

На правах рукописи



Степин Вячеслав Павлович

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ**

1.3.9 – Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва  
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

**Богачев Николай Николаевич** – кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник теоретического отдела центра плазменных и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

**Официальные оппоненты:**

**Сайфутдинов Алмаз Ильгизович** – доктор физ.-мат. наук, и.о. заведующего кафедрой, профессор кафедры общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ).

**Булейко Алла Борисовна** – кандидат физ.-мат. наук, начальник лаборатории Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Защита диссертации состоится «16» сентября 2026 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.04 при ИОФ РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. №1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН и на сайте <https://diss.gpi.ru/all>

Автореферат диссертации разослан

Врио ученого секретаря  
диссертационного совета 24.1.223.04  
др. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8780

Скворцова Нина Николаевна



## Общая характеристика работы

**Актуальность** исследований характеристик плазменной антенны обусловлена растущей потребностью в антенных системах с электронно-управляемыми характеристиками для современных телекоммуникационных и радиолокационных комплексов. Величина концентрации и пространственная структура плазмы в такой антенне позволяет управлять ее диаграммой направленности, эффективной длиной и согласованием с питающей линией без применения механического управления. По сравнению с металлическими аналогами плазменные антенны обладают такими преимуществами, как возможность быстрой электронной перестройки параметров излучения и сниженной радиолокационной заметностью в выключенном состоянии. Эти свойства определяют интерес к плазменным антеннам как к элементной базе адаптивных и малозаметных радиотехнических систем.

Ключевой особенностью плазменных антенн на основе газоразрядных трубок является пространственно-временная неоднородность концентрации плазмы, которая непосредственно определяет излучательные характеристики устройства. Влияние пространственной структуры плазмы на характеристики плазменных антенн исследовалось различными научными группами. Условно можно выделить два основных направления исследований. Первое направление связано с анализом аксиального распределения концентрации электронов  $n_e(z)$  и его влияния на входные параметры антенны, включая входной импеданс, коэффициент отражения и условия согласования. Второе направление посвящено исследованию радиального профиля концентрации плазмы  $n_e(r)$  в цилиндрических газоразрядных трубках без прямого анализа его влияния на антенные характеристики. Однако существующие работы по плазменным антеннам, как правило, ограничиваются либо аналитическими и численными исследованиями пространственного распределения концентрации плазмы и его влияния на характеристики антенны (входное сопротивление, коэффициент усиления и эффективность), либо экспериментальным изучением продольного распределения плазмы в антеннах для отдельных частот генерации плазмы и возбуждения антенны (6, 164, 465 МГц и 2,45 ГГц). При этом отсутствовали комплексные исследования,

в которых экспериментально измеренное пространственное распределение электронной концентрации плазмы в газоразрядной трубке использовалось бы в качестве входных данных для последующего численного моделирования характеристик плазменных антенн. Реализация такого подхода необходима для корректного анализа влияния пространственного распределения плазмы на излучательные характеристики антенны, а также для их верификации путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Всё это определило необходимость исследования влияния пространственно-временной структуры плазмы на характеристики антенны, проведенного в данной диссертационной работе.

Установление качественных и количественных связей между пространственным распределением концентрации плазмы и характеристиками её электромагнитного излучения имеет принципиальное значение как для фундаментальной физики плазмы, так и для применения в радиофизике и телекоммуникациях. В фундаментальном аспекте оно позволяет углубить понимание ключевых процессов взаимодействия плазмы с электромагнитными полями, в то время как в прикладном – создаёт основу для целенаправленного управления параметрами, прогнозирования свойств и совершенствования моделей конкретных устройств, таких как плазменные антенны и другие управляемые плазменно-волноводные системы. Полученные закономерности создают основу для целенаправленного проектирования и создания антенно-фидерных устройств с электронным управлением параметров.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

**Целью работы** является исследование влияния пространственного распределения концентрации плазмы на эффективную длину и диаграмму направленности плазменной несимметричной вибраторной антенны.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Экспериментально и с помощью численного моделирования исследовать пространственное распределение концентрации плазмы, формирующейся в объеме газоразрядной трубки, при различных давлениях и размерах трубки, а также способов ввода СВЧ энергии в газоразрядную трубку.

2. На основе экспериментальных данных определить эффективную длину плазменной несимметричной вибраторной антенны при различных значениях мощности СВЧ энергии.

3. С помощью численного моделирования исследовать влияние радиального и продольного профилей концентрации плазмы на распределение электромагнитного поля в ближней зоне. Провести сравнение рассчитанной диаграммы направленности плазменной антенны с экспериментальными данными.

### **Научная новизна работы.**

- Впервые проведено комплексное исследование влияния пространственно-временной структуры плазменной среды, формируемой в объёме газоразрядной трубки, на электродинамические характеристики (распределение поля и диаграмму направленности) плазменной несимметричной вибраторной антенны.

- Использование резонаторных методов измерения концентрации плазмы в газоразрядной трубке позволило выявить аксиальный линейный спад усредненной по сечению концентрации плазмы по мере удаления от области ввода СВЧ-энергии. Выполненное численное моделирование впервые продемонстрировало влияние такого аксиального распределения концентрации плазмы на эффективную длину антенны и ее диаграммы направленности, в том числе на форму, ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков.

- Впервые, численно с помощью РС-моделирования, была получена динамика радиального распределения концентрации плазмы при вводе СВЧ энергии в газоразрядную трубку. В диапазоне давлений 0,03–1 Торр радиальный профиль эволюционирует от формы с минимумом в центре через равномерное распределение к форме с выраженным пиком в центре, приближающейся к профилю, описываемому функцией Бесселя нулевого порядка  $J_0$ .

- Впервые численно (в рамках линейной модели Друде) показано влияние радиального профиля концентрации плазмы на формирование поля в ближней зоне и диаграммы направленности антенны.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии и уточнении физической модели плазменной антенны за счет учета пространственной неоднородности плазмы и ее влияния на электродинамические характеристики излучения, что расширяет представления о механизмах формирования излучающих свойств плазменных систем. В ходе исследования выявлены физические закономерности влияния радиальных и продольных профилей концентрации плазмы на формирование мод электромагнитных полей и диаграмм направленности. Полученные данные о пространственном распределении концентрации плазмы при различных режимах возбуждения создают основу для физически обоснованного прогнозирования характеристик излучения и согласования антенных систем. Кроме того, в работе впервые выполнена количественная оценка связи между динамикой ионизационного фронта и изменением резонансных характеристик плазменной антенны в условиях различного давления, что расширяет понимание нестационарных процессов в подобных структурах.

**Практическая ценность** результатов исследования определяется возможностью их непосредственного использования при проектировании и оптимизации плазменных антенн. Показано, что управление пространственной структурой плазмы позволяет реализовывать адаптивные антенные системы с перестраиваемой диаграммой направленности и улучшенным согласованием с питающей линией. Контролируемое изменение профиля концентрации плазмы открывает перспективы электронного сканирования без применения механических элементов, что повышает надежность и быстродействие антенных устройств. Кроме того, в работе расширен методический инструментарий анализа и синтеза антенн на основе плазменных структур за счет комплексного сопоставления численных и экспериментальных методов диагностики. Отдельный научный интерес вызывает поведение антенны в переходном режиме – при генерации плазмы под воздействием СВЧ-энергии. Количественная связь между динамикой ионизационного фронта и изменением резонансных свойств антенны в условиях разных давлений ранее изучена не была.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Аксиальное распределение концентрации плазмы в несимметричных вибраторных антеннах, создаваемой СВЧ-разрядом на поверхностной волне в газоразрядной трубке, характеризуется линейным спадом по мере удаления от источника. Для вибраторной антенны длиной  $l = \lambda/4$  коэффициент спада  $k$  составляет  $-0,45 \pm 0,13$ , а для  $l = \lambda$  — всего  $-0,07 \pm 0,02$ . При этом сформированный плазменный столб оказывается короче, чем сама трубка.

2. При переходе от однородного распределения плазмы к линейно спадающему вдоль антенны, главный лепесток диаграммы направленности смещается не более чем на  $5^\circ$ , тогда как форма диаграммы претерпевает существенные изменения — направленность падает на  $\sim 30\%$ , а основной лепесток расширяется на  $45^\circ$ .

3. В диапазоне давлений  $0,03$ – $1$  Торр радиальный профиль концентрации плазмы в газоразрядной трубке в процессе развития СВЧ-разряда эволюционирует от распределения с центральным провалом на начальной стадии до колоколообразной формы, близкой к функции Бесселя  $J_0$ , на стационарной стадии. Вид радиального профиля существенно влияет на диаграмму направленности плазменной несимметричной вибраторной антенны.

## **Методы исследования**

Экспериментальная часть исследования включала различные методы измерения концентрации плазмы, такие как: резонаторный метод (по сдвигу резонансной частоты СВЧ-резонатора); волноводный метод (метод проходящих волн); а также по интегральной светимости.

Численное моделирование параметров плазмы и динамики газоразрядных процессов выполнено с помощью PIC-метода (Particle-in-Cell – «частица в ячейке»), в специализированном программном коде КАРАТ, позволяющем рассчитывать пространственно-временные распределения концентрации и температуры электронов. Моделирование электродинамических параметров и характеристик плазменной антенны осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics, применяемом для расчёта стационарных распределений электромагнитных полей и

частотных характеристик в широком диапазоне. Для анализа влияния аксиального и радиального профилей концентрации плазмы на антенные характеристики использовалась модель плазмы по теории Друде, в которой учитывались экспериментально и численно полученные РС-методом профили распределения концентрации плазмы.

### **Соответствие паспорту специальности – 1.3.9 «Физика плазмы».**

Результаты диссертационного исследования полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.9 «Физика плазмы», в частности положениям пунктов 4 «Диагностика плазмы», 12 «Плазменные технологии и устройства» и 14 «Электромагнитное излучение плазмы», а также отчасти положениям пунктов 3 «Динамика плазмы: волны, неустойчивости, течения, нелинейные явления (самоорганизация, структуры, турбулентность и т.п.), аномальный перенос, электромагнетизм и т.п.» и 2 «Термодинамика, кинетика (в т.ч. явления переноса), оптика, элементарные процессы в плазме (ионизация, излучение, столкновения и т.п.)».

### **Достоверность результатов**

Экспериментальная часть диссертационной работы выполнена с применением сертифицированного оборудования и апробированных методов измерений и диагностики. Достоверность полученных результатов обусловлена адекватностью разработанных численных моделей (с учётом принятых допущений) исследуемым физическим объектам, а также хорошим согласием данных численного моделирования и эксперимента. В работе использовался комплекс независимых экспериментальных и численных методов исследования параметров плазмы и электродинамических характеристик плазменных антенн с их взаимной валидацией.

Достоверность полученных результатов также подтверждается их согласованностью с данными других научных коллективов, в частности с работами по диагностике газоразрядной плазмы и исследованию характеристик плазменных антенн.

**Публикации.** Основные результаты диссертационного исследования были опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в

список рекомендованных ВАК по специальности 1.3.9 – физика плазмы, 3 статьи из которых индексируются в международных библиографических базах Web of Science и Scopus.

### **Апробация результатов**

Результаты диссертации прошли апробацию на следующих конференциях и научных семинарах: International Workshop «Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation» (2024, 2025), 32d Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (2024), «Прохоровские недели» (2024), «РАДИОИНФОКОМ» (2024, 2025), «Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» (2025), «Ломоносов» (2025), 17th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications (2025), «ВМКТ» (2025), а также неоднократно на научных семинарах теоретического отдела ИОФ РАН.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Он непосредственно участвовал в формулировке цели и постановке задач исследования. Им самостоятельно разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию оригинальные экспериментальные стенды для исследования четвертьволновой и волновой плазменных антенн, что позволило измерить параметры плазмы и электродинамические характеристики антенн.

Автор принимал непосредственное участие в измерениях, использующих резонаторный метод, волноводный метод (метод проходящих волн) и метод измерения интегральной светимости. Лично автором выполнены: настройка и калибровка измерительных трактов; планирование и проведение серий экспериментов; регистрация, обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

В рамках численного моделирования автор участвовал в создании математической модели плазменной антенны, проводил расчёты в программных пакетах KAPAT и COMSOL Multiphysics, а также интерпретировал результаты моделирования.

На основе проведенных исследований автором самостоятельно сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и выводы работы. Текст диссертации и автореферата написан автором самостоятельно.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа включает в себя следующие разделы: введение, 4 главы, заключение и список цитируемой литературы. Объём диссертации составляет 160 страниц и включает в себя 79 рисунков и 4 таблицы. Библиография состоит из 105 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования, обоснована достоверность результатов, отражен личный вклад автора, а также представлена структура и объём диссертации.

В **первой главе** диссертации представлен обзор исследований плазменных антенн на основе газоразрядных трубок. В **параграфе 1.1** рассмотрена классификация антенн по способам формирования плазмы и типам взаимодействия с электромагнитным полем. Основное внимание уделено плазменным несимметричным вибраторным антеннам (ПНВА), в которых формирование плазменного столба и возбуждение антенны осуществляется за счёт электромагнитной энергии от одного источника. В **параграфе 1.2.** рассмотрены две конфигурации ПНВА, различающихся способом ввода СВЧ-энергии от передатчика: антенна длиной  $l=\lambda/4$  с вводом СВЧ через коаксиальный переходник (диаметр газоразрядной трубки  $d = 12$  мм, длина  $l = 160$  мм, рабочее давление  $P = 1-3$  Торр) и антенна длиной  $l = \lambda$  с возбуждением через сурфатрон (диаметр трубки  $d = 24,5$  мм, длина  $l = 700$  мм, рабочее давление  $P = 2-3$  Торр). Газоразрядные трубки выполнены из стекла и заполнены смесью аргона с парами ртути. Исследования проводились в диапазонах частот 100–500 МГц и 2–5 ГГц. В **параграфе 1.3** представлен обзор

исследований формирования плазменного канала, распределения концентрации плазмы и их влияния на характеристики антенны.

Во второй главе представлено описание экспериментальных установок, методов диагностики параметров плазмы и используемых численных моделей.

В параграфе 2.1 описаны три взаимодополняющих экспериментальных метода определения концентрации плазмы: резонаторная и волноводная СВЧ-диагностика, а также оптический метод оценки концентрации плазмы по интегральной светимости. Резонаторный метод СВЧ-диагностики основан на измерении сдвига резонансной частоты цилиндрического СВЧ-резонатора при внесении в его объём газоразрядной трубки с плазмой. Изменение диэлектрической проницаемости плазмы приводит к смещению собственной частоты резонатора, по величине которого определяется средняя по объёму концентрация электронов  $n_e$ . Используемый цилиндрический СВЧ-резонатор, работающий на модах  $TM_{010}(E_{010})$  и  $TM_{110}(E_{110})$ , обеспечивает диагностику слабостолкновительной плазмы в диапазоне  $n_e \approx 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с типичной погрешностью около 20%. Схема измерений и взаимное расположение резонатора и плазменной антенны приведены на рис. 1а. По сдвигу резонансной частоты, наблюдаемому в измеренных частотных зависимостях коэффициента передачи  $S_{21}$  при последовательном перемещении резонатора вдоль газоразрядной трубки ПНВА (для обеих конфигураций:  $l = \lambda/4$  и  $l = \lambda$ , при двух уровнях СВЧ-мощности — 45 Вт и 22,5 Вт), была восстановлена локальная электронная концентрация  $n_e$  и построен аксиальный профиль её распределения  $n_e(z)$ .

Для верификации измерений использовался метод проходящих волн (волноводный метод), реализованный на отрезке прямоугольного волновода, в поперечном сечении которого размещается газоразрядная трубка. Введение плазмы изменяет коэффициент передачи диагностического СВЧ-сигнала (параметр  $S_{21}$ ), что позволяет по измеренному ослаблению и фазовому сдвигу оценивать среднюю по сечению концентрацию электронов. Метод эффективен для трубок диаметром более 20 мм и обеспечивает определение  $n_e$  в диапазоне порядка  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с погрешностью около 50%. Схема размещения волноводного модуля относительно плазменной антенны показана на рис. 1б.

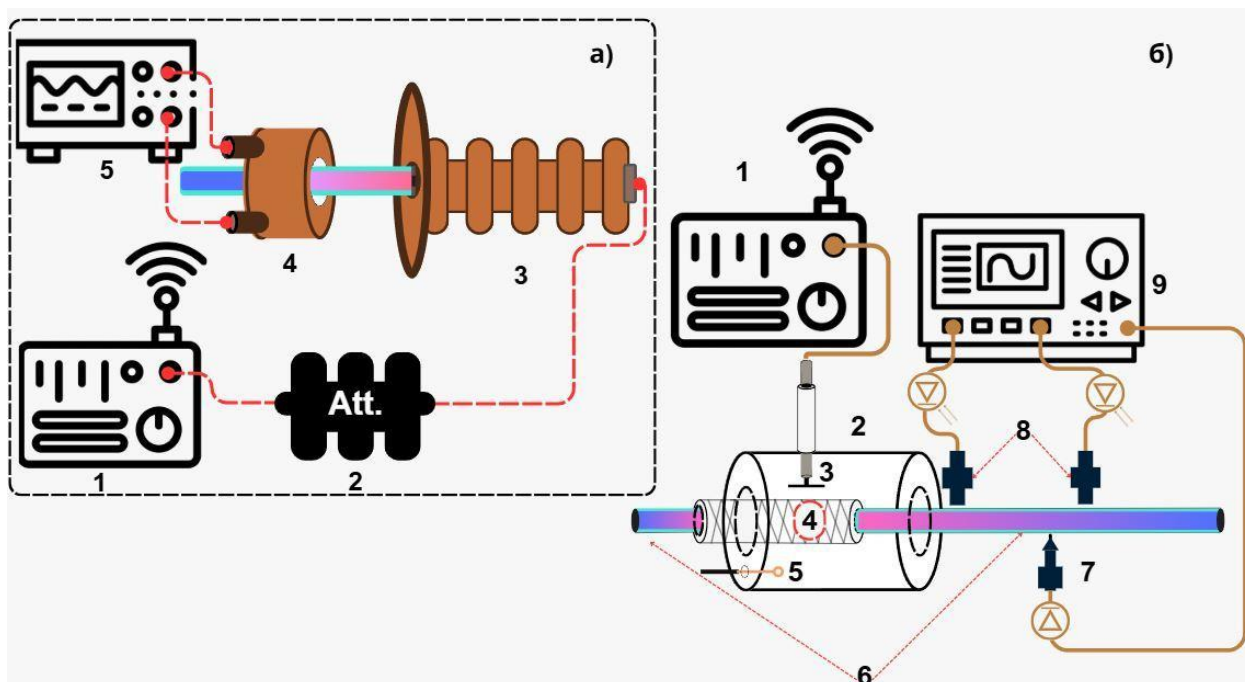


Рис. 1 Схемы экспериментальных установок для а) резонаторного метода определения концентрации плазмы: 1 – радиостанция VX-2100, 2 – аттенюатор, 3 – плазменная антенна с коаксиальным согласующим устройством, 4 – цилиндрический резонатор, 5 – векторный анализатор цепей Keysight N9912A. б) метода проходящих волн и интегральной светимости: 1 – радиостанция VX-2100 (мощность 45 Вт при  $f = 445$  МГц); 2 – сурфатрон; 3 – устройство связи генератора с резонатором; 4 – подвижный металлический цилиндр для настройки на резонансную частоту; 5 – рамочная антенна; 6 – бактерицидная лампа; 7 – антенна для измерения  $E_{\theta}$ -компоненты электрического поля поверхностной электромагнитной волны; 8 – коллимированные фотодиоды; 9 – осциллограф.

Для контроля пространственной структуры разряда использовался оптический метод оценки концентрации плазмы по интегральной светимости. Распределение интенсивности свечения вдоль плазменного столба сопоставлялось с результатами СВЧ-диагностик.

В параграфе 2.2 описана модель в коде КАРАТ, в которой численное моделирование динамики газового разряда выполнялось на основе метода частиц в ячейках (PIC) с решением уравнений Максвелла методом FDTD, что позволило рассчитывать пространственно-временные распределения концентрации электронов и электрического поля при различных давлениях и мощностях. В модели учтены процессы ионизации, рекомбинации и осаждения электронов на стенки разрядной трубки.

В параграфе 2.3. описана модель для электродинамического анализа плазменных антенн в пакете COMSOL Multiphysics с использованием

полученных (численно и экспериментально) аксиальных  $n_e(z)$  и радиальных распределений электронной концентрации плазмы  $n_e(r)$ . Уравнения Максвелла в модели решаются методом конечных элементов. Плазма описывалась в рамках модели Друде, т.е. комплексная диэлектрическая проницаемость слабостолкновительной плазмы в электромагнитном поле имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\nu_e} \quad (1)$$

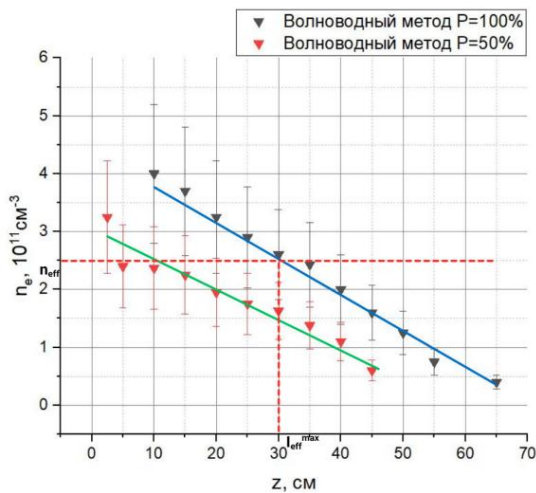
где  $\omega_p$  – плазменная частота,  $\nu$  – частота столкновений.

В **третьей главе** диссертации исследуется аксиальное (продольное) распределение концентрации и его влияние на эффективную длину и диаграмму направленности (ДН) плазменной антенны.

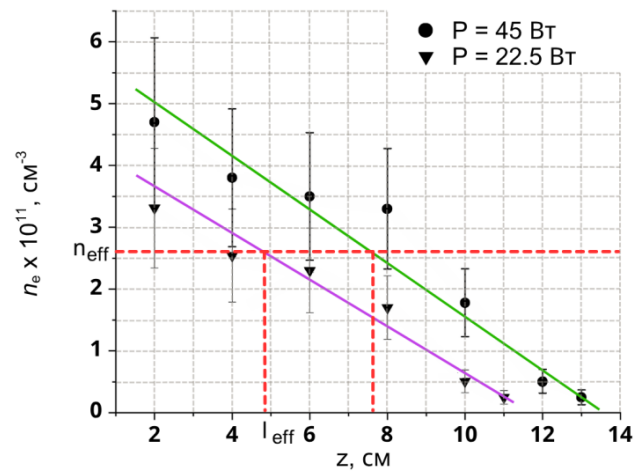
В **параграфе 3.1** представлены результаты экспериментального исследования аксиального распределения концентрации электронов  $n_e(z)$  в плазменных несимметричных вибраторных антеннах (ПНВА) с двумя длинами плазменного столба:  $l = \lambda/4$  и  $l = \lambda$ . Основное внимание уделено анализу пространственной структуры плазмы, скорости распространения фронта ионизации и особенностям развития разряда вдоль газоразрядной трубки. Аксиальные профили электронной концентрации  $n_e(z)$  были восстановлены на основе данных двух независимых СВЧ-диагностик: резонаторного метода на моде  $TM_{110}$  и метода проходящих волн. Сравнение результатов показало, что в области координат до  $z \approx 40-50$  см оба метода дают хорошо согласующиеся значения средней по сечению концентрации плазмы. Различия, наблюдаемые в хвостовой части профиля, связаны с особенностями развития разряда и ограничениями чувствительности метода проходящих волн. Полученные профили электронной концентрации дополнительно сопоставлялись с распределением интегральной оптической светимости плазмы, что подтвердило достоверность проведённых измерений.

Экспериментально установлено, что при номинальной подводимой мощности  $P=45$  Вт аксиальное распределение электронной концентрации имеет практически линейный спад по мере удаления от ввода энергии. Вблизи области возбуждения значения  $n_e$  достигают  $(4-5) \times 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и уменьшаются до  $(1-2) \times 10^{10}$  см<sup>-3</sup> на расстоянии 60–70 см от источника возбуждения. По

экспериментальным данным (Рис.3) были определены коэффициенты линейного спада концентрации электронов для двух конфигураций ПНВА. Для антенны с длиной плазменного столба  $l = \lambda/4$  коэффициент спада составил  $k = -0,45 \pm 0,13$ , тогда как для антенны с длиной  $l = \lambda - k = -0,07 \pm 0,02$ . Также было показано, что уменьшение подводимой мощности на 3 дБ (до 22,5 Вт) приводит к пропорциональному снижению концентрации электронов вдоль всей длины плазменного столба в 1,5–2 раза. При этом форма аксиального профиля практически не изменяется, сохраняя линейный характер, что свидетельствует о масштабном, но геометрически подобном изменении распределения  $n_e(z)$ . Для четвертьволновой антенны наблюдается более быстрый спад концентрации электронов вдоль оси разряда, что связано с особенностями распределения электромагнитного поля и локализацией области энерговклада.



(а)



(б)

Рисунок 3 – аксиальное распределение концентрации электронов в волновой плазменной антенне для полной и укороченной мощности (а) и четвертьволновой антенне (б)

На рисунке 4 проведено сравнение применяемых измерительных методов для определения продольного распределения параметров плазмы. Представлены зависимости средней по сечению концентрации электронов, полученные волноводным методом, а также интегральной и радиальной компоненты электрического поля.

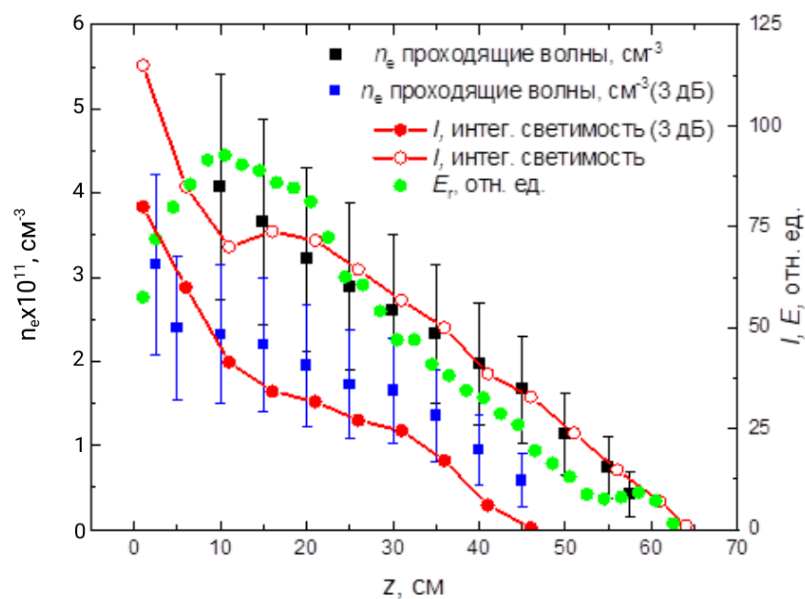


Рисунок 4 – экспериментальные продольные распределения радиальной компоненты напряжённости электрического поля поверхностной электромагнитной волны, интегральной светимости плазмы и средней по сечению концентрации плазмы, измеренной методом проходящих волн при давлении  $p=1$  Торр.

Показано, что все методы демонстрируют согласованное убывание концентрации плазмы вдоль разряда. По интерференционной картине ПЭВ определены длины волны и рассчитаны концентрации электронов, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Для интерпретации экспериментальных результатов и моделирования развития разряда используется самосогласованное моделирование разряда на поверхностной электромагнитной волне методом частиц в ячейках (PIC) в программном пакете КАРАТ (**параграф 3.2**). PIC-моделирование показало, что плазменный столб антенны состоит из квазистационарной области и фронта ионизации, где происходит основное поглощение энергии поверхностной волны и реализуется усиление ВЧ-поля в окрестности критической концентрации, сопровождающееся нелокальным нагревом электронов и формированием амбиполярного поля. Скорость фронта вблизи ввода волны составляет  $v_f \approx 2,5 \cdot 10^6$  см/с и убывает вдоль трубки по закону, близкому к экспоненциальному. Полученные скорости распространения фронта и времена выхода разряда на стационарный режим согласуются с экспериментальными данными.

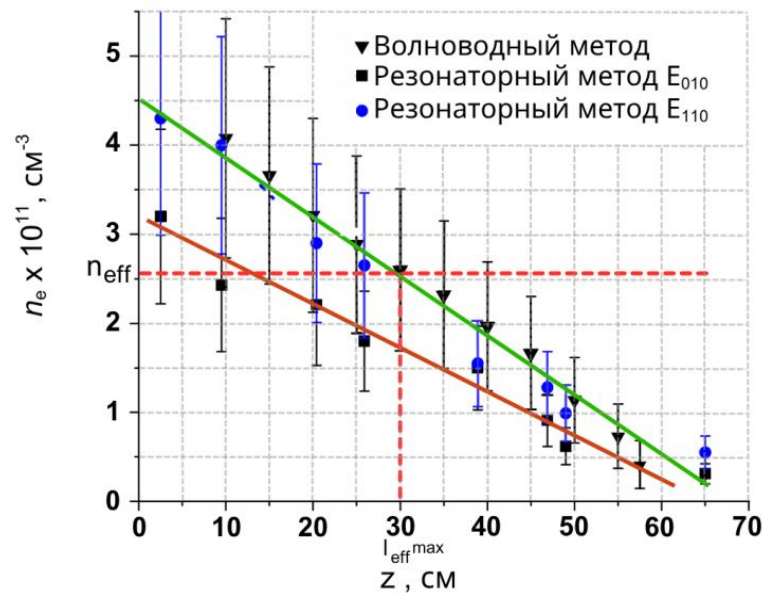


Рисунок 5 – Сравнение различных методов диагностики аксиального распределения параметров плазмы а – распределение концентрации электронов, измеренное волноводным и резонаторным методами; б – экспериментальные продольные распределения радиальной компоненты напряжённости электрического поля поверхностной электромагнитной волны, интегральной светимости плазмы и средней по сечению концентрации плазмы, измеренной методом проходящих волн при давлении  $p=1$  Торр.

В параграфе 3.3 исследуется влияние аксиального (продольного) распределения концентрации на эффективную электрическую длину и диаграмму направленности (ДН) плазменной антенны. На основе экспериментально измеренных профилей  $n_e(z)$  выполняется электродинамическое моделирование четвертьволновой и волновой ПНВА в рамках модели Друде. Показано, что учёт реального линейно спадающего профиля вместо идеализированного равномерного распределения приводит к существенной трансформации как эффективной электрической длины, так и диаграмм направленности. Для волновой антенны (рис. 6а) эффективная электрическая длина, определённая по той части плазменного столба, где концентрация электронов превышает 10 критических значений для частоты 445 МГц ( $n_e > 10 \cdot n_{кр} \approx 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ), составляет 30 см против 65 см при равномерном распределении для мощности 45 Вт; при этом наблюдается смещение направления максимума ДН приблизительно со  $127^\circ$  до  $106^\circ$ , расширение главного лепестка с  $36,3^\circ$  до  $54^\circ$  и подавление бокового лепестка. Для четвертьволновой антенны (рис. 5б) эффективная длина, определённая по тому же критерию, сокращается с 16 до 8 см, ширина главного лепестка

возрастает до  $\sim 107^\circ$ , тогда как направление его максимума практически не изменяется, а форма ДН приближается к характеристикам металлической антенны аналогичной геометрии. Сделан вывод, что линейный аксиальный спад концентрации, характерный для СВЧ-разрядов на поверхностной волне, является ключевым фактором сокращения эффективной электрической длины плазменных вибраторов и расширения их диаграмм направленности при слабом изменении направления главного лепестка, особенно в четвертьволновой конфигурации.

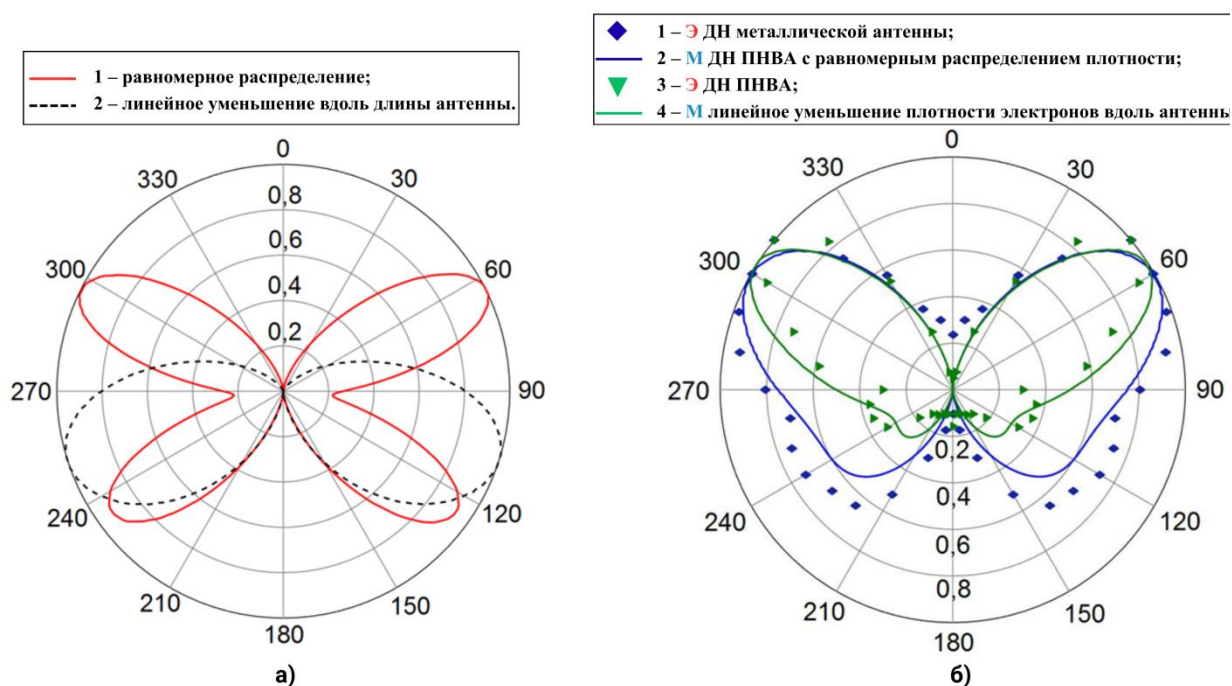


Рисунок 6 Диаграммы направленности плазменной антенны при различных аксиальных распределениях концентрации плазмы: а) результаты численного моделирования; б) сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм.

В **четвёртой главе** исследуется радиальное распределение концентрации электронов  $n_e(r)$  в газоразрядной трубке и его влияние на распределение электромагнитного поля и диаграмму направленности плазменной антенны. В **параграфе 4.1** проведён анализ эволюции радиального профиля плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны в интервале давлений газа 0,03–1 Торр с использованием численного моделирования в коде КАРАТ, а также экспериментальных методов оптической и СВЧ-диагностики.

При пониженных давлениях газа в газоразрядной трубке антенны ( $p \leq 0,1$  Торр) уже на начальной стадии развития разряда устанавливается

колоколообразный профиль с максимумом на оси (рис. 7), близкий к функции Бесселя  $J_0$ , который не претерпевает существенной эволюции во времени.

Однако при давлении  $p \geq 1$  Торр на начальной стадии развития разряда формируется профиль с центральным провалом («трубчатый») — максимум концентрации плазмы локализован в пристеночной области (~1 мм от стенки трубки), а на оси наблюдается минимум концентрации. Образование такого профиля определяется соотношением длины свободного пробега электронов и радиуса трубки: при выполнении условия  $pr_0 \geq 1$  Торр·см (где  $r_0$  — внутренний радиус трубки) ионизация сосредоточена в тонком пристеночном слое, тогда как при  $pr_0 \lesssim 0,1$  Торр·см максимум распределения концентрации смещается к оси. По мере развития разряда трубчатый профиль для случая  $pr_0 \geq 1$  Торр·см переходит в платообразный, а затем в колоколообразный с максимумом на оси (рис. 7), близкий к функции Бесселя  $J_0$ . Характерное время формирования колоколообразного профиля при  $p \approx 1$  Торр составляет ~10–30 мкс и определяется коэффициентом амбиполярной диффузии. Экспериментально показано, что для давления газа ~1 Торр в квазистационарной части столба реализуется именно такой колоколообразный («бесселевский») профиль, хорошо согласующийся с решениями диффузионного уравнения и данными по радиальному распределению светимости.

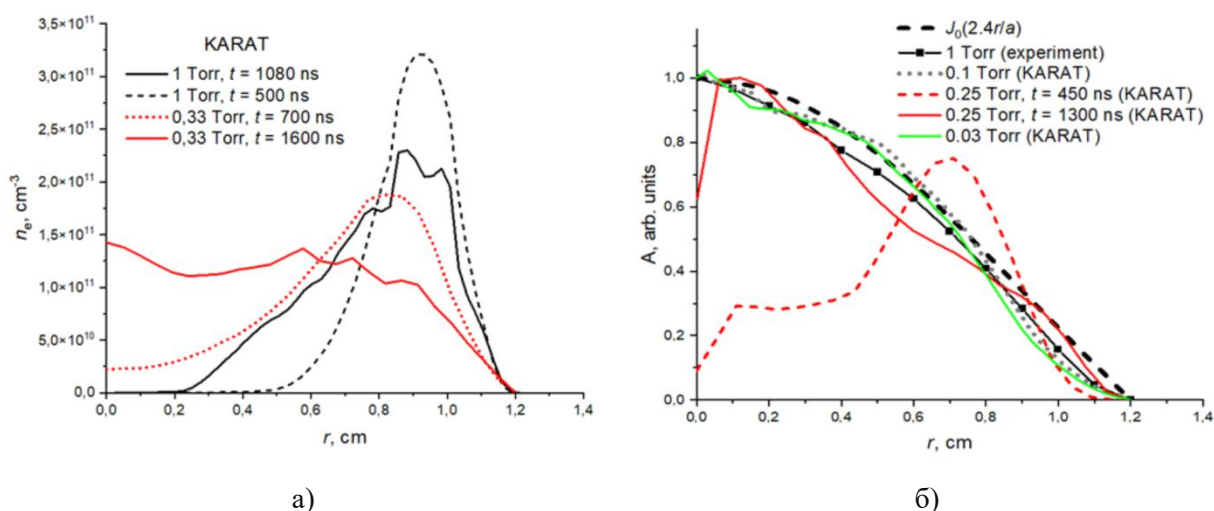


Рисунок 7 Радиальные профили плотности плазмы на расстоянии  $z = 4$  см от области возбуждения: а) профили PIC-моделирования для  $p = 1$  и 0.33 Торр б) сравнение профиля функции Бесселя, экспериментального профиля ( $p \approx 1$  Торр) и результатов PIC-моделирования при пониженных давлениях.

В параграфе 4.2 на основе трёх описанных выше характерных форм радиального профиля концентрации плазмы  $n_e(r)$  – трубчатого (начальная стадия разряда), платообразного (переходный режим) и колоколообразного (квазистационарная стадия) – проводится электродинамическое моделирование диаграмм направленности четвертьволновой и волновой ПНВА в COMSOL Multiphysics с использованием модели Друде. На начальной стадии разряда (трубчатый профиль) максимум концентрации плазмы сосредоточен у стенки трубки, что определяет локализацию высокочастотного поля в пристеночной области. Для четвертьволновой  $l = \lambda/4$  и волновой антенн  $l = \lambda$  это приводит к многолепестковой нерегулярной диаграмме направленности. По мере развития разряда и трансформации профиля от трубчатого через платообразный к бесселевскому поле перераспределяется к оси, и диаграмма направленности становится близкой к типичной для несимметричной вибраторной антенны с  $l = \lambda/4$ . Для волновой антенны  $l = \lambda$  переход от трубчатого к колоколообразному профилю сопровождается изменением диаграммы направленности от многолепестковой к диаграмме направленности несимметричной вибраторной антенны с увеличенным уровнем боковых лепестков. Таким образом, радиальный профиль концентрации плазмы существенно влияет на распределение поля и форму диаграммы направленности плазменной антенны и может использоваться как инструмент управления её излучательными характеристиками путем изменения параметра  $pr_0$ .

В заключении диссертации изложены основные научные и практические результаты работы, а также рекомендации и перспективы дальнейших исследований.

### **Основные результаты работы**

Данная работа развивает современное представление о плазменных антеннах как о физически управляемых, адаптивных устройствах, характеристики излучения которых могут варьироваться в широком диапазоне за счёт изменения параметров возбуждающей плазменной среды. Установленные закономерности пространственного распределения концентрации плазмы при различных режимах возбуждения обеспечивают

возможность физически обоснованного прогнозирования параметров излучения и согласования, что имеет ключевое значение для дальнейшего развития антенных систем в задачах телекоммуникации, радиофизики и прикладной электродинамики.

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Сравнение резонаторного метода (на моде  $TM_{110}$ ) и метода проходящих волн при определении средней концентрации электронов в диапазоне  $10^{10}-10^{12} \text{ см}^{-3}$  продемонстрировало их хорошее согласие. Результаты самосогласованного PIC-моделирования в коде КАРАТ также показали высокую степень соответствия экспериментальным данным.

2. Установлено, что в несимметричных вибраторных плазменных антеннах, формируемых СВЧ-разрядом на поверхностной волне, аксиальное распределение электронной концентрации носит линейно убывающий характер по мере удаления от области ввода энергии. Коэффициент наклона этого распределения для четвертьволновой антенны с экраном составляет  $k=-0,45\pm 0,13$ , а для волновой антенны без экрана –  $k=-0,07\pm 0,02$ . Плазменный столб оказывается короче геометрической длины газоразрядной трубки.

3. Экспериментально обнаружено, что снижение подводимой мощности в два раза (на 3 дБ) ведет к пропорциональному уменьшению концентрации электронов (в 1,5–2 раза) по всей длине трубки при сохранении линейного характера распределения, и соответствующему сокращению эффективной электрической длины антенны.

4. Показано, что продольное распределение концентрации плазмы приводит к изменению эффективной длины антенны, что обусловлено изменением распределения токов и фазовых соотношений в излучающей системе. Линейное снижение концентрации плазмы вдоль антенны приводит к тому, что эффективная электрическая длина антенны в 2–3 раза меньше длины плазменного канала. Для волновой ПНВА эффективная длина равна 30 см при длине плазменного канала 65 см, для четвертьволновой антенны эффективная длина равна 8 см при длине плазменного канала 16 см.

5. Выявлено влияние продольного распределения концентрации плазмы на диаграмму направленности (ДН) плазменной антенны. Линейное

снижение концентрации плазмы вдоль антенны практически не меняет направление главного лепестка (сдвиг составляет не более  $5^\circ$ ), однако приводит к значительному (около 30%) уменьшению направленности излучения и увеличению ширины основного лепестка ДН на  $45^\circ$  по сравнению с теоретическим случаем равномерного распределения плазмы.

6. С помощью PIC-моделирования установлено, что в процессе формирования плазменный столб антенны состоит из квазистационарной области и распространяющегося фронта ионизации, в котором происходит основное поглощение энергии поверхностной волны, сопровождающееся усилением ВЧ-поля в окрестности критической концентрации и нелокальным нагревом электронов. Показано, что скорость распространения фронта убывает по мере удаления от области возбуждения. Рассчитанные скорости распространения фронта и времена выхода разряда на стационарный режим согласуются с экспериментальными данными.

7. В диапазоне давлений 0,03–1 Торр радиальный профиль электронной концентрации эволюционирует в ходе развития разряда от трубчатого профиля с провалом в центре — через платообразный — к колоколообразному (бесселевскому) профилю с максимумом на оси. Вид профиля определяется параметром  $pr_0$ : при  $pr_0 \gtrsim 1$  Торр·см ионизация сосредоточена у стенки трубки, при  $pr_0 \lesssim 0,1$  Торр·см — на оси. Показано, что радиальный профиль концентрации плазмы влияет на структуру ближнего поля и форму диаграммы направленности антенны.

### Публикации по теме диссертации

1. Bogachev N. N., **Stepin V. P.**, Zhukov V. I., Andreev S. E., Karfidov D. M., Usachonak M. S., Konchekov E.M., Gusein-zade, N. G. The Effect of the Axial Plasma Electron Density Distribution on the Effective Length and Radiation Pattern of a Plasma Antenna //Plasma. –2025.– V. 8.– No. 4.– P. 49. (WoS Q3, Scopus Q2)
2. Богачев Н.Н., **Степин В.П.**, Богданкевич И.Л., Андреев С.Е., Гусейн-заде Н.Г. Проявление нелинейных эффектов в линейном режиме работы плазменной антенны / Инженерная физика. – 2025 – № 7.– 3-13. DOI: 10.25791/infizik.7.2025.1488 (ВАК).

3. **Степин В. П., Жуков В. И., Андреев С. Е., Карфидов Д. М., Усачонок М. С., Гайдаш А. С., Замуруев С. Н., Богачёв Н. Н.** Использование моды TM<sub>110</sub> (E<sub>110</sub>) цилиндрического СВЧ-резонатора для оценки концентрации плазмы в газоразрядной трубке // Физика плазмы. – 2025. – Т. 51. – № 10. – С.1263–1270; doi: 10.1134/S1063780X25603578 (WoS Q4, Scopus Q4).
4. **Степин В. П., Жуков В. И., Карфидов Д. М., Богачёв Н. Н.** Экспериментальное и численное исследование структуры разряда, поддерживаемого поверхностной волной, в аргоне низкого давления // Физика плазмы. – 2026. – V. 52. – No. 1. – P. 151–173.

#### **Публикации автора в сборниках трудов и тезисов конференций**

1. Bogachev N.N., Bogdankevich I.L., **Stepin V.P.**, Andreev S.E., Gusein-zade N.G., Numerical PiC Simulation of the Effect of Plasma on the Characteristics of the Plasma Antenna // 20th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation; Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow, Russia, April 8–12, 2024 Book of Abstracts. –2024 – с. 119
2. N.N. Bogachev, I.L. Bogdankevich, V.I. Zhukov, D.M. Karfidov, **V.P. Stepin**, N.G. Gusein-zade, Ionization of a Plasma Antenna Channel in a Dielectric Gas-discharge Tube// 32 Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, August 26 - 30, 2024 Belgrade, Serbia, Программа и тезисы докладов.–2024.– с. 119
3. **Степин В.П., Богачев Н.Н., Жуков В.И., Андреев С.Е., Усачонок М.С.,** Измерения концентрации плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны // VII ежегодная школа-конференция молодых ученых «Прохоровские недели», 22 – 24 октября 2024 г., ИОФ РАН, Москва, Россия: Сб. тезисов.– Москва: ИОФ РАН.– 2024.– с. 162 DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-162-164.
4. **Степин В.П., Жуков В.И., Андреев С.Е., Усачонок М.С., Карфидов Д.М., Богачев Н.Н.,** Бесконтактные методы определения концентрации плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны // VIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы

- развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «РАДИОИНФОКОМ – 2024», 18 - 22 ноября 2024 г., Москва, Россия: Сб. тезисов.– Москва: МИРЭА.–2024. – с.327-332.
5. Богачев Н.Н., Усачёнок М.С., **Степин В.П.**, Жуков В.И., Андреев С.Е., Богданкевич И.Л., Гусейн-заде Н.Г. Плазменные антенно-фидерные устройства, системы и метаповерхности// ЛП Конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 17 – 21 марта 2025 года, г. Звенигород, Московская обл., Россия. Сборник тезисов докладов.– 2025.– ч. 2.– с. 270 DOI: 10.34854/ICPAF.52.2025.1.1.220.
  6. Bogachev N.N., Usachonak M.S., **Stepin V.P.**, Zhukov V.I., Andreev S.E., Bogdankevich I.L., Simonchik L.V., Gusein-zade N.G. Gas discharge plasma antennas, arrays and metasurfaces // 21th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation, April 7-11, 2025, Moscow, Russia. Book of Abstracts. – 2025.– p. 99.
  7. **Stepin V.P.**, Bogachev N.N., Andreev S.E., Bogdankevich I.L., Zhukov V.I., Karfidov D.M., Usachonak M.S., Gusein-zade N.G. Effects of axial plasma density distribution on the characteristics of a plasma antenna // 21th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation, April 7-11, 2025, Moscow, Russia. Book of Abstracts. – 2025.– p. 100.
  8. **Степин В.П.** Влияние продольного распределения концентрации плазмы на характеристики плазменной антенны // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», 11 по 25 апреля 2025, Москва, Россия. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2025» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2025. [uid1039249\\_abc6b647adcdccfb67200761d9d267a016a02cdb.docx](#)
  9. **Степин В.П.**, Богачев Н.Н., Андреев С.Е., Жуков В.И. Влияние аксиального и радиального распределения концентрации плазмы на

характеристики плазменной антенны// Всероссийская молодежная конференция по управляемому термоядерному синтезу, плазменным технологиям и высокотехнологичной медицине (ВМКТ-2025). 25-28 июня 2025, Москва, Троицк, Россия, Сборник тезисов. –2025 – С.125.

10. **Stepin V.P.**, Zhukov V.I., Andreev S.E., Bogachev N.N. Influence of axial and radial plasma density distributions on the characteristics of a plasma antenna // 17th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications, September 8-12, 2025. – p.102.