

стью, в отличие от таких фокусирующих процессов, как стрижка, тепловое расширение и т.п.

Выражаю благодарность Д.П.Райзеру за обсуждение статьи.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступило в редакцию

16 августа 1966 г.

Литература

- [1] Г.А. Аскарьян. ЖЭТФ, 42, 1567, 1962.
- [2] В.И. Таланов, Изв. Вузов. Радиофизика, 7, 564, 1964.
- [3] В.У. Chiao, В. Garrire, С.Н. Townes. Phys. Rev. Lett., 13, 479, 1964.
- [4] А.Г. Литвак, Письма ЖЭТФ, 4, 341, 1966.
- [5] Л.М. Левин. Изв. АН СССР, сер. физ. 4, III, 1940.
- [6] Г.А. Аскарьян. ЖЭТФ, 48, 666, 1965.
- [7] Д.П. Райзер. Письма ЖЭТФ. 4, 124, 1966.

О ГЕНЕРАЦИИ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Д.Е. Нестерихин, А.Г. Пономаренко, Б.А. Яблочников

Экспериментальное исследование условий возбуждения ударных волн в разреженной плазме, распространяющихся вдоль магнитного поля, имеет в настоящее время принципиальное значение.

Как полагают [1,2], возможность генерации ударных волн в межпланетной плазме при движении потоков заряженных частиц к Земле ("солнечный ветер") лежит в основе таких физических явлений, как внезапное наступление геомагнитных бурь, особенности магнитного поля в области $I_2 + I_4 R_3$, измеренные ракетой "Пионер", "Маринер-2", "IMP-1", уединенные импульсы и существование электронов с энергией $I + 100$ кэВ, радиационные пояса, полярные сияния и т.д. [3,4]. В ядерном синтезе возможность генерации подобных волн непосредственно свя-

зана с проблемой трансформации направленной энергии плазменных потоков в хаотическое движение, т.е. в тепло, при инъекции сгустков вдоль магнитного поля [5].

В работе приводятся результаты предварительных экспериментов, посвященных данному вопросу. В квазистационарном магнитном поле $H_0 = 0 + 3$ кэ разрядом емкости C_1 на виток 2 в стеклянной вакуумной камере (длиной ~ 400 см и диаметром $2R \approx 20$ см), наполненной водородом ($p \approx 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.), создавался столб предварительной плазмы. Распределение плотности электронов по длине приведено на рис.1. Спустя 50-70 мксек разрядом емкости C_2 на конический виток 3 создавался быстрый плазменный сгусток с плотностью $n_1 \approx 5 \cdot 7 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ и скоростью $u_{||} > v_{\alpha} = H_0 / \sqrt{4\pi n_0 M}$. Заметим, что в этом случае мы имеем дело с плазмой с ярко выраженной анизотропией давления $p_{||} > p_{\perp} + H_0^2 / 4\pi$ (1). В слабом магнитном поле она должна быть неустойчива относительно возбуждения возмущений "альфвеновского типа" (так называемая шланговая неустойчивость [2,5]). Кинетическая энергия плазменного потока за времена $\tau \approx 1/\omega_{ci} = cM/eH$ должна трансформироваться в энергию переменного магнитного поля \tilde{H}_1 и поперечное движение частиц в плазме. В настоящее время еще нет теории, которая позволила бы детально проследить последовательность и важность физических процессов, протекающих при сверхзвуковом движении плазменных потоков в условиях отсутствия столкновений. Поэтому перейдем к изложению результатов эксперимента, ограничившись в ходе изложения сравнением их с имеющимися теоретическими оценками и экспериментальными данными [2,6-8].

Основные методы диагностики и блок-схема установки представлена на рис.1. Уже в первых опытах было замечено влияние нестационарности процесса, вследствие чего структура как передней части сверхзвукового потока, так и колебания движущегося плазменного шнура в последующей его части существенно зависят от значений величин $u_{||}/v_{\alpha}$, H_0 , n_0 и распределения их по длине камеры. На рис.2 приводится совокупность экспериментальных данных, полученных с помощью ЭОП, магнитных зондов, измерявших компоненты \tilde{H}_R , \tilde{H}_{θ} ,

\tilde{H}_z и двойного ленгмювского зонда. Основные результаты можно свести к следующему: при выполнении (I) действительно наблюдается

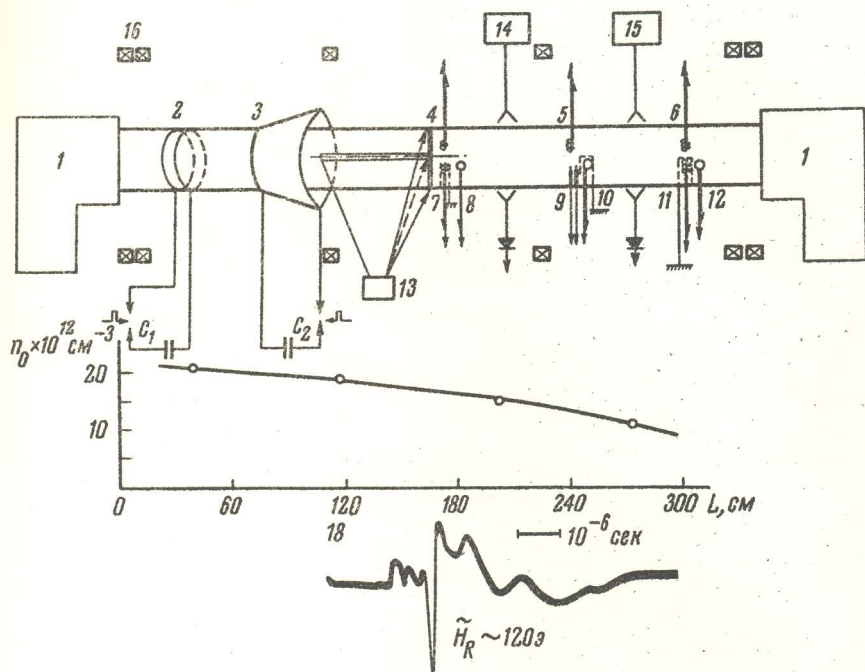


Рис. I Блок схема установки

I - вакуумные насосы; 2 - ударный виток, создающий предварительную плазму. $C_1 = 1,2 \text{ мкф}$. $U_1 = 25 \text{ кв}$. $T_1 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$; 3 - ударный виток, создающий плазменный поток вдоль магнитного поля. $C_2 = 1,2 \text{ мкф}$. $U_2 = 25-50 \text{ кв}$. $T_2 = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$; 4,5,6,7 - магнитные зонды, измеряющие компоненты \tilde{H}_R и H_θ . Расстояние между зондами $\approx 70 \text{ см}$; 8,10,12 - магнитные зонды, измеряющие компоненту H_z ; 9 - двойной ленгмювский зонд; 13 - ЗОП (съемка производилась через горизонтальную и вертикальную щель); 14,15 - СВЧ-зондирование. $\lambda = 0,4, 0,8 \text{ и } 3 \text{ см}$; 16 - катушки квазистационарного магнитного поля, 17 - распределение плотности электронов в предварительной плазме по длине, 18 - типичная осциллограмма сигнала с магнитного зонда (4) $RC = 15 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$ $NS = 5$

возникновение за времена $\tau \approx \frac{1}{\omega_{ci}}$ магнитного возмущения на фронте движущегося потока (увеличиваются компоненты \tilde{H}_R и H_θ , так как

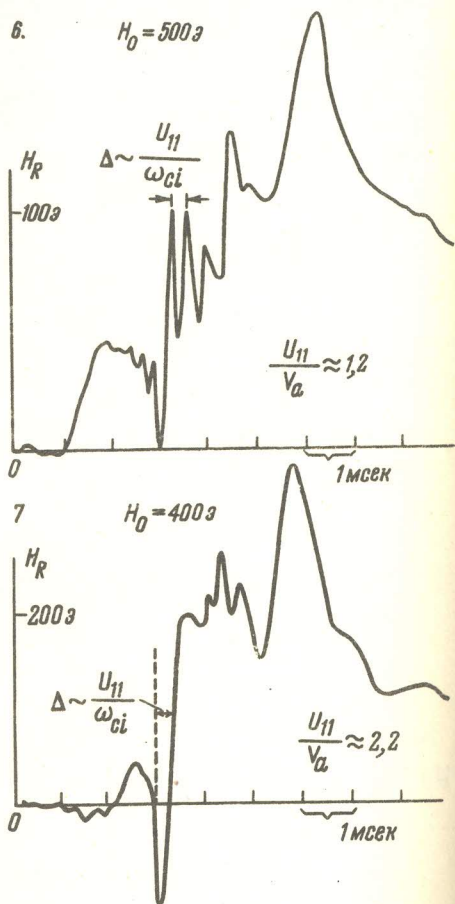
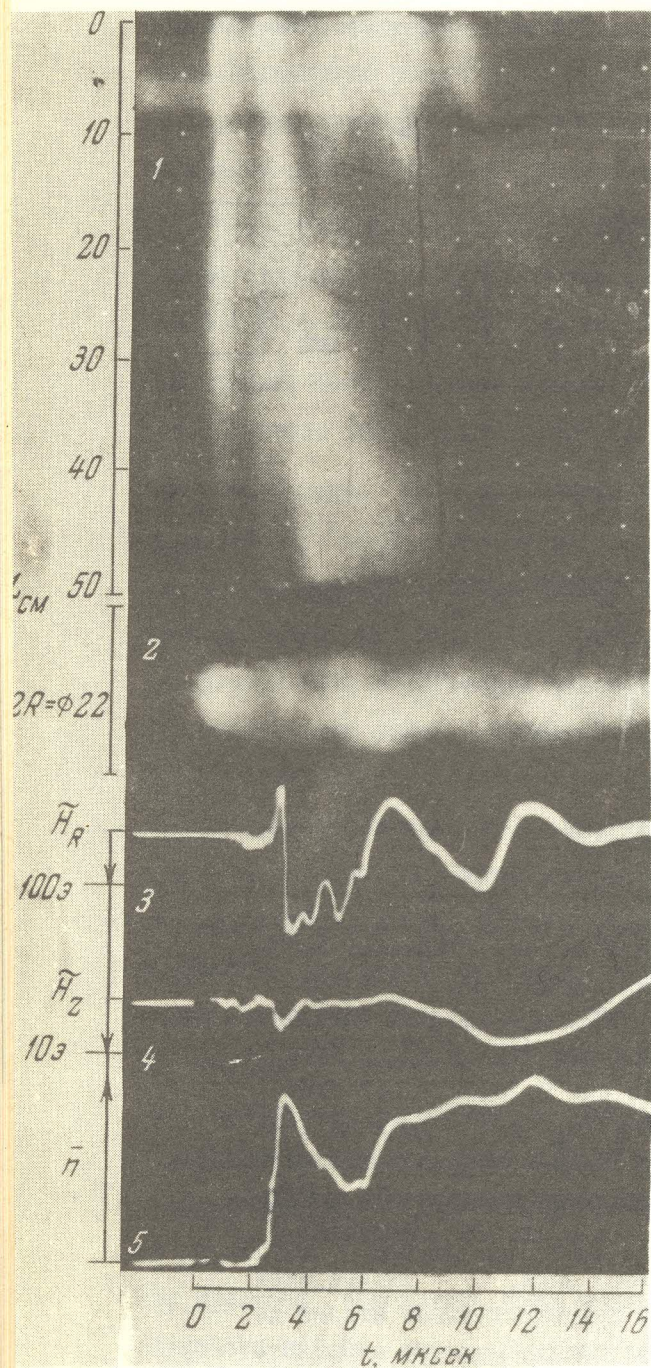


Рис. 2. Экспериментальные результаты, характеризующие процесс формирования фронта магнитного возмущения при сверхзвуковом течении плазмы вдоль магнитного поля.

1 - развертка во времени свечения горизонтальной щели, полученная ЭОП. $L = 50$ см; 2 - вертикальная щель $L = 22$ см; 3 - сигнал с магнитного зонда (+). $RC = 20 \cdot 10^{-6}$ сек; 4 - сигнал с магнитного зонда (8)

$RC = 25 \cdot 10^{-6}$ сек. $H_0 = 400$ э; 5 - сигнал с двойного ленгмюровского зонда; 6 и 7 - сигналы с магнитного зонда (4), иллюстрирующие появление осцилляций на переднем фронте возмущения $\rho = 7 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст

при альфвеновских возмущениях компонента \tilde{H}_z должна оставаться неизменной (см. рис. 2). Величины \tilde{H}_R и \tilde{H}_θ возрастали в опытах до $100 + 200$ э, что составляло примерно половину квазистационарного поля H_0 . По мере продвижения потока по предварительной плазме крутизна переднего фронта магнитных сигналов возрастала, достигая характерного размера $\Delta \lesssim u_{||} / \omega_{ci} \lesssim 15$ см.

При скоростях $u_{||} \gtrsim v_\alpha$ можно было более детально проследить тонкую структуру возбуждавшихся потоком магнитных полей \tilde{H}_R . В этом случае передний фронт возмущения не успевал сформироваться к моменту подхода его к измерительному магнитному зонду, однако и здесь мы видим периодический профиль с характерным размером $\sim \Delta$. Перекачка энергии направленного движения $M n_1 u_{||}^2 / 2$ в энергию магнитного поля \tilde{H} приводит к тому, что часть ионов теряет свою скорость и сгусток заметно тормозится (см. временную развертку свечения горизонтальной щели $L = 50$ см, полученной ЭОП, рис. 2).

За фронтом магнитного возмущения наблюдаются крупномасштабные колебания ($\omega \lesssim \omega_{ci}$) альфвеновского типа, распространяющиеся со скоростью $u \approx v_\alpha$ (альфвеновская скорость в потоке). Возросшая поперечная энергия частиц плазмы приводит к дополнительной ионизации и увеличению диамагнитного сигнала (\tilde{H}_z). Передний фронт плотности, измеренный диамагнитным и ленгмювским зондами, совпадает с фронтом магнитного сигнала \tilde{H}_R . Следует отметить, что в опытах наблюдался уход быстрой компоненты из создавшегося инжектором плазменного потока, а в формировании передней его части участвовали только частицы, скорость которых удовлетворяла соотношению $u_{||} \lesssim R \omega_{ci}$. Сформировавшийся профиль магнитного поля \tilde{H}_\perp и плотности по мере продвижения его вдоль камеры и уменьшением величины $M n_1 u_{||}^2$ видоизменяется: амплитуда поля падает, колебания за фронтом затухают, а передний фронт магнитного сигнала все ближе по форме напоминает уединенный импульс с характерным размером $\sim \Delta$ (рис. 3). Аналогично ведет себя профиль плотности частиц в потоке.

Несомненно, что в наблюдавшемся эффекте помимо затухания должны играть роль дисперсионные эффекты и направление возмущения относительно квазистационарного поля H_0 . Далее было установлено, что при отсутствии предварительной плазмы неустойчивость не возникает, а магнитные зонды регистрируют захваченные магнитные поля $\lesssim 5$ э, с характерным временем порядка периода тока инжектора ($3 \cdot 10^{-6}$ сек). Увеличение квазистационарного поля приводит к уменьшению отношения $u_{||} / v_{\alpha}$ и хотя характерные частоты колебаний $\sim \omega_{ci}$ возрастают, тем не менее начиная с $H_0 \approx 1$ кэ в наших опытах наблюдалась стабилизация начального возмущения и расплывание переднего профиля потока.

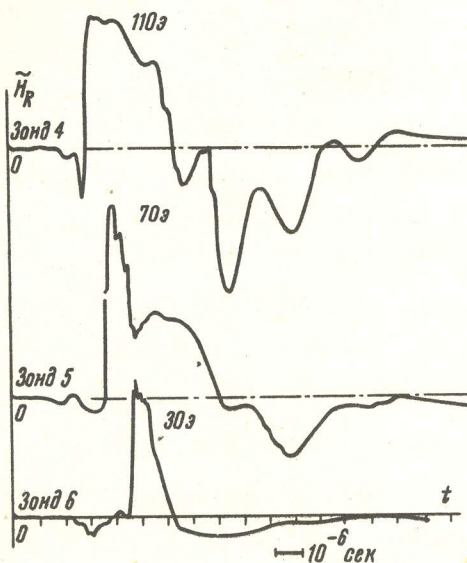


Рис.3 Трансформация фронта магнитного возмущения по мере продвижения плазменного потока вдоль магнитного поля H_0 . $RC = 25 \cdot 10^{-6}$ сек.
 $NS = 12$, $\rho = 8 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст

В какой мере описанное явление можно отождествить с процессом формирования бесстолкновительной ударной волны, в настоящее время еще не представляется возможным сказать.

Однако заметим, что результаты наших экспериментов качественно близки к картине поля, обнаруженной при исследовании структуры магнитного поля спутниками "Пионер" в магнитосфере.

Измеренная в опытах ширина переднего фронта возмущения, имеющего характер ударной волны, находится в качественном согласии с теоретическими оценками, приведенными в работе [2,6]

$$\Delta \sim \frac{Mc}{eH_0} \quad u_{||} \sim 10 \text{ см} \quad , \quad \frac{u_{||}}{v_a} \gtrsim 1 .$$

Авторы благодарны Р.З.Сагдееву за стимулирующие дискуссии и помощь в работе.

Институт ядерной физики
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
22 августа 1966 г.

Литература

- [1] L.I.Cahill. Scientific American, 212 (3), 58, 1965.
- [2] Р.З.Сагдеев. Вопросы теории плазмы. 4, 20, 1964.
- [3] C.P. Sonett, D.S.Colburn, L.Ir.Davis, E.I.Smith, P.I.Coleman. Phys. Rev. Lett., 13, 153, 1964.
- [4] H.F.Ness, C.S.Searce, S.B.Seek, J.Geophys. Res. 69, 3531, 1964.
- [5] А.М.Искольдский, В.И.Лукьянов, Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко. Доклад СМ 21/215 на конференции по ядерному синтезу, Калэм, сентябрь 1965.
- [6] Б.П.Тверской. ЖЭТФ, 42, 833, 1962.
- [7] А.П.Казанцев. ЖЭТФ, 44, 1253, 1963.
- [8] М.А.Гинцбург. Космические исследования. 3, 340, 1965.

ПОГРАНИЧНАЯ КРИВАЯ ЖИДКОСТЬ - ГАЗ ДЛЯ ШЕСТИФТОРИСТОЙ СЕРЫ ВБЛИЗИ ЕЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

Л.А.Макаревич, Е.С.Соколова

В последнее время появилось несколько работ, в которых обсуждается вопрос о форме пограничной кривой вблизи критической точки [1-5]