

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ В АТМОСФЕРЕ

В.А.Киселев, А.К.Березин, Я.Б.Файнберг,  
В.П.Зейдлиц

Настоящая работа посвящена исследованиям прохождения и взаимодействия релятивистского моноэнергетического электронного пучка с атмосферой. Показано, что происходит эффективное коллективное взаимодействие такого пучка с образованной плазмой ( $n_p \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Об этом свидетельствуют значительные потери энергии пучка, наблюдаемое электромагнитное и рентгеновское излучение.

В работах [1, 2] было исследовано взаимодействие релятивистского электронного пучка с независимо образованной плазмой, плотностью  $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и показано, что в случае моноэнергетических пучков эффективность взаимодействия возрастает с увеличением плотности плазмы и имеет коллективный характер.

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям прохождения электронных пучков через газы большой плотности [3 — 6]. В связи с этим представляют интерес исследования прохождения моноэнергетических релятивистских электронных пучков через такой газ, возможность создания плазмы таким пучком в плотном газе и коллективного взаимодействия пучка с этой плазмой.

Эксперименты проводились на установке, описанной в работе [1]. Электронный пучок с энергией 2 МэВ и током  $I_b \sim 1 \text{ А}$ , длительностью  $\tau \approx 2 \text{ мксек}$  выводился через медную фольгу толщиной 0,2 мм в атмосферу.

Длина пробега высокоэнергетических электронов в воздухе<sup>1)</sup> определялась как  $R = 0,57 E - 0,16$ , где  $E$  — энергия электрона в МэВ,  $R$  — длина пробега в г/см<sup>2</sup>, и для данного пучка составляет  $\sim 8 \text{ м}$  [7]. В наших экспериментах было обнаружено, что при выходе в атмосферу пучок создает плазму в виде конуса диаметром 5 см возле фольги и 10 — 15 см на расстоянии 10 см от фольги. Общая длина плазменного образования составляла 50 — 60 см. Плотность плазмы определялась путем отсечки ВЧ сигнала с длиной волны 3 см. Такой сигнал запирался на расстояниях от 4 до 20 см от выходной фольги, т. е. плотность плазмы на таком расстоянии была не менее  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Учитывая ионизирующую способность данного пучка, можно оценить плотность из выражения:

$$n_p \approx n_b \sigma t,$$

где  $n_b$  — плотность пучка,  $t$  — число пар электрон-ион, образованных быстрым электроном на 1 см. пути в воздухе при  $P = 760 \text{ мм тр. ст.}$

<sup>1)</sup>Под пробегом частицы в данном случае подразумевается путь до полной потери ионизирующей способности.

$c$  — скорость света в вакууме,  $\tau$  — длительность импульса. Для наших условий на расстоянии 5 см от фольги, учитывая угловое распределение пучка ( $n_b \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ ,  $\gamma = 5$  для электронов с энергией 2 МэВ),  $n_p \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

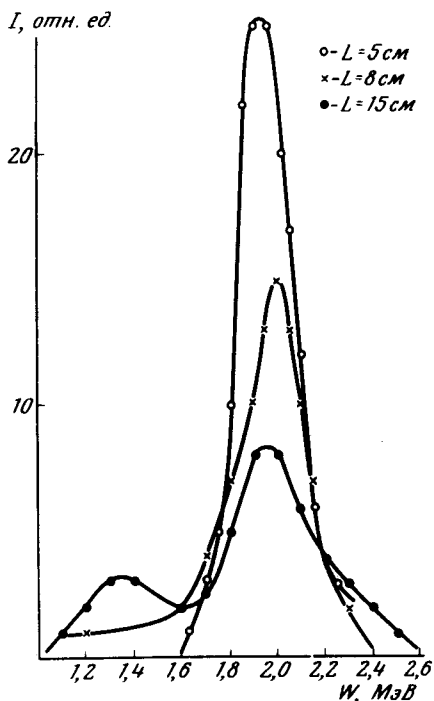


Рис. 1. Энергетические спектры электронов пучка на разных расстояниях от выходной фольги

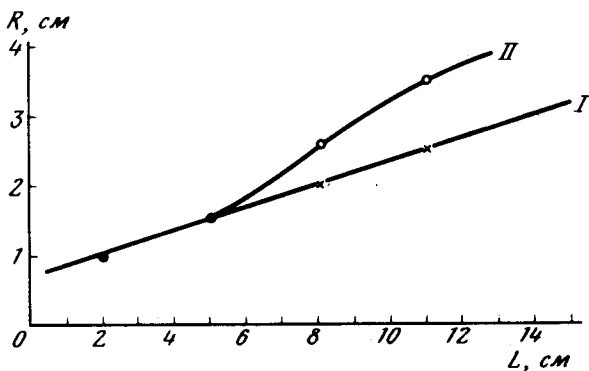


Рис. 2. Угловое распределение электронов пучка: 1 —  $I_b \sim 100 \text{ мА}$ ; 2 —  $I_b \sim 1 \text{ А}$ .

Измерения энергетических спектров электронного пучка на различных расстояниях от фольги с помощью магнитного анализатора показали, что на расстоянии 5 см от фольги энергетический спектр пучка практически не изменяется по сравнению с энергетическим спектром пучка в вакууме (рис. 1). На расстоянии 8 см от фольги энергетический спектр расширяется в сторону уменьшения энергии, а на расстоянии 15 см уже наблюдаются электроны с меньшей 1 МэВ энергией. Эти эффекты не могут быть обусловлены парными неупругими соударениями, так как полные потери пучка, состоящие из ионизационных и ра-

диационных потерь для отдельного электрона на таких расстояниях не превышают 100 кэВ. О больших потерях энергии пучка свидетельствуют также резкое увеличение углов рассеяния при токе пучка  $I_b \sim 1A$  (рис. 2). Значительное увеличение угла разброса электронов при полном токе 1А на расстоянии 5 см от фольги может быть объяснено тем, что электроны пучка теряют энергию благодаря коллективному взаимодействию с плазмой.

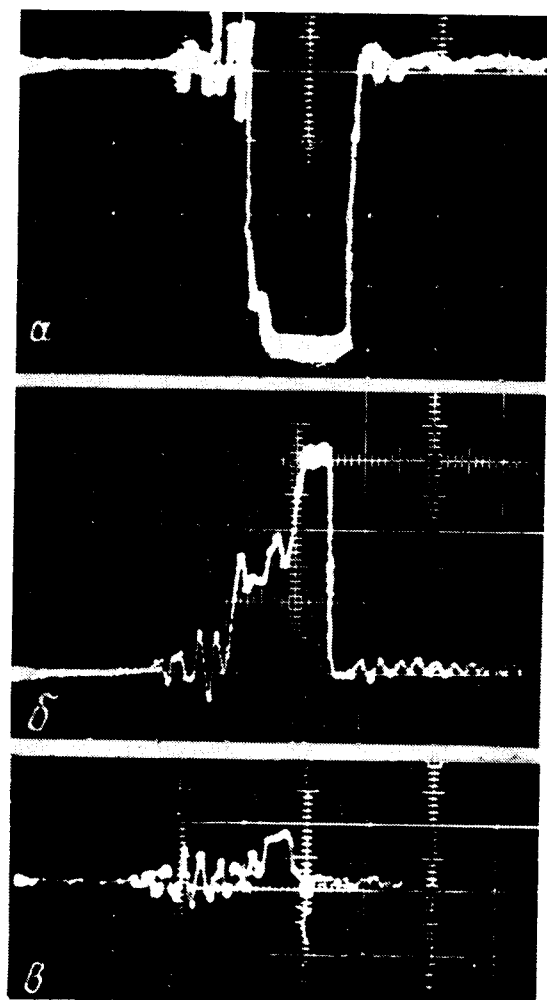


Рис. 8. Осциллограммы сигналов электромагнитного излучения: а —  $\lambda = 10$  см, б —  $\lambda = 3$  см, в —  $\lambda = 8$  мм ( $\Delta W/W = 8\%$ )

О коллективном характере взаимодействия релятивистского моноэнергетического пучка с плазмой свидетельствует также обнаруженное электромагнитное излучение из плазмы с длинами волн 10,3 и 0,8 см (рис. 3). Излучения с длинами волн 3 и 0,8 см сосредоточены

в области, расположенной на расстоянии 5 – 10 см от фольги. Интенсивность излучений зависит от величины тока и ширины энергетического спектра электронов пучка. При увеличении ширины энергетического спектра пучка от 8 до 17% не только уменьшается амплитуда сигналов излучения на длинах волн 10 и 3 см, но меняется форма импульса (рис. 4). Излучение с длиной волны  $\lambda = 8$  мм в последнем случае не наблюдалось.

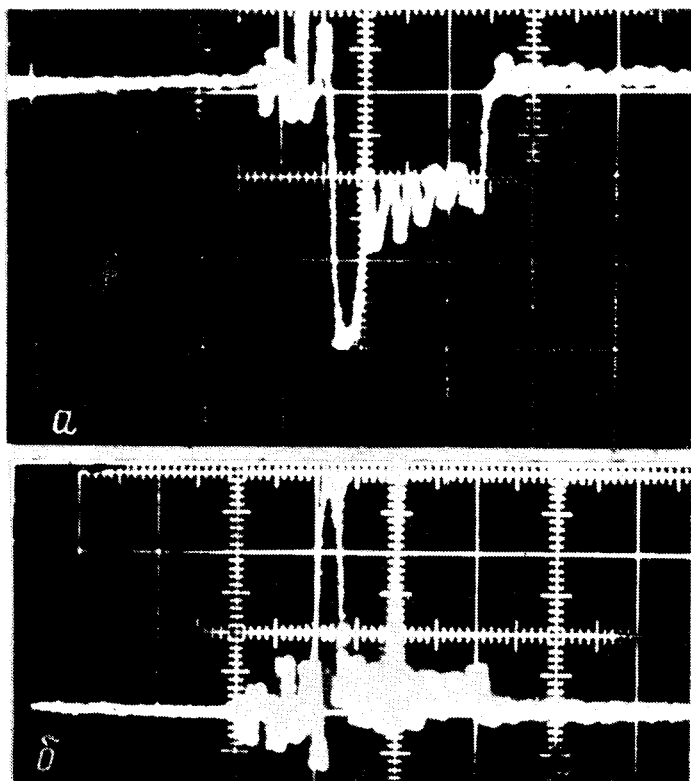


Рис. 4. Осциллограммы сигналов электромагнитного излучения: *a* –  $\lambda = 10$  см, *b* –  $\lambda = 3$  см ( $\Delta W/W = 17\%$ )

С помощью камеры обскуры было обнаружено, что из области, находящейся в 5 см от выходной фольги, наблюдается мягкое рентгеновское излучение. Перемещение камеры вдоль оси системы показало, что излучение локализовано в этой области. Диаметр полученного рентгеновского пятна не превышает 4 – 5 см.

Таким образом, при выводе релятивистского моноэнергетического электронного пучка в атмосферу происходит не только образование плазмы значительной плотности (до  $10^{13}$  см $^{-3}$ ), но и наблюдается эффективное коллективное взаимодействие такого пучка с образованной плазмой. Об этом свидетельствует как значительные потери энергии пучком, так и наблюдаемое электромагнитное излучение с длинами волн 10, 3 и 0,8 см и мягкое рентгеновское излучение, локализованное

в области взаимодействия и свидетельствующее о разогреве плазмы в этой области. Возникновение 8 мм излучения в конце импульса тока (рис. 3) объясняется добавочной ионизацией ВЧ полями, и очевидно, приводит к увеличению плотности плазмы.

О коллективном характере такого взаимодействия свидетельствует уменьшение эффективности взаимодействия при уменьшении тока электронного пучка и увеличении ширины энергетического спектра электронов.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
30 апреля 1979 г.

### Литература

- [1] В.А.Киселев, А.К.Березин, Я.Б.Файнберг. Взаимодействие релятивистского электронного пучка с плотной плазмой. ЖЭТФ, 71, 193, 1976.
- [2] А.К.Березин, И.А.Гришаев, В.П.Зейдлиц, В.А.Киселев, Б.Г.Сафронов, Я.Б.Файнберг, Г.Л.Фурсов. Взаимодействие релятивистского моноэнергетического электронного пучка с большим  $u$  с плотной плазмой. Письма в ЖТФ, 4, 732, 1978.
- [3] Е.П.Велихов, В.Д.Письменный, А.П.Рахимов. Несамостоятельный газовый разряд, возбуждающий непрерывные  $CO_2$ -лазеры. УФН, 122, 415, 1977.
- [4] А.А.Иванов. Физика химически активной плазмы. Физика плазмы, 1, 147, 1975.
- [5] С.В.Антипов, М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин, А.С.Трубников. Квазистационарная переохлажденная (рекомбинирующая) плазма, создаваемая электронным пучком в плотном газе. ЖЭТФ, 65, 1866, 1973.
- [6] В.А.Легасов, А.К.Вакар, В.П.Денисенко, П.П.Максимов, В.Д.Русанов, А.А.Фридман, Г.В.Шолин. Плазменный радиолит углекислого газа сильным пучком релятивистских электронов. ДАН СССР, 243, 323, 1978.
- [7] К.К.Аглинцев. Дозиметрия ионизирующих излучений. М., Госиздат тех.-теор.лит., 1957.