

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 197 – 201

20 февраля 1971 г.

ТЕПЛОЙ ВЗРЫВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*А.Т.Алжынцев, А.Г.Еськов, О.А.Золотовский, В.И.Коротеев,
Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масалов, В.Н.Семенов*

Экспериментальные исследования взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Водородная плазма ($n_0 \sim 10^{11} + 10^{14} \text{ см}^{-3}$) создавалась в цилиндрическом стеклянном объеме 1 диаметром 20 см и длиной 300 см, при разряде малоиндуктивных конденсаторов на шесть "ударных" витков 2, охватывающих внешний диаметр трубы. Квазистационарное магнитное поле H_0 , создаваемое витками 3, имеющими диаметр 30 см, варьировалось от 0 до 2,5 кэ.

Источником пучка служил электронный ускоритель 4 Риус-5, разработанный в лаборатории Е.А. Абрамяна ИЯФ СО АН СССР и описанный в работе [1]. Для ввода пучка в замагниченную плазму применялась катушка 5, создававшая магнитное поле, вмороженное в катод и сопряженное с полем H_0 так, что вблизи анода возникала пробочная конфигурация. (На противоположном торце плазменного объема она создавалась с помощью двойных витков 12 меньшего диаметра). В условиях эксперимента максимальная энергия электронов в пучке достигала $3 + 4$ Мэв, максимальный ток — $10 + 15$ ка, длительность тока ~ 50 нсек.

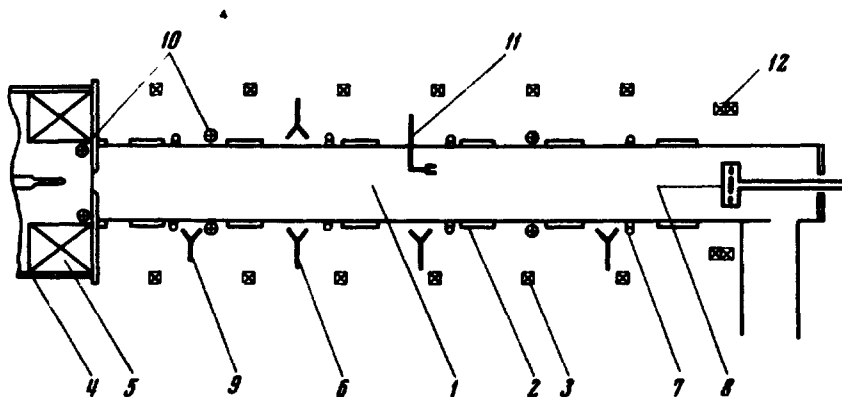


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Начальная концентрация n_0 регистрировалась с помощью микроволновой интерферометрии 6 ($\lambda = 8$ мм, 3 см, 6 см). Нагрев плазмы при прохождении пучка измерялся внешними диамагнитными зондами 7 в сечениях, разнесенных по оси трубы z . Регистрация СВЧ шума производилась в нескольких сечениях в диапазоне $1,5 + 6$ см 9. Ток пучка на выходе ускорителя и полный ток в плазме регистрировались поясами Роговского 10. Параметры пучка (радиальное распределение тока и энергии) после прохождения плазменного объема измерялись системой коллекторов тока и термопарными калориметрами, защищенными от тепловых электронов и потенциала плазмы 8. Потоки быстрых электронов в различных направлениях фиксировались с помощью локальных коллекторов, размещенных внутри плазменного объема 11. Одновременные измерения с помощью фильтров различной толщины (Cu, Al; 0,01 + 3 мм) позволяли оценить энергию электронов.

Основные эффекты были установлены путем сопоставления исходного и возмущенного состояния плазмы, а также параметров пучка после прохождения через предварительно созданную плазму и через "вакуум" (без предионизации; минимальное давление 10^{-6} мм рт. ст.). Полученные результаты свидетельствуют о сильном взаимном воздействии плазмы и пронизывающих ее релятивистских электронов. Эффективность взаимодействия такова, что изменение выходных параметров пучка (например, энергии) сравнимо с их исходными значениями.

Основные обнаруженные факты заключаются в следующем:

1. Резкое возрастание температуры плазмы, которое следует из показаний диамагнитных датчиков, расположенных в нескольких сечениях (рис. 2). Диамагнитный сигнал, измеренный через $50 + 100$ нсек после включения пучка,

при оптимальных параметрах ($n_0 = 3 \cdot 10^{11} + 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $H_0 = 1,5 + 2 \text{ кэ}$) достигал значения, соответствующего $nT \sim (1 + 5) \cdot 10^{16} \text{ эв/см}^3$ (при характерном диаметре плазменного столба $7 + 10 \text{ см}$).

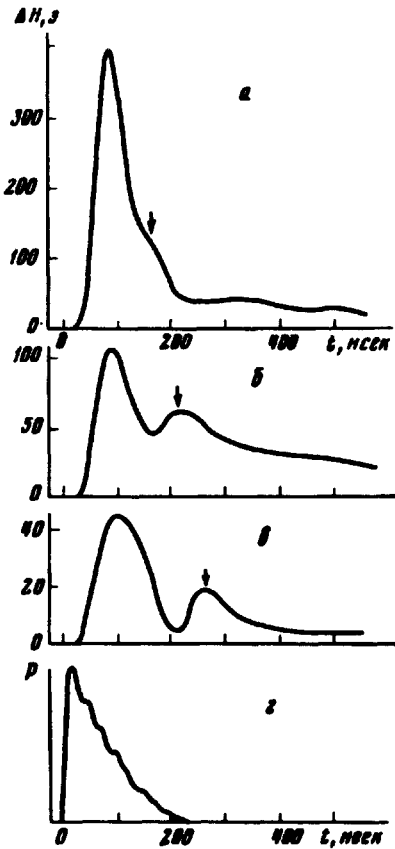


Рис. 2. Нагрев плазмы при прохождении пучка и последующая электронная тепловая волна: а, б, в — сигналы с диамагнитных зондов, размещенных на расстояниях z равным 15, 155, 240 см, соответственно; г — электромагнитное излучение из плазмы в диапазоне $\lambda = 3 \text{ см}$ ($z = 15 \text{ см}$)

2. Установлена зависимость распределения nT по длине трубы, возникающего под действием пучка, от параметров n_0 , H_0 . В оптимальных условиях большая часть тепла выделяется в переднем слое плазмы, толщина которого значительно меньше длины плазменного столба.

3. Следствием малой длины релаксации оказывается возникающий в этом случае поток тепла из начальной, сильно нагретой области плазмы к концу плазменного столба со скоростью, лежащей в пределах от 10^9 до 10^{10} см/сек . На осциллограммах рис. 2 этому соответствует второй пик диамагнитного сигнала, отмеченный стрелкой, последовательно запаздывающий в различных сечениях. Измеренная скорость переноса давления зависит от величины нагрева плазмы и составляет в среднем $(1/2 + 1/3) v_T$. Такая высокая скорость исключает возможность переноса всей плазмы в целом. Это дает основание утверждать, что последующий за начальным нагревом релаксационный процесс обусловлен возбуждением электронной тепловой волны [2]. По мере распространения скорость волны падает, что можно объяснить уменьшением электронной температуры при расширении. Следует отметить, что в зависимости от параметров пучка и плазмы может существенно измениться соотношение нагрева плазмы непосредственно пучком и тепловой волной в конце плазменного объема. В этом случае второй пик диамагнитного сигнала может существенно превосходить первый по амплитуде.

4. Релаксация пучка сопровождается резким всплеском (фронт ~ 10 нсек) электромагнитного излучения в диапазоне $1,5 + 6$ см длительностью 100 нсек и более, опережающим нарастание диамагнитного сигнала (рис. 2, з).

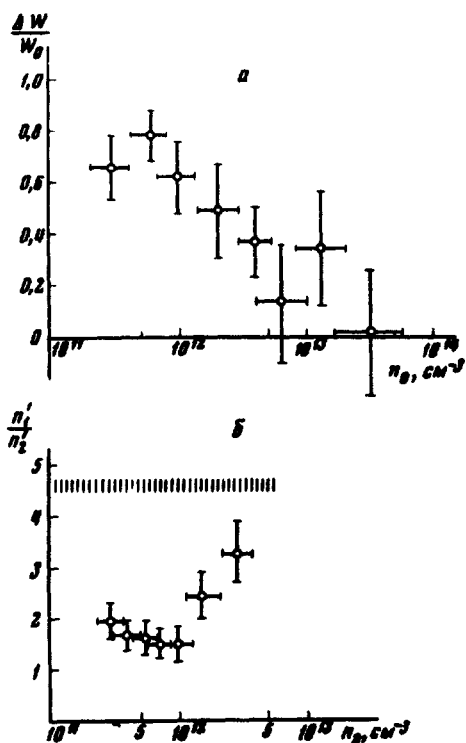


Рис. 3. *a* — относительное ослабление выходной энергии пучка $\Delta W/W_0 = (W_0 - W)/W_0$ в плазме, W_0 — выходная энергия пучка в вакууме; *b* — отношение плотности высокоэнергетичных электронов, зарегистрированных на центральном (n'_1) и периферийном (n'_2) коллекторах тока (центральный: $0 < r < 25$ мм; периферийный: 27 мм $< r < 55$ мм); для вакуума $n'_1/n'_2 = 4,3 + 4,7$

5. Установлена зависимость выходных параметров пучка (энергия, ток) и их радиального распределения от концентрации плазмы при постоянных прочих параметрах. В оптимальных условиях уменьшение энергии пучка при прохождении через плазму достигает 50% и более (рис. 3, *a*). Максимальное ослабление пучка наблюдается в тех условиях, когда происходит наибольший нагрев плазмы.

6. Обнаружен поток быстрых электронов в направлении, противоположном распространению пучка, который достигает максимума в области оптимальных параметров. Применение фильтров с граничной энергией ~ 200 кэв позволило исключить вклад горячих электронов плазмы и электронов обратного тока, энергия которых $E \sim \frac{m_e c^2}{2} \left(\frac{n'}{n_0}\right)^2$. Существование этого потока может быть объяснено рассеянием электронов пучка на турбулентных флуктуациях плазмы.

Этим же можно объяснить резкое изменение радиального распределения плотности n' электронов в пучке в оптимальном диапазоне параметров (рис. 3, *b*)¹⁾

¹⁾ Отметим, что при больших концентрациях n_0 наблюдается плазменная фокусировка пучка, но обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной работы.

Из проведенных опытов следует, что в бесстолкновительной плазме по отношению к релятивистскому электронному пучку возможно возникновение аномальных рассеивающих свойств с характерным пространственным масштабом $10 + 10^2$ см, тогда как классическая кулоновская длина свободного пробега релятивистского электрона в условиях опытов порядка 10^{13} см.

Таким образом, исследуемое явление носит характер теплового взрыва ($T \sim 10 + 100$ кэв) в бесстолкновительной плазме, за которым следуют вторичные релаксационные процессы – электронная тепловая волна и быстрое выравнивание тепла во всем плазменном объеме.

Авторы искренне признательны Р.З.Сагдееву, по инициативе и при постоянной поддержке которого была выполнена эта работа, Е.А.Абрамяну, любезно предоставившему время работы на ускорителе Риус-5, Д.Д.Рютову – за ценные обсуждения, М.И.Китаеву – за разработку конструкции экспериментальной установки.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
15 января 1971 г.

Литература

- [1] Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Цукерман. ДАН СССР, 192, 76, 1970.
- [2] Р.Х.Куртмуллаев. Доклад на втором симпозиуме по бесстолкновительным ударным волнам в плазме. Фаскати, июль, 1969 г.