

УДК 533.537

Эксперименты по инъекции электронного пучка в ионосферную плазму и разреженный газ

В. Ф. Быковский, И. Н. Мешков, И. А. Селезнев, Е. М. Сыресин
Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл., Россия

Представлены результаты активного эксперимента "Электрон" по инъекции модулированного электронного пучка с током 0,5 А и энергией электронов 6,5—8 кэВ в ионосферную плазму на высотах 90—150 км; спектрограммы радиоизлучения в диапазоне частот 100—500 МГц; данные по трассированию радиоволн через область инъекции и спектры энергии возвратных электронов и ионов, приходящих на метеоракету. Оценен потенциал ракеты. Обсуждены данные лабораторных экспериментов по инъекции электронного пучка в разреженный газ.

Активный ракетный эксперимент "Электрон"

Эксперименты с инъекцией электронных пучков с борта космических аппаратов в ионосфере и магнитосфере Земли позволяют исследовать большой круг проблем геофизики и физики плазмы при контролируемых начальных условиях [1—5]. Такие исследования дают возможность выявить ряд основных характеристик пучково-плазменных взаимодействий, таких как возникновение пучково-плазменного разряда, возбуждение электромагнитных колебаний, трассирование околоземного пространства электронными пучками на большие расстояния, возникновение полярных сияний и магнитных бурь. Для проведения активных экспериментов на высотах 100—200 км с использованием метеорокетов типа МР-12—МР-20 разработан комплекс научной аппаратуры "Электрон" [6—9], включающий бортовой инжектор электронов, блок диагностической аппаратуры и блок отделяемых автономных диагностических контейнеров (рис. 1). Особенности комплекса являются применение инжектора с высокоперевансной электронной пушкой ($0,8 \text{ мкА/В}^{3/2}$) и модуляцией энергии электронов в НЧ- и ВЧ-диапазонах в целях возбуждения волновых процессов в ионосферной плазме; использование трех автономных диагностических контейнеров; измерение быстрых процессов с временным разрешением 1 мс.

В состав задач ракетного эксперимента "Электрон" входили генерация электромагнитного излучения модулированным электронным пучком при взаимодействии с ионосферной плазмой; формирование пучково-плазменного разряда в окрестности метеорокеты; исследование рассеяния электромагнитных волн при их трассировании через плазменную область, создаваемую электронным пучком; измерение параметров околоракетной плазмы с помощью диагностического комплекса, установленного на метеорокете; сканирование плазмы, окружающей метеорокету, с помощью трех отделяемых контей-

неров; исследование зарядки метеорокеты при инъекции электронного пучка.

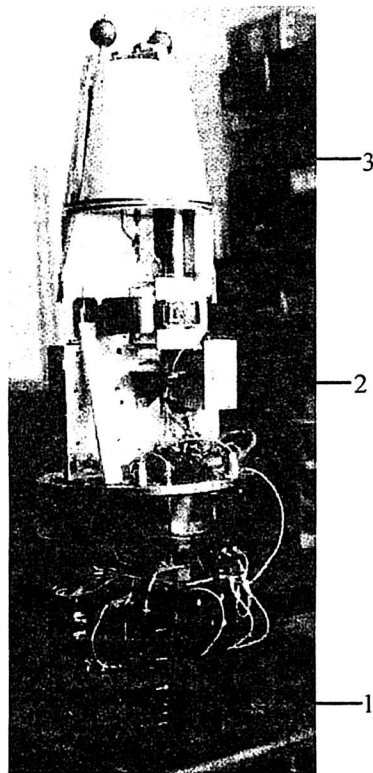


Рис. 1. Комплекс научной аппаратуры "Электрон":
1 — инжектор электронов; 2 — блок диагностической аппаратуры; 3 — контейнер АКВ, контейнеры АКЗ сняты

Состав аппаратуры

В ракетных экспериментах с электронными пучками в зависимости от решаемых задач применяется большой набор диагностической аппаратуры: датчики частиц, детекторы волновых и оптических излучений, а также измерители напряженности квазистатических электрического и магнитного полей. Оптимальный выбор количества и типа датчиков в каждом конкретном случае диктуется решаемой задачей, условиями из-

мерения и "служебными" возможностями летательного аппарата (телеметрией, допустимыми массогабаритными и энергетическими характеристиками и т. п.). При выборе диагностической аппаратуры "Электрон" было учтено следующее: пучково-плазменный разряд (ППР), инициированный электронным пучком, сопровождается генерацией электромагнитного и оптического излучения и увеличением концентрации и температуры заряженных частиц в области разряда. Измерение характерных параметров этих явлений (спектр ВЧ и НЧ электромагнитных волн, концентрация и энергетический спектр заряженных частиц, яркость и спектр оптических излучений) позволяет изучать условия зажигания пучково-плазменного разряда и физику плазменно-пучковых взаимодействий. Для этого на приборном отсеке метеоракеты установлены плоские сеточные анализаторы энергии и концентрации тепловых и надтепловых заряженных частиц в диапазоне энергий 0—20 эВ (плоский сеточный анализатор ионов — ПСАИ и сеточная электронная ловушка — СЭЛ) [7—8]. Аналогичные измерители концентрации ионов и электронов установлены на автономных зондовых контейнерах в дополнение к датчикам частиц на приборном отсеке; на контейнерах размещены также датчики напряженности квазистатического электрического поля. Спектроанализаторы электромагнитных излучений установлены на автономном волновом контейнере.

Для исследования процесса зарядки ракеты в момент инъекции электронного пучка помимо перечисленной выше диагностической аппаратуры на приборном отсеке установлен измеритель возвратных электронов — многокамерная электронная ловушка Фарадея (МЭЛФ) с фиксированным набором запирающих напряжений от 10 до 1000 В (шесть уровней). Она предназначена для определения энергетического спектра электронов, поступающих на ракету непосредственно после импульса инъекции. Масса блока электронных ловушек составляет 1,4 кг, габариты — 70x120x100 мм.

При проведении эксперимента "Электрон" дополнительная научная информация о ППР была получена с помощью наземного измерительного комплекса, включающего радиолокационную станцию и спектроанализаторы радиочастот.

Автономные отделяемые контейнеры

Первые активные эксперименты [1—5] продемонстрировали широкие возможности исследования ионосферы и космического пространства с помощью электронных пучков. Наиболее приемлемым экспериментальным средством решения такого рода задач являются автономные отделяемые контейнеры с диагностической аппаратурой. Они обеспечивают возможность сканирования пространства вокруг основного при-

борного отсека, несущего ускоритель электронов, и позволяют избавиться от электромагнитных помех, вызванных высоким потенциалом ракеты в момент инъекции пучка и работой аппаратуры ускорителя.

В эксперименте "Электрон" использованы три отделяемых контейнера [7, 8]: два контейнера типа АКЗ (автономный контейнер зондовый) отделяются радиально относительно продольной оси ракеты в двух взаимно противоположных направлениях и один контейнер типа АКВ (автономный контейнер волновой) — вдоль оси ракеты. Диагностика АКВ предназначена для исследования волновых явлений. АКВ содержит спектроанализаторы электромагнитных излучений, а также радиотелеметрическую аппаратуру.

Диагностика контейнеров АКЗ предназначена для зондовых измерений параметров плазмы и квазистатических электрических и магнитных полей. На зондовых контейнерах АКЗ размещены датчики концентрации ионов и электронов, двухзондовые детекторы напряженности квазистатического электрического поля, измерители продольной и поперечной компонент напряженности магнитного поля и радиотелеметрическая аппаратура. Масса АКЗ 3,5 кг, диаметр контейнера (с закрытыми штангами датчиков) 125 мм, длина 190 мм.

Бортовой инжектор электронов

Инжектор электронов [10] выполнен на базе трехэлектродной пушки с открытым резонатором на выходе, что обеспечивает как формирование пучков с изменяемым первеансом при фиксированной энергии частиц, так и модуляцию электронов по энергии в широком диапазоне частот. Масса пушки инжектора 3 кг, диаметр 170 мм, высота 90 мм.

Катод пушки диаметром 5,3 мм выполнен из гексаборида лантана, что предпочтительнее для активных экспериментов в космосе, так как он требует умеренной мощности подогрева, порядка 200 Вт/см², допускает в холодном состоянии контакт с воздухом и может работать вплоть до давления 10⁻² Торр. В качестве исходной взята геометрия электродов Пирса. Следует отметить, что управляющий электрод (диафрагму) пришлось приблизить к катоду по сравнению с геометрией эквипотенциалей в пушке Пирса, чтобы увеличить ее первеанс до 0,8 мкА/В^{3/2} и осуществить управление током пучка при низком напряжении на управляющем электроде. Напряжение между катодом и управляющим электродом, при котором происходит полное запираение пушки, составляет 1,5 кВ. При инъекции пучка напряжение на управляющем электроде равно 0,5 кВ, а ток пучка составляет 0,5 А. Из-за пульсаций напряжения на выходе источника управления имеет место модуляция тока пушки на частоте 20 кГц с глубиной порядка 20 %.

Высокочастотная модуляция энергии электронов пучка обеспечивается резонатором на выходе пушки. 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. Потенциал этой пластины и модулирует пучок по энергии: электроны пучка быстро ускоряются на зазоре открытого резонатора, а затем сравнительно медленно тормозятся в поле его потенциальной пластины. Индуктивная часть контура выполнена в виде отрезка гибкой коаксиальной линии с закорачивающим поршнем. На резонансной частоте модуляции 150 МГц добротность контура $Q = 8$. Возбуждение резонансного контура осуществляется от генератора мощностью $P = 1$ Вт через коаксиальную линию, гальванически связанную с короткозамкнутой линией контура. Как показывают расчеты, уровень ВЧ-модуляции энергии электронов в отсутствие ионосферной плазмы составляет 20–30 эВ.

Результаты активного эксперимента "Электрон"

Инжекция электронного пучка в эксперименте "Электрон" началась со 193-й секунды, когда ракета находилась в апогее на высоте 150 км, и продолжалась на всем нисходящем участке траектории до высот примерно 30 км. При снижении ракеты с высоты 150 до 95 км инжектор работал в штатном режиме, ускоряющее напряжение за время импульса инжекции изменялось от 8 до 6,5 кВ, ток инжекции составлял 0,45 А, частота следования импульсов — 3 Гц, длительность импульсов — 40 мс.

Генерация электромагнитного излучения модулированным электронным пучком

Одной из особенностей эксперимента "Электрон" является исследование волнового излучения в диапазоне частот 100–500 МГц, возникающего при инжекции модулированного электронного пучка в ионосферу [6, 7, 9]. 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 (рис. 2). Интегральная интенсивность излучения возрастает на 7–10 дБ при высокочастотной модуляции энергии электронов пучка. С помощью ВЧ-модуляции пучка слабым сигналом (глубина модуляции пучка по энергии составля-

ет порядка 0,2 %) можно эффективно управлять параметрами электромагнитного излучения, возникающего при взаимодействии модулированного пучка с плазмой. Электронный пучок при взаимодействии с плазмой значительно усиливает радиосигнал электромагнитного излучения, при этом подобно обычной антенне работает как монохроматический излучатель в метровом диапазоне длин волн.

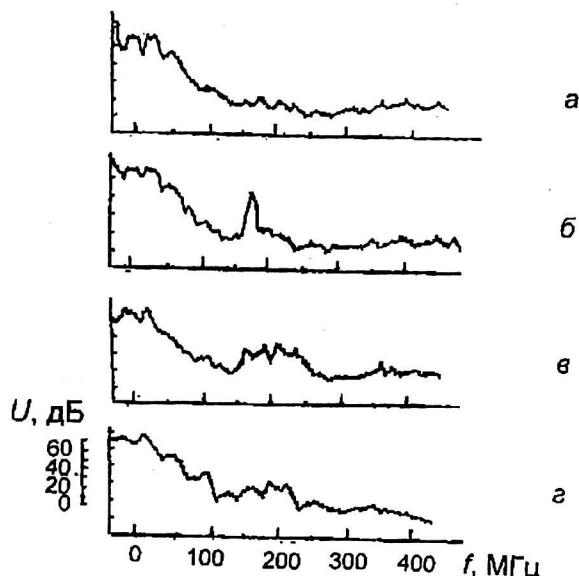


Рис. 2. Спектры радиоизлучения: а — 180 с; б — 190 с; в — 193 с; з — 316 с

Наземным приемником излучения в этом диапазоне частот служит панорамный анализатор спектра. Высокий уровень помех затруднял идентификацию радиоизлучения из околоракетной области. На рис. 2, а показана спектрограмма, полученная в отсутствие инжекции пучка и характеризующая стационарный уровень шумов в поле приема, на фоне которого регистрируются полезные сигналы. Интенсивные сигналы, имеющие вид узкополосного пика на частоте модуляции, наблюдались на начальной стадии инжекции (см. рис. 2, б). Их уровень на 50 дБ превышает уровень фона и широкополосного излучения в интервале 150–250 МГц с интенсивностью на 20 дБ выше фоновой. Генерация последнего на высотах около 150 км (см. рис. 2, в) была связана с влиянием "собственной" атмосферы метеоракеты, когда она еще находилась на восходящем участке траектории. Интенсивные сигналы наблюдались вновь на спуске при высотах около 100 км (316 с, см. рис. 2, з). На этих высотах наблюдалось как широкополосное, так и монохроматическое излучение.

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

внешней модуляции пучка эта оценка дает величину 10^{-2} .

Трассирование радиоволнами

Наряду с корпускулярными и волновыми измерениями на борту метеоракеты и на отделяемых контейнерах в эксперименте "Электрон" предусмотрена регистрация излучения в радиодиапазоне наземной диагностической аппаратурой [6, 7, 9]. Для индикации возникновения неоднородностей плазмы при инъекции пучка в эксперименте используется ионосферная станция, работающая в диапазоне частот 1–15 МГц. Имеется также возможность трассирования радиоволн с частотой 23,7 МГц через область инъекции пучка на базе Казань (излучатель) — Волгоград (рассеиватель) — Новочеркасск (приемник) (рис. 3). Угол рассеяния составляет около 60° , расстояние рассеиватель—приемник равно примерно 450 км. Учитывая, что рассеяние радиоволн на большие углы на неоднородностях плазмы происходит, когда ленгмюровская частота сравнима с частотой радиоволн, можно оценить плотность плазмы в области инъекции пучка. Для частоты 23,7 МГц она составляет $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, что на порядок превышает плотность фоновой плазмы. Наличие рассеянного излучения при зондировании радиосигналами с частотой 23,7 МГц на высотах около 150 км позволяет предположить образование крупномасштабного разряда с плотностью плазмы порядка $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

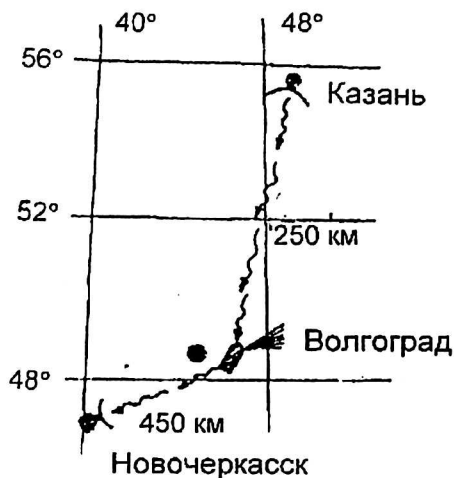


Рис. 3. Схема эксперимента по трассированию радиоволнами области инъекции

Параметры околоракетной плазмы

Профиль концентрации невозмущенной ионосферной плазмы получен в результате зондовых измерений на АКЗ, когда они удалились от ракеты на расстояние более 700 м (220–316 с, высота 150–95 км (рис. 4).

Уровень низкочастотных волн до 1 кГц получен с помощью датчика электрического поля, размещенного на АКЗ. На расстоянии около 1 км от ракеты в диаметральной направлении

уровень электрических полей составлял порядка 10 мВ/м и был на пределе чувствительности датчика.

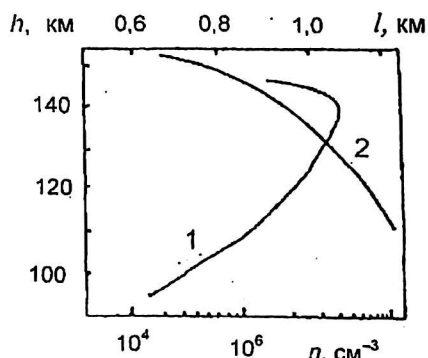


Рис. 4. Зависимость концентрации ионов ионосферной плазмы от высоты (кривая 1). Расстояние между АКЗ и ракетой (кривая 2)

Параметры плазмы в окрестности ракеты получены в измерениях потоков тепловых электронов и ионов сеточными анализаторами СЭЛ и ПСАИ (рис. 5), а также радиоизлучения из области инъекции. Результаты измерений электронных и ионных потоков приведены для двух моментов времени: спустя 32,6 и 49,4 мс после начала инъекции (см. рис. 5, а, б). Температура электронов в момент 32,6 мс составляет 1,7 эВ, для 49,4 мс она равна 0,5 эВ. Концентрация электронов, полученная в измерениях на высоте 110 км, составляет $6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Как видно из рис. 5, а, наряду с тепловыми электронами с температурой 1,7 эВ в момент 32,6 мс после начала инъекции существует группа надтепловых электронов с энергией выше 15 эВ, а по окончании инъекции (49,4 мс) надтепловых электронов нет. Энергия ионов в момент времени 32,6 мс равна 1,5 эВ, без пучка (49,4 мс) она понижается до величины примерно 0,2 эВ (см. рис. 5, б). Ионный ток ПСАИ примерно в 100 раз ниже, чем электронный. Ток ионов на ракету, по-видимому, связан с перекомпенсацией электронного пучка и их уходом из области пучка на ракету.

Спектр электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 2 кэВ получен с помощью многокамерных ловушек Фарадея с анализирующей сеткой (рис. 6). Из этих результатов следует, что существуют две группы возвратных электронов: надтепловые электроны плазмы с температурой около 75 эВ и концентрацией порядка $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и электроны с энергией на уровне 1 кэВ и плотностью около 10 см^{-3} .

По результатам измерений спектра возвратных электронов можно оценить потенциал ракеты во время инъекции пучка, поскольку этот спектр зависит от температуры электронов и величины потенциала. На рис. 6 приведены расчеты зависимости тока возвратных электронов при различных значениях потенциала ракеты. Теоретические и экспериментальные кривые близки при потенциале ракеты, не превышающем +50 В.

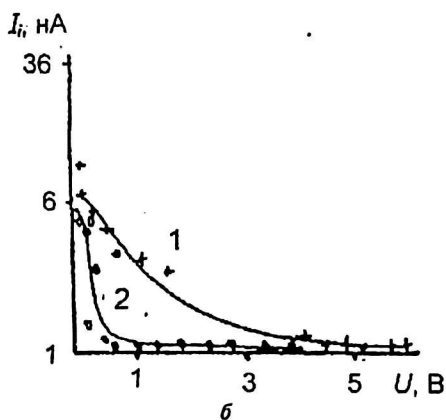
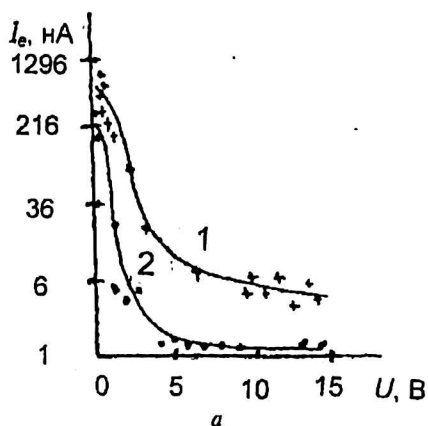


Рис. 5. Зависимость электронного тока от потенциала на $h = 110$ км:

a — на анализирующей сетке СЭЛ; *b* — на анализирующей сетке ПСАИ; 1 — $\tau = 32,6$ мс; 2 — $\tau = 49,4$ мс

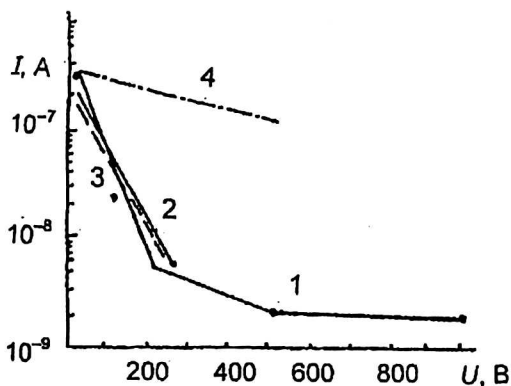


Рис. 6. Зависимость тока возвратных электронов от энергии на $h = 130$ км:

1 — эксперимент; 2—4 — расчеты; 2 — $\phi_p = 10$ В; 3 — $\phi_p = 50$ В; 4 — $\phi_p = 0,50$ кВ

Данные корпускулярных измерений показывают, что инжекция пучка приводит к нагреву электронов плазмы с исходной концентрацией порядка 10^5 см⁻³ до температуры 1,5–2 эВ, при этом появляется группа надтепловых электронов с энергией 75 эВ и концентрацией порядка 10^4 см⁻³. Потенциал ракеты, как это следует из анализа спектра быстрых электронов, спустя 5 мс после начала инжекции не превышает +50 В.

Стендовые эксперименты по инжекции электронного пучка в разреженный газ

Пучково-плазменный разряд. Для моделирования физических процессов, возникающих при инжекции пучка в космическую плазму, проведены лабораторные эксперименты [11–13]. В этих экспериментах использованы полетные варианты электронной пушки и диагностических датчиков. Эксперименты выполнены на стенде, рабочая камера которого имеет диаметр 1 м и длину 1,7 м. Исследование пучково-плазменных взаимодействий проводилось на основе оптических и зондовых измерений. В эксперименте обнаружено [11–13], что с увеличением давления развитие разряда происходит пороговым образом и сопровождается резким возрастанием интенсивности свечения газа. Аналогичный эффект наблюдается в ракетном эксперименте, когда уровень радиоизлучения с 5 дБ пороговым образом возрастает до 20 дБ на высоте 95 км. При увеличении давления выше порогового сигнал с ФЭУ растет только до определенного значения, которое зависит от параметров пучка. Снижение интенсивности и срыв ППР при давлении $7 \cdot 10^{-3}$ Торр связаны с влиянием столкновений электронов с нейтронами на развитие пучково-плазменной неустойчивости. Параметры плазмы, образуемой при развитии ППР, в лабораторных экспериментах измерены сеточными зондами СЭЛ и ПСАИ. В плазме существуют две группы электронов: тепловые с энергией около 5 эВ и быстрые с энергией 10–20 эВ. Более детальный спектр быстрых электронов получен с помощью анализатора МЭЛФ. Наряду с электронами с энергией около 15 эВ существует группа электронов с энергией около 100 эВ и плотностью в 5 раз меньшей. Спектральные характеристики электронного тока, полученные в лабораторных экспериментах, находятся в согласии с результатами ракетного эксперимента (см. рис. 5, 6). Зависимости коллекторного тока МЭЛФ от давления в вакуумной камере при потенциале на анализирующей сетке $U_a = 12$ В и $I = 0,5$ А (рис. 7) для двух моментов времени после начала инжекции показывают, что пучково-плазменный разряд формируется спустя несколько миллисекунд после начала инжекции. Порог развития разряда по давлению, полученный из результатов зондовых измерений, находится в согласии с данными оптических наблюдений.

Параметры ионов в лабораторном эксперименте получены анализатором ионов ПСАИ, перед входным отверстием которого установлен постоянный магнит, формирующий поперечное к оси датчика поле. Величина поля выбрана такой, чтобы оно не возмущало траектории ионов, но препятствовало прохождению электронов. При давлении $4 \cdot 10^{-4}$ Торр, когда еще не происходит развитие разряда, энергия ионов составляет около 0,5 эВ, концентрация $6 \cdot 10^7$ см⁻³. При

зажигании разряда плотность ионов возрастает до $2,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ($P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр), а их энергия достигает 5 эВ, что, по-видимому, связано с перекompенсацией пучка и ускорением ионов в его электрическом поле. В лабораторных экспериментах проведено исследование пространственной структуры разряда. Поперечный размер пучка на расстоянии 1,7 м от инжектора составляет 20 см. В режиме ППР пучок подвергается сильному возмущению в результате взаимодействия с плазмой и передает ей около 30 % своей энергии.

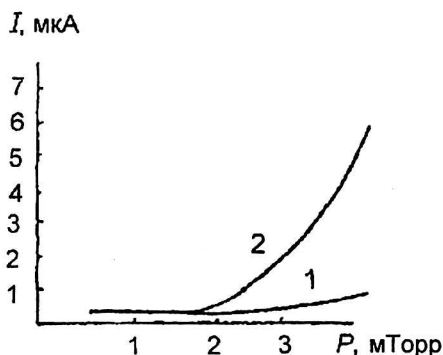


Рис. 7. Зависимость электронного тока МЭЛФ от давления:
1 — $\tau = 1$ мс; 2 — $\tau = 5$ мс

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

Потенциал автономного изолированного инжектора электронов. Исследование зарядки изолированного инжектора электронов было одной из целей лабораторных экспериментов. В активном эксперименте "Зарница" потенциал ракеты составлял 50 В на высотах 120—150 км [14], в то время как в эксперименте "Грузия Спурт" на тех же высотах он был равен 1,3 кВ [15].

В проводимых лабораторных экспериментах полетный вариант инжектора запитывался от авиационной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи, а электронная пушка была установлена на изоляторах внутри вакуумной камеры. Потенциал изолированного инжектора падает с ростом тока инжектируемого пучка и при уменьшении энергии электронов, что вызвано зажиганием ППР и образованием плотной плазмы, являющейся источником интенсивных потоков возвратных тепловых электронов на инжектор. Потенциал корпуса изолированного инжектора достигает максимального значения, равного 200 В, при $P = 3 \cdot 10^{-4}$ Торр, $E = 7$ кэВ и $I = 0,4$ А (рис. 8). Лабораторные эксперименты подтвердили, что в условиях активного эксперимента "Электрон" корпус ракеты заряжается до потенциала порядка 100 В.

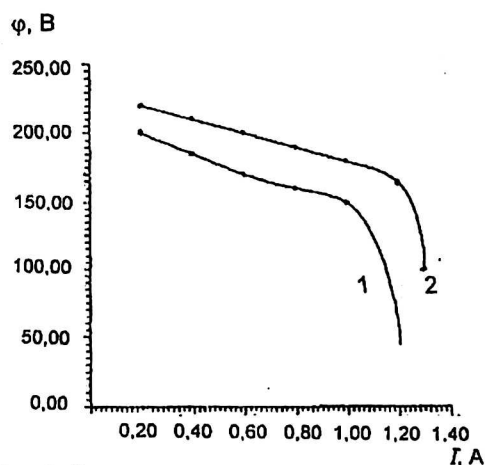


Рис. 8. Зависимость потенциала от тока пучка:
1 — $E = 6$ кэВ; 2 — $E = 7$ кэВ

Стимулированный пучково-плазменный разряд.

Для управления зажиганием ППР в вакуумной камере на расстоянии 1 м были установлены две изолированные металлические сетки [13]. Конструкция сеток позволяла прикладывать к ним напряжение до +100 В относительно стенок камеры. При фиксированном значении тока пучка наличие сеток (электростатических пробок) приводит к снижению давления газа, при котором загорается ППР [13]. Стимулированное зажигание разряда электростатическими пробками связано с уменьшением скорости ухода ионов из области разряда, их запираемостью при напряжении на сетках +30÷+50 В. Критические параметры пучка и давления остаточного газа, при которых развивается ППР, определяются в значительной мере двумя процессами: скоростью ионизации газа и темпом ухода ионов из области разряда, поэтому роль сеток сводится к удержанию плазмы. В результате для зажигания разряда в области с электростатическими пробками ток пучка может быть значительно меньше. Пороговое развитие разряда при потенциалах сеток выше +20 В связано с запираемостью ионов в потенциальной яме. При отрицательных потенциалах на сетках разряд загорается при тех же параметрах тока пучка и давления, что и в отсутствие сеток в вакуумной камере.

Большое внимание в лабораторных экспериментах уделено изучению вопроса о снижении порогового тока зажигания пучково-плазменного разряда при зарядке изолированного корпуса инжектора электронов. При инжекции электронного пучка с "заземленного инжектора" в отсутствие потенциала на нем частицы плазмы уходят из области разряда вдоль пучка. Если же инжекция происходит с изолированного инжектора при наличии потенциального барьера на нем, то часть ионов, уходивших ранее против движения пучка электронов, оказывается запертой в этом направлении, и поток ионов, уходящих из области разряда через электростатический барьер, падает с ростом потенциала барьера. Поэтому роль потенциала корпуса ин-

жектора сводится к удержанию плазмы. В результате для зажигания ППР требуются электронные пучки с гораздо меньшим током. Так, при $P = 3 \cdot 10^{-4}$ Торр в отсутствие потенциала для "заземленного" инжектора ППР не зажигается при токах $I = 0,4$ А (рис. 9), тогда как при его наличии разряд загорается уже при токе 200 мА. Потенциал корпуса инжектора в этом случае был равен 30 В.

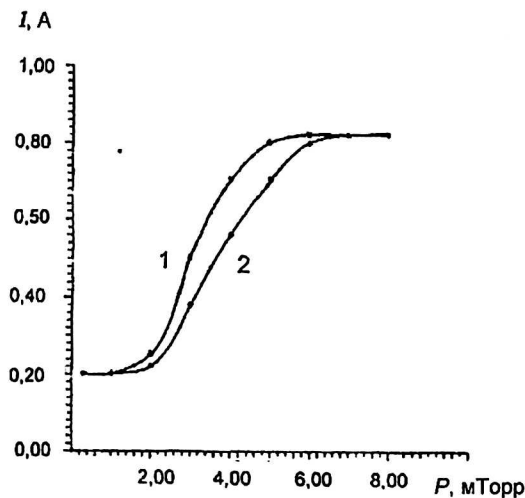


Рис. 9. Зависимость критического тока пучка при зажигании ППР от давления остаточного газа для заземленного (кривая 1) и изолированного (кривая 2) инжектора электронов

При фиксированном токе пучка наличие потенциального барьера для ионов приводит к снижению давления газа, при котором загорается ППР.

Заключение

В активном эксперименте "Электрон-1" обнаружена генерация электромагнитного излучения на частоте модуляции электронного пучка при его взаимодействии с ионосферной плазмой; осуществлено формирование пучково-плазменного разряда в окрестности метеоро ракеты; зафиксировано рассеяние электромагнитных волн при их трассировании на расстоянии несколько сот километров через плазменную область, создаваемую электронным пучком; проведено измерение параметров околоракетной плазмы с помощью диагностического комплекса, установ-

ленного на метеоро ракете; осуществлено сканирование плазмы, экранирующей метеоро ракету, с помощью трех отделяемых контейнеров; исследована зарядка метеоро ракеты при инъекции электронного пучка.

Проведены лабораторные эксперименты по исследованию взаимодействия электронного пучка с разреженным газом, осуществлено формирование стимулированного пучково-плазменного разряда, исследована зарядка изолированного инжектора при инъекции электронного пучка.

Литература

- Hess W. N., Trichel M. C., Dams T. N. et al. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 6067.
- Сагдеев Р. З., Жулин И. А. // ДАН СССР. 1975. Т. 12. С. 874.
- Ляхов С. Б., Мангадзе Г. Г. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. С. 1370.
- Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. // Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. — Л.: Гидрометеониздат, 1989.
- Sagdeev R. Z., Managadze G. G., Mayorov A. D. et al. // Adv. Space Res. 1981. COSPAR. V. 1. P. 77—87.
- 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.
- Быковский В. Ф., Горячев С. Б., Дорошкин А. А. и др. Комплекс аппаратуры и результаты активного эксперимента "Электрон-1" с инъекцией электронного пучка в ионосферу: Препринт ИЯФ СОРАН. 91—62. — Новосибирск, 1991.
- Быковский В. Ф., Горячев С. Б., Дорошкин А. А. и др. // Космические исследования, 1991. № 5.
- Быковский В. Ф., Горячев С. Б., Дорошкин А. А. и др. // Физика плазмы, 1992. Т. 18. Вып. 5. С. 595.
- Горячев С. Б., Лапик Р. М., Мешков И. Н., Мозгунов В. Н., Сыресин Е. М. // ПИТЭ, 1991. № 2.
- Голубев В. А., Гусельников В. И., Коробейников М. В., Медведко К. А., Мешков И. Н., Нагайцев С. С., Сыресин Е. М. Взаимодействие электронного пучка с разреженным газом. // Физика космической и лабораторной плазмы. — Новосибирск, 1989. С. 130.
- Мешков И. Н., Нагайцев С. С., Селезнев И. А., Сыресин Е. М. // Физика плазмы, 1990. Т. 16. С. 1119.
- Мешков И. Н., Нагайцев С. С., Сыресин Е. М. // ДАН СССР. 1990. Т. 314. № 5. С. 1332.
- Докукин Б. С., Ружин Ю. Я. Потенциал ракеты в эксперименте с инъекцией пучка электронов. — М.: ИЗМИРАН, 1982.
- Гагу Т. И., Клосс З., Лалиашвили А. Н. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инъекции пучка электронов с высотного зонда. Процессы нейтрализации. — М., ИКИ. 1983.

Experiments with electron beam injection in ionosphere plasma and rare gas

V. F. Bykovsky, I. N. Meshkov, I. A. Selesnev, E. M. Syresin
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

The active experiment "Electron" is applied for the electron beam injection from a meteorological rocket in the ionosphere plasma. The beam is injected in the ionosphere plasma at a current of 0.5 A and an energy of 6.5—8 keV. The energy spectrum measurements are given for the plasma electrons and ions. The radio-wave spectrum is measured in a RF frequency range of 100—500 MHz. The radio wave tracing through the electron beam injection region is discussed. The laboratory experiments are performed at the electron beam injection in a rare gas to produce a modeling of the active in outer space experiments.