

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-2007-48

На правах рукописи

УДК 621.384.633



003057053

**БЫКОВСКИЙ**  
Владимир Федорович

**АКТИВНЫЙ РАКЕТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ЭЛЕКТРОН-1»  
С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ  
В ИОНОСФЕРУ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 2007

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им В.П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,  
профессор

Е.М. Сыресин

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

С.И. Тютюнников

доктор технических наук

Г.А. Вершинин

**Ведущая организация:**


Всероссийский электротехнический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2007 г в " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_  
часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.05 в Объединенном институте  
ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных  
исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета

 В.Г.Кривохижин

## **Общая характеристика работы**

### *Актуальность темы*

Для исследования ионосферной и магнитосферной плазмы эффективно используются активные ракетные эксперименты с инжекцией электронных пучков. При взаимодействии электронного пучка с ионосферной плазмой в окрестности ракеты происходит зажигание пучково-плазменного разряда (ППР) с значительным увеличением концентрации плазмы в области инжекции пучка.

Параметры пучково-плазменного разряда (ППР) и генерация излучения из области разряда существенно зависят от энергии электронов, тока пучка, частоты и глубины модуляции его плотности. Это требует создания:

- электронного ускорителя, обеспечивающего необходимые параметры пучка и его модуляцию в низкочастотном (по току) и высокочастотном (по энергии электронов) диапазонах при минимальных габаритах и весе.

- диагностической регистрирующей и анализирующей аппаратуры для исследований ППР, волновых излучений и процессов зарядки ракеты

- автономных контейнеров в минимальных габаритах, отделяемых от ракеты с вращением вокруг собственной продольной оси, что обеспечивает сканирование области околоракетного пространства, регистрацию параметров ППР и передачу информации на наземные приёмные анализирующие устройства

Решение всего комплекса вышеперечисленных задач показывает актуальность данной работы.

### *Основные цели работы*

Данная работа имела целью

- оптимизацию схемы проведения ракетного эксперимента на базе метеоракеты МР-12 (МР-20),
- разработку специальных методик регистрации и передачи на наземный комплекс измеряемых параметров,
- разработку и создание бортовой аппаратуры для исследования ионосферы с помощью электронных пучков,
- создание базового изделия, включающего ускоритель электронов (УЭ), блок бортовой диагностической аппаратуры (БДА) и блок автономных отделяемых диагностических контейнеров (БДК),
- физический пуск ракеты с электронным инжектором и комплексом аппаратуры и анализ результатов измерений в ходе эксперимента
- исследование параметров плазмы и волновых излучений в активном ракетном и лабораторных экспериментах.

### ***Научная новизна***

Впервые разработан комплекс аппаратуры, предназначенный для проведения активного ракетного эксперимента с инжекцией электронных пучков в ионосферную плазму на высотах 90 ÷ 150 км с метеоракеты МР-12 с целью зажигания пучково-плазменного разряда и управляемой генерации радиоизлучений в области ППР

Создан оригинальный электронный ускоритель, обеспечивающий надежное зажигание ППР на высотах от 150 до 90 км.

Впервые для метеоракеты класса МР-12 разработаны и изготовлены оригинальные автономные отделяемые от ракеты зондовые контейнеры, обеспечивающие наряду с бортовой аппаратурой приборного отсека ракеты регистрацию параметров области взаимодействия электронного пучка с плазмой в околоракетной области

Впервые осуществлён активный эксперимент по генерации ППР модулированным электронным пучком, инжектируемым с ракеты-носителя. В эксперименте осуществлён успешный запуск ракеты, обеспечена работа всех компонентов научной аппаратуры в ионосфере и верхней атмосфере в штатном режиме, зафиксировано зажигание ППР на высотах от 150 км до 90 км на нисходящей части баллистической траектории, проведены измерения параметров ППР в околоракетной области и их передача на наземные регистрирующие комплексы.

Впервые зарегистрирована генерация радиоизлучений из околоракетной области на частотах модуляции энергии электронов пучка, интенсивность которых на порядок превышает излучение, генерируемое немодулированным пучком.

Впервые осуществлено трассирование радиоволн на расстояние в несколько сотен километров в направлении области разряда и зарегистрировано их отражение от области ППР под углом  $60^\circ$  к направлению трассирования радиоволн.

Результаты космического эксперимента по измерениям параметров ППР при инъекции электронного пучка в ионосферу подтверждены дальнейшими лабораторными экспериментами, расширяющими наши представления о взаимодействии пучков заряженных частиц с образующейся при их прохождении через ионосферу плазмой

### ***Практическая ценность работы***

Разработанный комплекс электрофизической и диагностической аппаратуры, предназначенный для проведения исследований на высотах  $90 \div 150$  км области взаимодействия электронного пучка, инжектируемого с борта ракеты типа МР-12 (МР-20), с ионосферной плазмой, позволил осуществить активный ракетный эксперимент и может стать основой базового изделия.

Оптимизированы модель и схема постановки эксперимента, схемы регистрации параметров и структуры области взаимодействия электронного пучка с ионосферной плазмой,

конструкция бортового инжектора электронов, обеспечивающего генерацию модулированных электронных пучков.

Разработанная методика отделения от ракеты компактных автономных зондовых контейнеров обеспечивает при их вращении сканирование области возникновения пучково-плазменного разряда.

Разработана конструкция компактного многофункционального контейнера АКЗ, разработан и изготовлен комплекс регистрирующей и анализирующей аппаратуры, размещаемой на ракете, проведены проверки на имитационных стендах на соответствие аппаратуры эксплуатационным требованиям после воздействия на неё ударных и вибрационных ускорений, которым она подвергается на ракете во время выведения её на рабочую высоту и во время всего периода работы ускорителя электронов

Проведены исследования взаимодействия модулированного электронного пучка с ионосферной плазмой. Использование ВЧ модуляции энергии пучка при глубине модуляции всего 0,2% позволило на порядок увеличить интенсивность генерации радиоизлучения из области разряда.

Экспериментальная проверка в лабораторных условиях подтвердила правильность основных выбранных методик регистрации ППР и его параметров, конструкторских решений, выявила дополнительные возможности изучения возникающих при инжекции пучка электронов в ионосферу явлений.

### ***На защиту выносятся:***

#### **1. Физический проект активного ракетного эксперимента**

1.1. Схема постановки активного эксперимента последовательность развёртывания и времени включения научной (электрофизической и диагностической) аппаратуры с указанием соответствующих высот, относительных скоростей и направления полёта отделяемых контейнеров; направление инжекции и расходимость пучка, геометрия области ППР.

1.2. Способ отделения автономных зондовых контейнеров (АКЗ) от головной части и параметры их движения.

## 2. Конструкция головной части (ГЧ) ракеты.

2.1. Конструкция пушки, обеспечивающая расчётные параметры электронного пучка, необходимые для эффективной генерации волновых излучений и формирования ППР в области взаимодействия пучка с ионосферной плазмой, в том числе модуляцию пучка в низкочастотном (по току) и высокочастотном (по энергии электронов) диапазонах.

2.2. Конструкция и схема схода АКЗ со стойки приборного отсека ГЧ

2.3. Конструкции сеточных анализаторов электронов и ионов и высоковольтных анализаторов энергии электронов

## 3. Результаты физического пуска ракеты

3.1. Результаты измерения параметров зарядки и нейтрализации ракеты, структуры области ППР.

3.2. Обнаружение отраженных от области ППР радиоволн, трассированных через область инжекции пучка с расстояния 850 км, с углом рассеяния  $60^\circ$  от направления трассирования на расстоянии 450 км

3.3. Обнаружение генерации интенсивных радиоизлучений на частотах модуляции энергии электронов пучка из области ППР с интенсивностью, на порядок превышающей интенсивность радиоволн для немодулированного пучка.

4. Результаты лабораторных экспериментов, подтверждающие результаты активного эксперимента.

## *Апробация работы*

Материалы диссертации докладывались на международной конференции по активным плазменным экспериментам в ионосфере и магнитосфере Земли ("Проект АПЭКС", 1990г., г. Липецк), шестом Всероссийском семинаре по проблемам теоретической и прикладной

электронной и ионной оптики (НПО "Орион", 2003г , Москва), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Физико-технологическом центре ИЯФ СО РАН (г Липецк), Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск), Всероссийском электротехническом институте (г. Москва), Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна)

### ***Публикации***

Основные результаты исследований, составивших основу диссертации, опубликованы в 7 печатных работах.

### ***Структура и объем диссертации***

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 25 наименований. Общий объём рукописи – 105 страниц

### **Содержание диссертационной работы**

Содержание работы изложено в четырех главах

**Глава 1** посвящена описанию физических и технических особенностей активного эксперимента с инжекцией электронных пучков в ионосферу с ракетного носителя, условий и цели эксперимента, методик измерения параметров области взаимодействия инжектируемого электронного пучка с ионосферной плазмой с помощью созданного на основе физических представлений и конструкторских решений комплекса научно-диагностической аппаратуры активного эксперимента "Электрон-1". На пути практической реализации пучковых методов зондирования ионосферы возникает ряд как физических, так и технических проблем. Наиболее серьезные из них связаны с механизмом взаимодействия электронов пучка с ионосферной плазмой, нейтрализующей заряд ракеты, с борта которой инжектируется пучок заряженных частиц.



Эксперименты по инъекции электронных пучков в ионосферу позволяют выявить ряд основных характеристик плазменно-пучковых взаимодействий, таких как возникновение пучково-плазменного разряда (ППР), возбуждение электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот. Задачи первых экспериментов по инжектированию электронного пучка с борта ракеты были связаны в первую очередь с применением пучков в качестве пассивных зондов геомагнитного и геоэлектрического полей. В этих экспериментах предполагалось, что электроны пучка при движении в ионосферной плазме подчиняются одночастичной динамике. Отрицательные результаты первых полетов показали, что это допущение неверно и инъекция пучка сопровождается коллективным взаимодействием электронов с окружающей плазмой, прежде всего в зоне инъекции. Поэтому последующие эксперименты в ионосфере и магнитосфере Земли строились на основе характерных для физики плазмы моделей пучково-плазменных взаимодействий, таких как возникновение пучково-плазменного разряда, возбуждение электромагнитных волн и других.

Корпус ракеты представляет собой типичную емкость, и при инъекции в вакуум пучка электронов из пушки, расположенной на борту ракеты, потенциал ракеты возрастает во времени. В отсутствие обратного тока корпус ракеты приобретает потенциал, равный ускоряющему напряжению, и он будет препятствовать инъекции электронного пучка с ракеты. Для компенсации этого эффекта на корпус ракеты должен поступать обратный ток, сравнимый с инжектируемым. В условиях ионосферы этот ток приводит к истощению окружающей ракету плазмы. Ранее был предложен ряд возможных механизмов для пополнения этой плазмы, а именно: пучково-плазменный разряд (ППР) и разряд в скрещенных полях. При возбуждении ППР ракета оказывается в облаке сравнительно плотной плазмы, которая может служить источником тока нейтрализации. ППР обеспечивает стабилизацию потенциала ракеты на уровне около сотни вольт.

В первой главе приведено описание комплекса научной аппаратуры, расположенного на головной части "Электрон-1" метеоракеты МР-12, включающего инжектор электронов, блоки

диагностической, регистрирующей и другой функциональной электрофизической аппаратуры (рис.1).

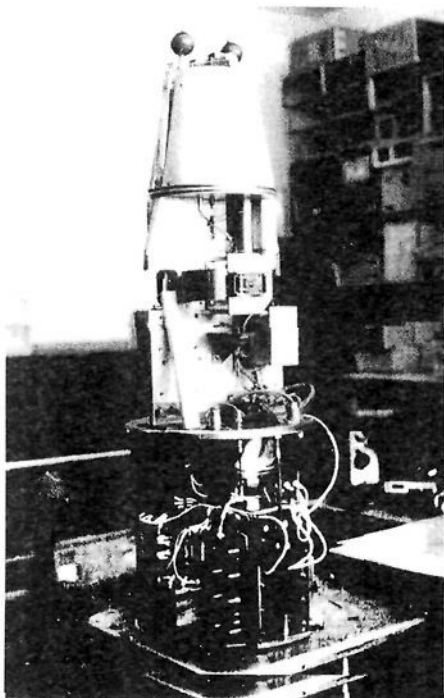
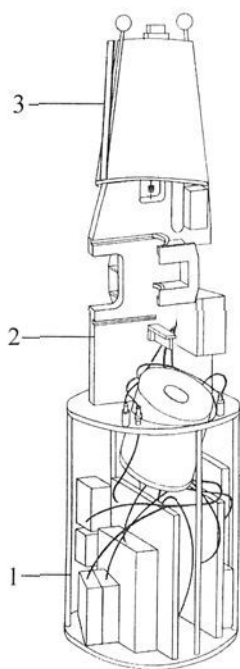


Рис.1. Комплекс научной аппаратуры "Электрон-1": 1 – инжектор электронов; 2 – блок диагностической аппаратуры (контейнеры АКЗ сняты); 3 – контейнер АКВ

Специальное внимание уделено особенностям конструкции и работы инжектора электронов, содержащего высокоперевансную (от 0 до  $0.8 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ) трехэлектродную пушку и обеспечивающего генерацию пучка с проектными параметрами, включая модуляцию пучка по току и энергии в низкочастотном и высокочастотном диапазонах. Детально рассмотрена конструкция малогабаритных радиально отделяемых от ракеты автономных диагностических зондовых контейнеров (АКЗ), схема их сброса и параметры траектории, состав аппаратуры контейнеров, состав наземного комплекса диагностики.

Для проведения активного зондирования ионосферы необходимо было сформировать модулированный электронный пучок определенной интенсивности. Из теоретических оценок и экспериментальных результатов следует, что при первеансе пучка, большем  $0,3 \text{ мкА/В}^{3/2}$  (что при энергии электронов 10 кэВ соответствует току 300 мА), на высотах 80-150 км возможно зажигание пучково-плазменного разряда. Поскольку частота модуляции пучка оказывает заметное влияние на процесс взаимодействия пучка с ионосферной плазмой, желательно иметь возможность её перестройки в пределах 1 – 20 кГц. Обычно для формирования электронных пучков применяются диодные и триодные электронные пушки. Главное преимущество диодных пушек – относительная простота фокусировки пучка – в условиях ракетного эксперимента по зондированию ионосферы не играет определяющей роли. Первеанс пучка, сформированного диодной пушкой, зависит только от ее геометрии и не может быть изменён оперативно. Кроме того, создание высоковольтного генератора прямоугольных импульсов напряжения в широком диапазоне частот с амплитудой 10 кВ и током нагрузки до 0,8 А представляет известную технологическую проблему (при ограничении габаритов, веса и энергопитания). В триодной пушке сложнее добиться формирования интенсивного пучка с малым фазовым объемом, зато появляется возможность управления током пучка по потенциалу фокусирующего электрода, что позволяет формировать пучки с различными первеансами (от 0 до  $P_{\text{max}}$ ) в широком диапазоне частот модуляции при фиксированной энергии электронов пучка. Поэтому инжектор электронов был разработан и выполнен на базе трехэлектродной пушки, которая обеспечивает формирование пучков с различными токами при фиксированной энергии частиц и модуляцию тока пучка в широком диапазоне частот.

Вес пушки инжектора составил 3 кг, диаметр 170 мм, высота 90 мм. Катод пушки диаметром 5,3 мм выполнен из гексаборида лантана. В качестве исходной взята геометрия электродов Пирса. Следует отметить, что управляющий электрод пришлось приблизить к катоду по сравнению с геометрией эквипотенциалей в пушке Пирса, чтобы увеличить ее первеанс до  $0,8 \text{ мкА/В}^{3/2}$  и осуществить управление при низком напряжении на управляющем

электроде. Напряжение между катодом и управляющим электродом, при котором происходит полное запираие пушки, составляет  $-1,5$  кВ. При инжекции пучка с максимальным током ( $0,8$  А) напряжение на управляющем электроде равно  $+1,2$  кВ. "Платой" за высокий переанс пушки и возможность управления при низком напряжении на управляющем электроде является относительно высокая угловая расходимость пучка.

Система управления, измерения и контроля работы ускорителя обеспечивает включение преобразователей и электронного коммутатора в заданные моменты времени, эта система обеспечивает также измерение и контроль основных параметров работы ускорителя. Электронный коммутатор включается с частотой  $1,25$  кГц при длительности импульса  $400$  мкс, что приводит к модуляции тока пучка по плотности. Емкость между катодом пушки и управляющим электродом сглаживает глубину модуляции тока на этой частоте до  $80\%$ . Из-за пульсаций напряжения на выходе источника управления имеет место также модуляция тока пучка на частоте  $20$  кГц с глубиной порядка  $20\%$  (удвоенная частота работы преобразователя). Высокочастотная модуляция электронного пучка по скорости обеспечивается резонансным модулятором. Емкостная часть резонансного контура — плоский конденсатор, образуемый анодной пластиной электронной пушки и закрепленной над ней на керамических изоляторах фигурной пластиной с центральным отверстием диаметром  $10$  мм. Переменный потенциал этой пластины и модулирует пучок по энергии. Индуктивная часть контура выполнена в виде отрезка гибкой коаксиальной линии с закорачивающим поршнем. Контур настраивается на минимум коэффициента связи при достаточно низкой добротности во избежание существенной расстройки при проникновении в зазор плазмы на резонансную частоту модуляции  $150$  мГц. Возбуждение резонансного контура осуществляется от генератора мощностью  $P = 1$  Вт. Напряжение на емкости модулятора для условий эксперимента  $\approx 50$  В. Отметим, что уровень ВЧ-модуляции энергии электронов будет несколько ниже, поскольку модулятор работает во времяпрелетном режиме, т. е. в режиме, когда четверть периода модуляции сравнима с временем движения электронов пучка в поле потенциальной пластины модулятора. Как

показывают расчеты, уровень ВЧ-модуляции энергии электронов в отсутствие ионосферной плазмы составляет 20 - 30 эВ.

Блок диагностических контейнеров в сборе представляет собой транспортную горизонтальную панель с вертикальной стойкой, на которой размещены элементы крепления и отделения контейнеров АКЗ и АКВ (рис 2)

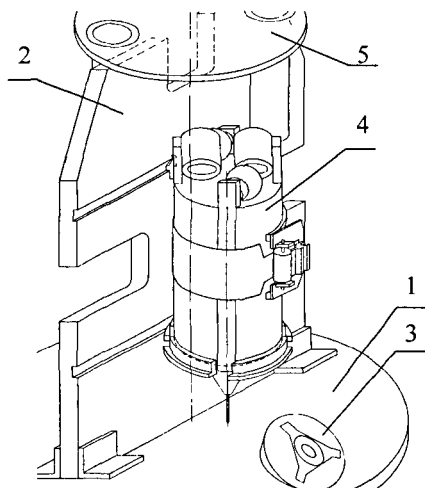


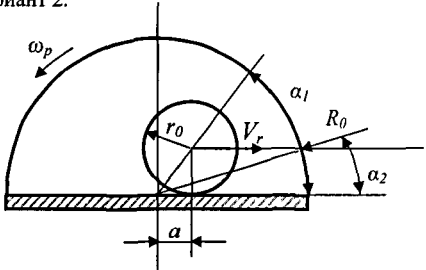
Рис.2. Фрагмент приборного отсека. 1 - транспортная панель, 2 - вертикальная стойка; 3 - электронная пушка; 4 - контейнер АКЗ, 5 - фланец установки контейнера АКВ.

Панель укреплена на верхнем фланце гермоотсека ракеты. В верхней части стойки закреплен фланец системы отделения контейнера АКВ (автономный контейнер волновой)

Конструкция АКЗ и способ их отделения от ракеты определялись рядом условий эксперимента, обусловленных методиками измерений, габаритными ограничениями и собственно спецификой его проведения. Сход должен был обеспечить некоторую линейную радиальную скорость контейнера относительно ракеты для удаления от приборного отсека, чтобы обезопасить раскрытие сложенных при транспортировке штанг с измерительными

датчиками за счет вращения контейнера вокруг собственной оси, и скорость вращения вокруг собственной продольной оси  $\omega_k \geq 1$  об/с после раскрытия штанг. Имея реальные данные по весогабаритным характеристикам контейнера с раскрытыми штангами и сложенного и учитывая, что  $\omega_k$  не может быть менее 1 об/с, мы нашли, что скорость вращения контейнера до раскрытия штанг  $\omega_{k1}$  должна быть не менее 6 об/с. Вращение контейнеров при сходе, используя энергию вращения ракеты вокруг своей оси в точке раскрытия ГЧ с угловой скоростью  $\omega_p$ , обеспечивается конструктивно без применения специальных веществ и механизмов, при этом контейнер закреплен на стойке с начальным смещением центра масс на расстояние  $a$  вправо относительно оси ракеты (рис.3).

Вариант 2.



- $a=0,03$  м
- $r_0=0,06$  м
- $R_0=0,18$  м
- $\omega_p= 4$  об  $c^{-1}$

Рис.3.Сход контейнера АКЗ со стойки ГЧ в эксперименте (расчётная схема), здесь

$V_r$  – скорость центра масс контейнера;  $\omega_k$ – угловая скорость вращения контейнера вокруг собственной оси

Над телом производится работа по перемещению контейнера к периферии, при этом он получает вращение вокруг своей оси и поступательное движение со скоростью  $V_r$ . Контейнер как бы накатывается на набегающую на него стойку. В результате его полная кинетическая энергия увеличивается.

Тогда радиальная скорость схода контейнера равна  $V_r = 3,64$  м/с,

частота обращения контейнера  $\omega_{к/л} = 9,66 \text{ об } \text{с}^{-1}$ ,

полная скорость схода составляет  $V_{сх} = 5,8 \text{ м } \text{с}^{-1}$

После раскрытия штанг частота вращения контейнера упадет за счет увеличения момента инерции системы до величины  $\omega_{к} = 1,94 \text{ об/сек}$ .

Таким образом, принятый для технического воплощения вариант способа отделения контейнеров АКЗ от головной части ракеты обеспечивал необходимую для эффективного функционирования диагностической аппаратуры скорость их вращения вокруг собственной продольной оси.

Разработка комплекса научной аппаратуры "Электрон-1" для проведения эксперимента в ионосфере на высотах 100 - 200 км с инъекцией пучка электронов с носителя осуществлялась применительно к метеорологическим ракетам типа МР-12 – МР-20. Эксперимент проведён с использованием метеоракеты МР-12.

В главе 2 представлены результаты активного ракетного эксперимента "Электрон-1", включающие этапы полётных событий, результаты измерений потенциала ракеты и параметров плазмы в околоракетной области и анализ радиоизлучений при инъекции модулированного электронного пучка.

Траектория ракеты и основные этапы эксперимента показаны на рис.4 и представлены в таблице. Параметры плазмы в окрестности ракеты получены в измерениях потоков тепловых электронов и ионов с энергией до 15 эВ сеточными анализаторами СЭЛ (сеточная электронная ловушка) и ПСАИ (плоский сеточный анализатор ионов), а также радиоизлучения из области инъекции. Спектр электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 2 кэВ получен с помощью многокамерных электронных ловушек Фарадея (МЭЛФ) с анализирующей сеткой. Поток надтепловых электронов, зарегистрированный анализатором возвратных электронов МЭЛФ при запирающем напряжении на анализирующей сетке 10 В в момент времени  $\tau = 5 \text{ мс}$ , примерно, в 50 раз выше по сравнению с потоком надтепловых

электронов, зарегистрированным СЭЛ в момент времени 32,6 мс.

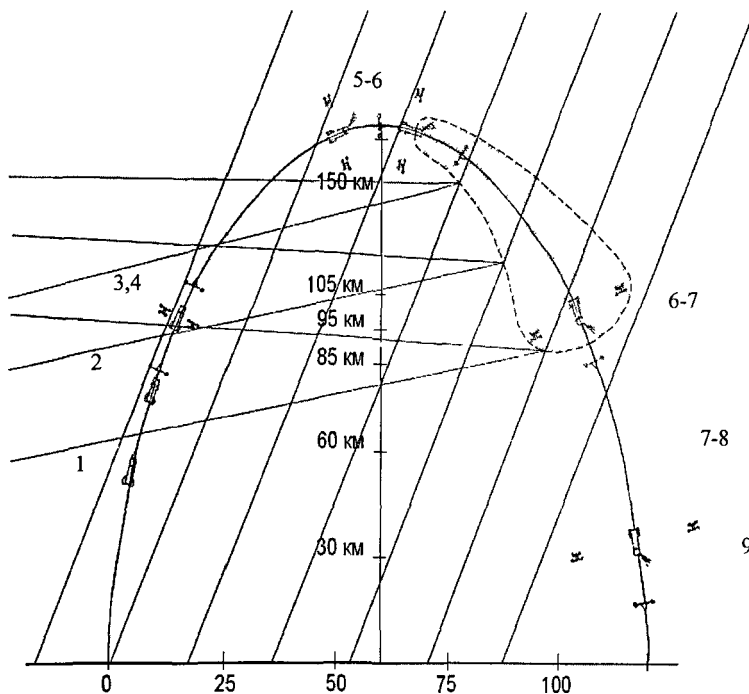


Рис. 4 Траектория ракеты

Таблица

Участок траектории	Высота, км	Время, с	Событие
1	60	60	Начало нагрева катода
2	85	85	Отделение контейнеров АКВ
3	105	105	Отделение контейнеров АКЗ
4	105	105	Включение ускоряющего напряжения в пушке
5-6	150-152	193-210	Инжекция пучка, сопровождающаяся пробоями в пушке
6-7	152-95	210-316	Штатный режим работы пушки 8кВ; 0,45 А, $f = 3$ Гц
7-8	95-30	316-373	Инжекция пучка, сопровождающаяся пробоями в пушке
9	30	373	Последний импульс инжекции



Это, по-видимому, связано с расположением МЭЛФ, окна которых находятся в области инжекции перекомпенсированного электронного пучка, а окна СЭЛ расположены в "тени" для электронов пучка. Поскольку при давлениях  $P > 10^{-5}$  Торр пучок перекомпенсирован и положительно заряжен, то электроны плазмы уходят на ракету вдоль пучка, в результате чего поток надтепловых электронов в области распространения пучка может быть существенно выше, чем вне этой области.

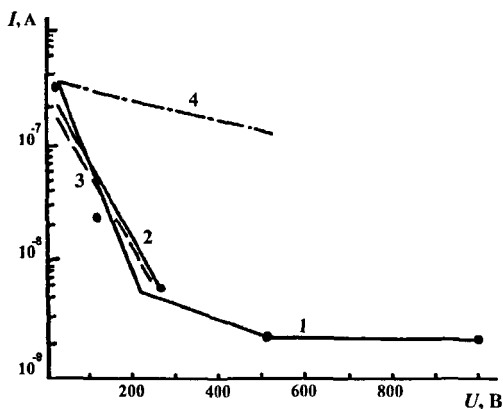


Рис. 5. Зависимость тока возвратных электронов от энергии

$h = 130$  км; 1 – эксперимент, 2 - 4 – расчеты: 2 -  $\varphi_p = 10$  В, 3 -  $\varphi_p = 50$  В, 4 -  $\varphi_p = 0,5$  кВ

По результатам измерений спектра возвратных электронов можно оценить потенциал ракеты во время инжекции пучка, поскольку этот спектр зависит от температуры электронов и величины потенциала. На рис.5 приведены расчетные зависимости тока возвратных электронов при различных значениях потенциала ракеты:

$$I = neS \left( \frac{m}{2\pi T} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \left( v^2 + \frac{2e(\varphi_p - U)}{m} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{mv^2}{2T} \right) dv,$$

где  $\varphi_p, U$  — потенциал ракеты и анализирующей сетки МЭЛФ,  $S$  — площадь окна МЭЛФ. Теоретические и экспериментальные кривые близки при потенциале ракеты, не превышающем +50 В.

Плотность плазмы в области инжекции пучка может быть определена на основе данных радиозондирования на базе Казань — Волгоград — Новочеркасск (рис.6).

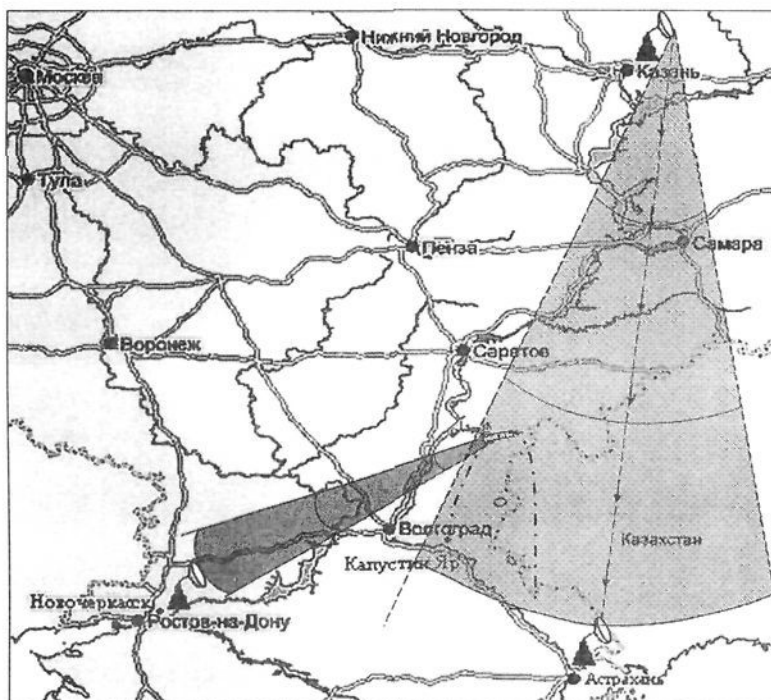


Рис.6. Схема эксперимента по трассированию радиоволн через область инжекции

В эксперименте зафиксировано рассеяние радиоволн с частотой 23,7 МГц во время инжекции пучка вблизи апогея (150 км). Учитывая, что рассеяние радиоволн на большие углы (в эксперименте угол рассеяния составляет  $60^\circ$ ) на неоднородностях плазмы происходит, когда ленгмюровская частота сравнима с частотой радиоволн, можно оценить

плотность плазмы в области инжекции пучка. Для частоты 23,7 МГц она составляет  $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ , что на порядок превышает плотность фоновой плазмы.

Одной из особенностей эксперимента "Электрон-1" является исследование волнового излучения в диапазоне 100 - 500 МГц, возникающего при инжекции модулированного электронного пучка в ионосферу. Высокочастотная модуляция пучка по энергии на частоте, близкой к частотам спонтанного излучения плазмы, приводит к трансформации спектра излучения (в зависимости от положения частоты модуляции относительно спектра спонтанной генерации излучение становится монохроматическим на частоте модуляции, либо имеет сложный спектр, в котором присутствуют и монохроматическая и широкополосная компоненты), возрастает на 7-10 дБ интегральная по спектру интенсивность излучения. Таким образом, с помощью ВЧ-модуляции пучка слабым сигналом (глубина модуляции пучка по энергии составляет порядка 0,2%) можно эффективно управлять параметрами электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии модулированного пучка с плазмой (рис 7). Наземным приемником излучения в этом диапазоне частот служит панорамный анализатор спектра.

Приведенные выше результаты позволяют предполагать, что локальный ППР с плотностью  $(2-4) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  загорается на высотах 150 и 100 км. Наблюдаемые уровни излучения позволяют оценить коэффициент преобразования энергии пучка в энергию электромагнитных волн. Для монохроматического излучения (рис.7 б) при внешней модуляции пучка эта оценка дает величину около 1%.

**Третья глава** содержит результаты и описание лабораторных экспериментов на вакуумных стендовых установках "Электрон-М" и "Электрон" с целью моделирования физических процессов, возникающих при инжекции пучка в ионосферную плазму, с использованием полетных вариантов электронной пушки и диагностических датчиков. В главе описаны лабораторные эксперименты по измерению потенциала автономного изолированного инжектора электронов и определению основных параметров пучково-плазменного разряда.

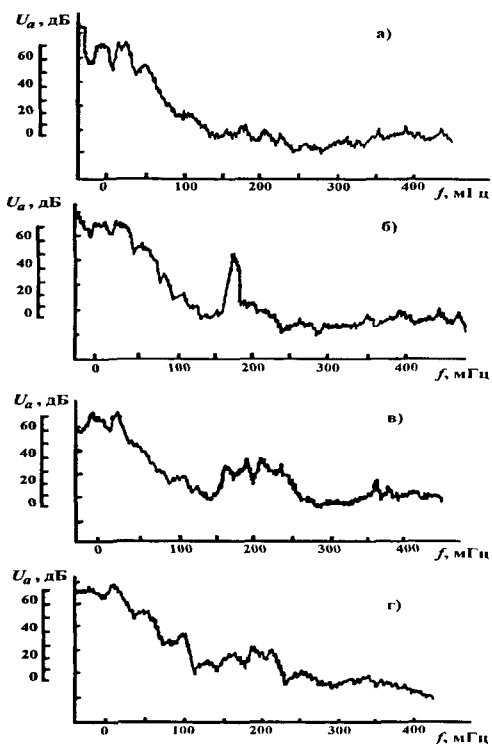


Рис 7 Спектры радиоизлучения

а – 180 с, б – 190 с, в – 193 с, г – 316 с

В лабораторных исследованиях на стенде "Электрон-М" в первой серии экспериментов определялся потенциал, до которого заряжается корпус пушки, изолируемый при инъекции электронного пучка в разреженный газ. Электронная пушка была установлена на изоляторах внутри вакуумной камеры. В проводимых лабораторных экспериментах полетный вариант инжектора запитывался от блока питания, гальванически развязанного от сети и работающего от авиационной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи. В

результате эксперимента построена зависимость потенциала корпуса пушки от давления при трех значениях ускоряющего напряжения: 3,5 кВ; 6 кВ и 7 кВ. С ростом разности потенциала между катодом и анодом электронной пушки увеличивается и потенциал ее корпуса, который достигает максимального значения, равного 200 В при  $P = 3 \cdot 10^{-4}$  Торр,  $U = 7$  кВ и  $I = 0,4$  А. При последующем увеличении давления потенциал уменьшался, что, видимо, связано с увеличением возвратного тока нейтрализации вторичных электронов, рождаемых при столкновении тепловых электронов с нейтральными атомами. А при давлении  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр наблюдается лавинообразное нарастание плотности плазмы, что приводит к увеличению тока нейтрализации и снижению потенциала корпуса электронной пушки до 30 В. Это еще раз подтверждает, что в активных ракетных экспериментах с инжекцией электронного пучка в ионосферную плазму корпус ракеты заряжается до потенциала порядка сотни вольт.

Таким образом, лабораторные эксперименты указывают, что в условиях, близких к условиям натурального эксперимента "Электрон-1" (давление  $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$  Торр, что соответствует высотам около 100 км), развивается пучково-плазменный разряд и образуется плазма с плотностью  $2 \div 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ .

**В четвертой главе** дан анализ результатов ракетного и стендовых экспериментов.

В проведенном эксперименте наблюдалось интенсивное взаимодействие электронного пучка с ионосферной плазмой. На это указывают результаты сравнения корпускулярных измерений на ракете и на автономных контейнерах, результаты измерений радиоизлучения в диапазоне частот 100-150 МГц, данные радиотрассирования с регистрацией излучения с частотой 23,7 МГц, рассеянного на угол  $60^\circ$  на базе 450 км. Обнаружено, что инжекция электронного пучка приводит к нагреву электронов плазмы до температуры 1,5 - 2 эВ, при этом появляется группа надтепловых электронов с температурой 75 эВ и концентрацией порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . Надтепловые электроны, по-видимому, приводят к развитию пучково-плазменного разряда и к образованию плазмы с плотностью порядка  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Наиболее

вероятной причиной нагрева электронов плазмы до температуры около 75 эВ является пучково-плазменная неустойчивость. Потенциал ракеты во время инъекции пучка не превышает +50 В

Экспериментально исследовано влияние внешней модуляции пучка на характеристики разряда в активном эксперименте в космосе. Показано, что наличие высокочастотной модуляции ( $f_m = 150$  МГц), даже при ее глубине 0,2% приводит к генерации монохроматического излучения, уровень которого на 20 дБ превышает уровень широкополосного излучения, возникающего в отсутствие внешней модуляции пучка

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

## **Выводы**

1 Разработан физический проект активного эксперимента с инъекцией электронного пучка в ионосферную плазму с носителя – метеоракеты МР-12

1.1 Разработана и оптимизирована схема постановки активного эксперимента, включающая последовательность развертывания и времени включения научной аппаратуры с указанием соответствующих высот, относительных скоростей и направления полета отделяемых контейнеров, направление инъекции и расходимость пучка, геометрию области пучково-плазменного разряда

1.2 Обоснован способ отделения автономных зондовых и волнового контейнеров от головной части ракеты и рассчитаны параметры их движения

2. Разработана конструкция головной части "Электрон-1" ракеты МР-12, несущая отделяемые контейнеры и комплекс аппаратуры для инъекции модулированного электронного пучка в ионосферную плазму и диагностики параметров плазмы.

2.1. Разработана, сконструирована и впервые реализована в активном эксперименте в ионосфере электронная пушка, предназначенная для формирования электронного пучка, модулированного в низкочастотном и высокочастотном диапазонах с целью эффективной генерации волновых излучений.

- 2 2. Впервые для метеорокетов класса МР-12 разработаны и изготовлены оригинальные автономные отделяемые контейнеры, выбраны схема и способ их отделения от ракеты. Отделяемые от метеорокеты контейнеры обеспечили регистрацию параметров области взаимодействия электронного пучка с ионосферной плазмой в околоракетной области и их автономное телеметрирование.
3. Осуществлен успешный запуск ракеты МР-12, обеспечена работа всех компонентов научной аппаратуры в ионосфере и наземного комплекса в штатном режиме.
- 3 1. Зафиксировано зажигание пучково-плазменного разряда на высотах от 150 км в апогее и до 90 км на нисходящей части баллистической траектории, проведены измерения параметров зарядки и нейтрализации ракеты в периоды инжекции электронных пучков в ионосферу, структуры области ППР и их передача на наземные регистрирующие комплексы.
- 3 2. Впервые осуществлено трассирование радиоволн через область инжекции электронного пучка с расстояния 850 км и зарегистрировано их отражение от области ППР под углом  $60^\circ$  к направлению трассирования на расстоянии 450 км от области разряда.
- 3 3. Впервые зарегистрирована генерация радиоизлучений из околоракетного пространства на частотах модуляции энергии электронов пучка при глубине модуляции 0,2% и измерены волновые излучения из области разряда, интенсивность которых более чем на порядок превышает излучение, генерируемое немодулированным пучком.
4. Проведены лабораторные эксперименты, моделирующие полётные условия эксперимента, на вакуумных стендовых установках с использованием полётных вариантов электронной пушки и диагностических датчиков. Исследовано взаимодействие электронных пучков с разреженным газом в широком диапазоне давлений, проведены измерения основных параметров ППР, исследованы процессы зарядки автономного ускорителя при инжекции с

него электронного пучка, проведена калибровка диагностической аппаратуры для активных экспериментов в ионосфере

**Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе в российских и иностранных рецензируемых журналах:**

- 1 *Быковский В Ф, Горячев С Б, Дорошкин А А и др* Взаимодействие электронного пучка с ионосферной плазмой в эксперименте "Электрон-1" Проект АПЭКС. Научные задачи, моделирование и техника проведения экспериментов. М.: ИЗМИРАН, 1991
- 2 *Быковский В Ф, Горячев С Б, Дорошкин А А и др* Комплекс аппаратуры и результаты активного эксперимента "Электрон-1" с инжекцией электронного пучка в ионосферу Препринт ИЯФ СОРАН, 91-62, 1991, Новосибирск.
- 3 *Быковский В Ф, Горячев С Б, Мешков И Н и др* Комплекс аппаратуры и оборудования активного эксперимента "Электрон-1" с инжекцией электронного пучка Космические исследования, т.29, №5, 1991, с.722-728.
- 4 *Быковский В Ф, Горячев С Б, Дорошкин А А и др* Взаимодействие электронного пучка с ионосферной плазмой в активном эксперименте "Электрон-1" Физика плазмы, 1992, т 18, вып. 5, с 595-602.
- 5 *Быковский В Ф, Мешков И Н, Селезнев И А, Сыресин Е М* Эксперименты по инжекции электронного пучка в ионосферную плазму и разреженный газ Прикладная физика, №1, 2004, с. 7-13.
- 6 *Bykovsky V F, Meshkov I N, Seleznev I A, Syresin E M* Experiments with electron beam injection in ionosphere plasma and rare gas. "SPIE, Optical Engineering", v.5398, 2004, p 119-125
- 7 *Bykovsky V F, Meshkov I N, Seleznev I A, Syresin E M* Experiments with electron beam injection in ionosphere plasma and rare gas Препринт ОИЯИ, Е9-2003-137, 2003, Дубна

Получено 4 апреля 2007 г



Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 05.04.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,44. Тираж 100 экз. Заказ № 55735.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)