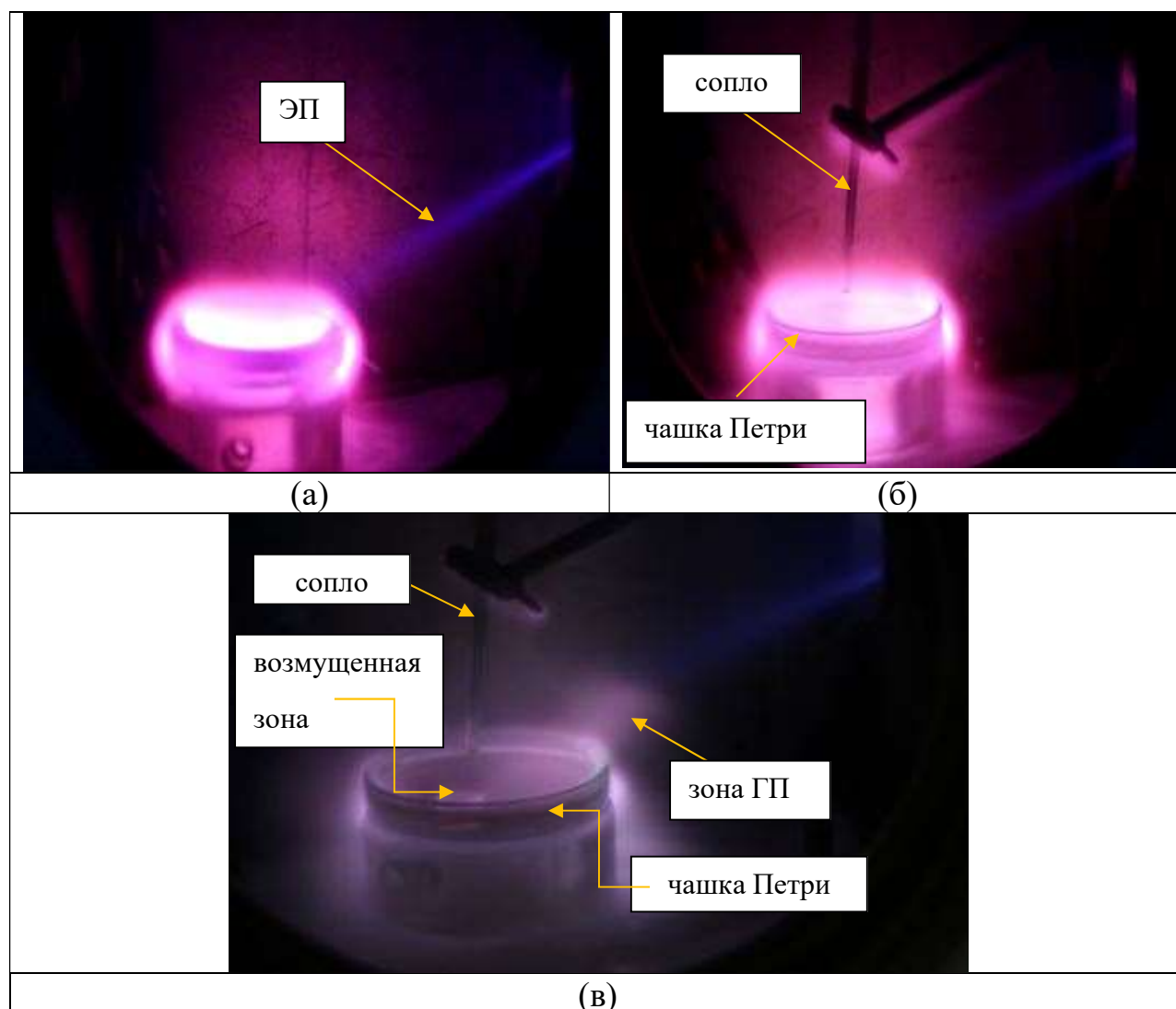


Рис.(8). Генерация комбинированной плазмы над поверхностью жидкого диэлектрика (костровое масло)

(а) $P_m = 1$ Торр, $I_b = 5$ мА, $W_{ВЧ} = 25$ Вт, плазмообразующая среда – неподвижный воздух;

(б) $P_m = 1$ Торр, $I_b = 2.5$ мА, $W_{ВЧ} = 50$ Вт, плазмообразующая среда – неподвижный воздух;

(в) $P_m = 2.5$ Торр, $I_b = 3$ мА, $W_{ВЧ} = 50$ Вт, плазмообразующая среда – пары

этилового спирта, которые подаются в виде струи через сопло малого диаметра (трубка диаметром ≈ 2 мм).

В данной серии экспериментов контейнер представлял собой плоский стеклянный сосуд (чашка Петри), на дне которого располагался металлический диск с диаметром, равным диаметру чашки Петри, который служил электродом. К нему могла подводиться мощность ($W_{ВЧ}$) от ВЧ-генератора, работающего на частоте 13,6 МГц.

Плазмообразующий газ мог подаваться в рабочую камеру вдали от контейнера или вдуваться тонкой струей, направленной на поверхность жидкости. В последнем случае поверхность жидкости оказывалась сильно-возмущенной: на ней могло образовываться углубление с интенсивным выносом макрочастиц жидкости. Поток этих частиц визуализируется электронным пучком и хорошо виден на рис.(8-в).

На фотографиях, которые представлены на рис.(8), хорошо видно облако комбинированной плазмы над поверхностью жидкости, которое формируется инъекцией электронного пучка в зону горения ВЧ-разряда. Обращает на себя внимание тот факт, что комбинированная плазма паров этилового спирта светится очень слабо (рис.(8-в)), и полученные изображения практически не поддаются компьютерной обработке. По той же причине не удалось провести спектральные измерения в плазме C_2H_5OH .

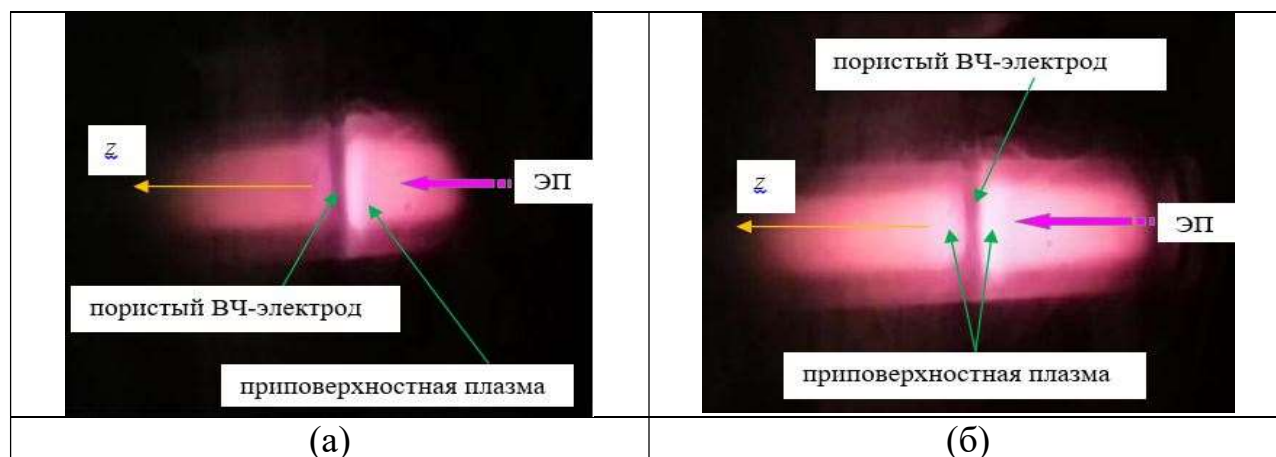


Рис.(9). Генерация потока комбинированной плазмы смеси воздух-метан в цилиндрическом канале.

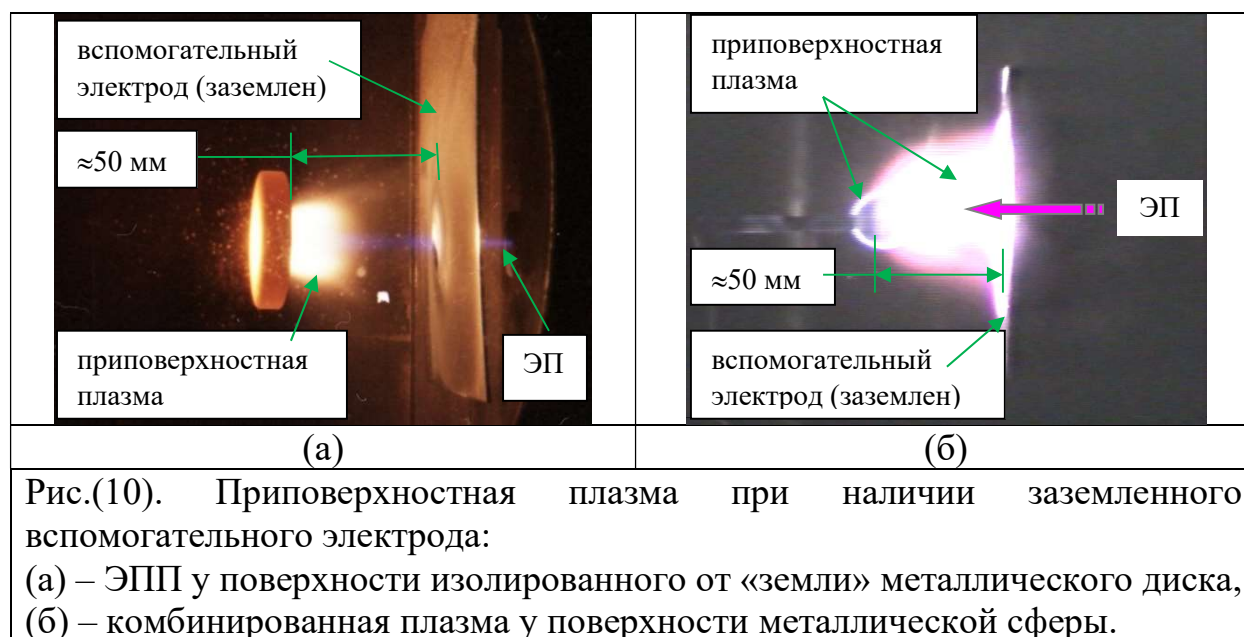
(а) – плазма смеси воздух-метан;

(б) – плазма воздуха (подача метана выключена).

Стрелка – направление инъекции ЭП и воздушного потока.

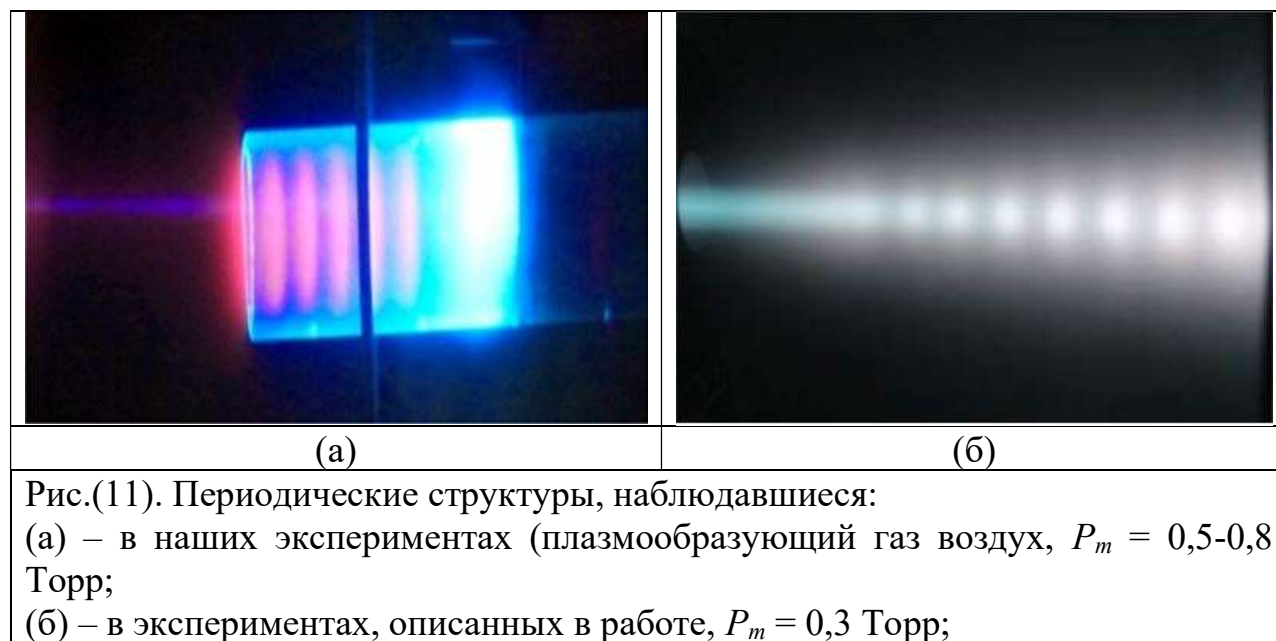
Рис.(9) иллюстрирует эксперименты, которые проводились по методике, изображенной на рис.(4–д). Вдоль кварцевой трубки продувался воздух, а через пористую трубку, расположенную поперек воздушного потока, вводился дополнительный газ – метан. На эту же трубку подавалась ВЧ-мощность, т.е. она служила активным ВЧ-электродом. Электронный пучок инжестировался вдоль трубы в направлении газового потока, которое на рисунке обозначено стрелкой. Видно, что подача метана уменьшает размер светящегося облака приповерхностной плазмы в направлении оси z . Кроме того в этом случае, зона свечения плазмы за пористым электродом видна только со стороны выводного окна. В воздушной плазме свечение наблюдается с обеих сторон ВЧ-электрода. Плазма, возбуждаемая электронным пучком, на фоне ярко светящейся ВЧ-плазмы не видна.

В заключение, приведем еще несколько фотографий, которые иллюстрируют нестационарные явления, которые при определенных условиях могут наблюдаться в приповерхностной ЭПП.



На рис.(10-а) хорошо видна развитая зона приповерхностной ЭПП в промежутке шириной до 50 мм между изолированной от «земли» металлической мишенью и плоским заземленным вспомогательным электродом с отверстием на оси инъекции пучка. При определенных условиях эта область могла достигать поверхности вспомогательного электрода. При этом наблюдались периодические электрические пробои между мишенью и вспомогательным электродом.

Рис.(10-б) иллюстрирует возникновение аналогичного пробоя между изолированной от «земли» металлической сферой и заземленным кольцевым вспомогательным электродом. На сферу подано постоянное напряжение ≈ 400 В отрицательной полярности, т.е., фактически, происходит генерация приповерхностной ЭПП при наличии внешнего электростатического поля. Из-за наличия этого поля непосредственно у поверхности сферы возникает тонкий слой плазмы, хорошо видный на рис.(10-б). Электронный пучок, обозначенный на фотографии стрелкой, не виден из-за сильной засветки кадра излучением плазменного облака.



Весьма интересные явления наблюдались в достаточно коротких реакционных камерах (с отношением длины к диаметру $L/D \sim 1-3$) с заземленным металлическим дном: в поперечных сечениях камер появлялись яркие неподвижные или медленно движущиеся в направлении к выводному окну периодические структуры, похожие на страты в тлеющем газовом разряде. На рис. (11-а) приведено фото нашего эксперимента. Похожее явление описано авторами работы [Klimov A. S., Zenin A. A., Oks E. M., Prech K. // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25 (11). P. 113103] (см. рис. (11-б)). Однако, их эксперименты проводились в свободном газовом объеме без диэлектрической камеры и при более низких давлениях ($P_m < 0,5$ Торр). Как хорошо видно на рис. (11-б), зоны неравномерной светимости с регулярно чередующимися с тёмными промежутками видны только на трассе распространения ЭП. В наших экспериментах такие зоны образуются во всем сечении диэлектрической рабочей камеры и, что важно отметить, ось

инжекции пучка может не совпадать с осью реакционной камеры. При этом аксиальная симметрия периодических структур не нарушается.

Выводы

1. Разработаны специализированные блоки для существующей установки, которые обеспечили проведение экспериментов по генерации электронно-пучковой плазмы в пристеночных областях реакционных камер плазмохимических реакторов, предназначенных для обработки твердых материалов, жидкостей и газожидкостных смесей. Установка также позволяет проводить изучение процессов генерации электронно-пучковой плазмы на поверхности объектов, размещенных в реакционных камерах коаксиальной и планарной конфигурации, при инжекции непрерывного или импульсно-периодического электронного пучка в неподвижный газ, заполняющий реакционную камеру, а также в газовые потоки.
2. Методами контактной и оптической термометрии изучены температурные поля различных конструктивных элементов реакционных камер и влияние на эти поля давления плазмообразующего газа, а также интенсивности прокачки плазмообразующей среды через реакционную камеру.
3. Широкополосными и спектральными оптическими измерениями исследовано пространственное распределение энерговклада электронного пучка в плазмообразующую среду, локализованную внутри реакционной камеры. Изучено влияние на это распределение давления плазмообразующего газа и интенсивности прокачки плазмообразующей среды через реакционную камеру. При этом доказано, что:
 - Нагрев плазмообразующей среды происходит преимущественно за счет теплообмена со стенками реакционной камеры, которая нагревается непосредственной бомбардировкой быстрыми электронами пучка; прямой нагрев плазмообразующей среды за счет торможения в ней электронного пучка не вносит заметного вклада в тепловые режимы плазмохимического реактора.
 - Приповерхностная плазма является оптически тонкой в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах. Это обосновывает применимость оптических методов, в том числе оптической пирометрии и эмиссионной спектроскопии, для исследования процессов в пристеночных слоях плазмы и плазмохимических реакций на поверхности обрабатываемого материала.

4. В планарной конфигурации реакционной камеры удалось осуществить генерацию комбинированной плазмы над поверхностью жидкого диэлектрика:
 - В не подвижном плазмообразующем газе;
 - При обдуве поверхности жидкого диэлектрика потоком плазмообразующего газа.
5. В экспериментах с приповерхностной плазмой обнаружены нестационарные явления, которые сопровождаются:
 - Образованием ярких неподвижных или медленно движущихся в направлении выводного окна периодических структур, похожих на страты в тлеющем газовом разряде;
 - Развитием зоны горения приповерхностной плазмы в широком (вплоть до ≈ 50 мм) зазоре между мишенью и заземленным вспомогательным электродом.

Материалы диссертации опубликованы автором в следующих работах:

1. **[Индексируется базой данных RCSI] Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Васильев.М.Н.** Экспериментальное исследование электрофизических свойств приповерхностной электронно-пучковой плазмы // ТРУДЫ МФТИ. 2019. Том 11, № 2 (42). С. 156-160.
2. **[Индексируется базой данных RCSI] Аунг Чжо У, Йе Хлаинг Тун, Васильев.М.Н.** Генерация электронно-пучковой плазмы вблизи поверхности проводящих и диэлектрических дисков // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 1 (45). С. 5-11.
3. **[Индексируется базой данных RCSI] Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, М.Н.Васильев.** Генерация электронно-пучковой плазмы внутри диэлектрического контейнера // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Том 12, № 2 (46). С. 126-130.
4. **[Индексируется базой данных RCSI] Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, М.Н.Васильев, Хтет Ко Ко Зау, Зин Мин Маунг, Яр Зар Аунг.** Управление электростатической зарядкой твердых тел в каналах, заполненных электронно-пучковой плазмой // ТРУДЫ МФТИ. 2021. Том 13, № 1 (49). С. 65-70.
5. **[Индексируется базой данных RCSI] Хтет Ко Ко Зау, Васильева Т.М, Аунг Чжо У, Йе Хлаинг Тун, Васильев, М.Н, Виноградов М.И, Макаров И.С.** Комбинированная плазма в процессах обработки волокон // Наноиндустрия. 2021. Том 14, № S6. С. 251-264.
6. **[Индексируется базой данных Scopus] Хтет Ко Ко Зау, Т.М.Васильева, Йе Хлаинг Тун, Аунг Чжо У, Т.Г.Шикова.** Сравнение

химического состава и гидрофильных свойств поверхности органических полимеров, обработанных в различных видах низкотемпературной плазмы // Химия высоких энергий. 2021. Том 55, № 4. С. 303-309.

Отпечатано с оригинал-макетов Заказчика

в типографии "Переплетофф"

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

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

Формат 148 x 210 мм. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Тираж 20 экз.

Твердый (мягкий) переплет.

Заказ № _____. 04.10.21 г.