

препринт 60

**Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко,
Б.А.Яблочников**

**О генерации бесстолкновительных ударных
волн, распространяющихся вдоль
магнитного поля**

НОВОСИБИРСК 1966

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

Как полагают, /12/ 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, в особенностях магнитного поля в области $I_2 + I_4 R_3$, измеренное ракетой "Пионер", "Маринер-2", "ГПР-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 связана 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

$H_0 = 0 + 3$ кэст разрядом емкости C_1 на виток 2 в стеклянной вакуумной камере (длиной ~ 400 см и диаметром $2R = 20$ см), наполненной водородом ($p = 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$ 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 $n_e = 5 + 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и скоростью $U_{II} > V_a =$
 $= \frac{H_0}{\sqrt{4\pi n_e M}}$ Заметим, что в этом случае мы имеем дело с плазмой с ярко выраженной анизотропией давления $p_{II} > p_{\perp} + \frac{H_0^2}{4\pi} \quad (1)$

В слабом магнитном поле она должна быть неустойчива относительно возбуждения возмущений "альфвеновского типа" (так называемая сланговая неустойчивость /2,5/). Кинетическая энергия плазменного потока за времена $\tau \geq \frac{1}{\omega_{ci}} = \frac{Mc}{eH}$ 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_n/V_a

N_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 ленгмюровского зонда. Основные результаты можно свести к следующему: при выполнении (1) действительно наблюдается возникновение за времена $t \approx \frac{1}{\omega_{ci}}$ магнитного возмущения на фронте движущегося потока (увеличиваются компоненты \tilde{H}_R и \tilde{H}_θ , т.к. при альфвеновских возмущениях компонента \tilde{H}_z должна оставаться неизменной см.рис. 2). Величина \tilde{H}_R и \tilde{H}_θ возрастали в опытах до 100 + 200 эрст, что составляло примерно половину квазистационарного поля H_0 . По мере продвижения потока по предварительной плазме крутизна переднего фронта магнитных сигналов возрастала, достигая характерного размера $\Delta \approx U_n/\omega_{ci} \approx 15$ см.

При скоростях $U_n \approx V_a$ 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 $Mn, U_n^2/2$ в энергию магнитного поля \tilde{H} приводит к тому, что часть ионов теряет свою скорость и ступок заметно тормозится (см.временную развертку свечения горизонтальной щели $L = 50$ см, полученной ЭОП, рис 2).

За фронтом магнитного возмущения наблюдаются крупномасштабные колебания ($\omega < \omega_{ci}$) альфвеновского типа, распространяющиеся со

скоростью $U = V_{a1}$ (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 ленгмюровским зондами совпадает с фронтом магнитного сигнала \tilde{H}_R . Следует отметить, что в опытах наблюдался уход быстрой компоненты из создававшегося инжектором плазменного потока, а в формировании передней его части участвовали только частицы, скорость которых удовлетворяла соотношению

$U_n \leq R\omega_{ci}$. Сформировавшийся профиль магнитного поля \tilde{H}_1 и плотности, по мере продвижения его вдоль камеры и уменьшением величины Mn, U_n^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 ≤ 5 эрст, с характерным временем порядка периода тока инжектора ($3 \cdot 10^{-6}$ сек). Увеличение квазистационарного поля приводит к уменьшению отношения U_n/V_a и хотя характерные частоты колебаний $\sim \omega_{ci}$ возрастают, тем не менее начиная с $H_0 \approx 1$ кэрст. в наших опытах наблюдалась стабилизация начального возмущения и расплывание переднего профиля потока.

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

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]

$$\Delta \sim \frac{Mc}{eH_0} U_n \sim 10 \text{ см.}, \quad U_n/V_a \geq 1.$$

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

Подписи к рисункам

Рис.1. Блок схема установки.

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

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(4). $RC = 20 \cdot 10^{-6}$ сек. 4 - сигнал с магнитного зонда(8). $RC = 25 \cdot 10^{-6}$ сек. $H_0 = 400$ эрст. 5 - сигнал с двойного ленгмюровского зонда. 6 и 7 - сигналы с магнитного зонда(4), иллюстрирующие появление осцилляций на переднем фронте возмущения. $p = 7 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.

Рис.3. Трансформация фронта магнитного возмущения по мере продвижения плазменного потока вдоль магнитного поля H_0 .

$RC = 25 \cdot 10^{-6}$ сек. $NS = 12$, $p = 8 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.

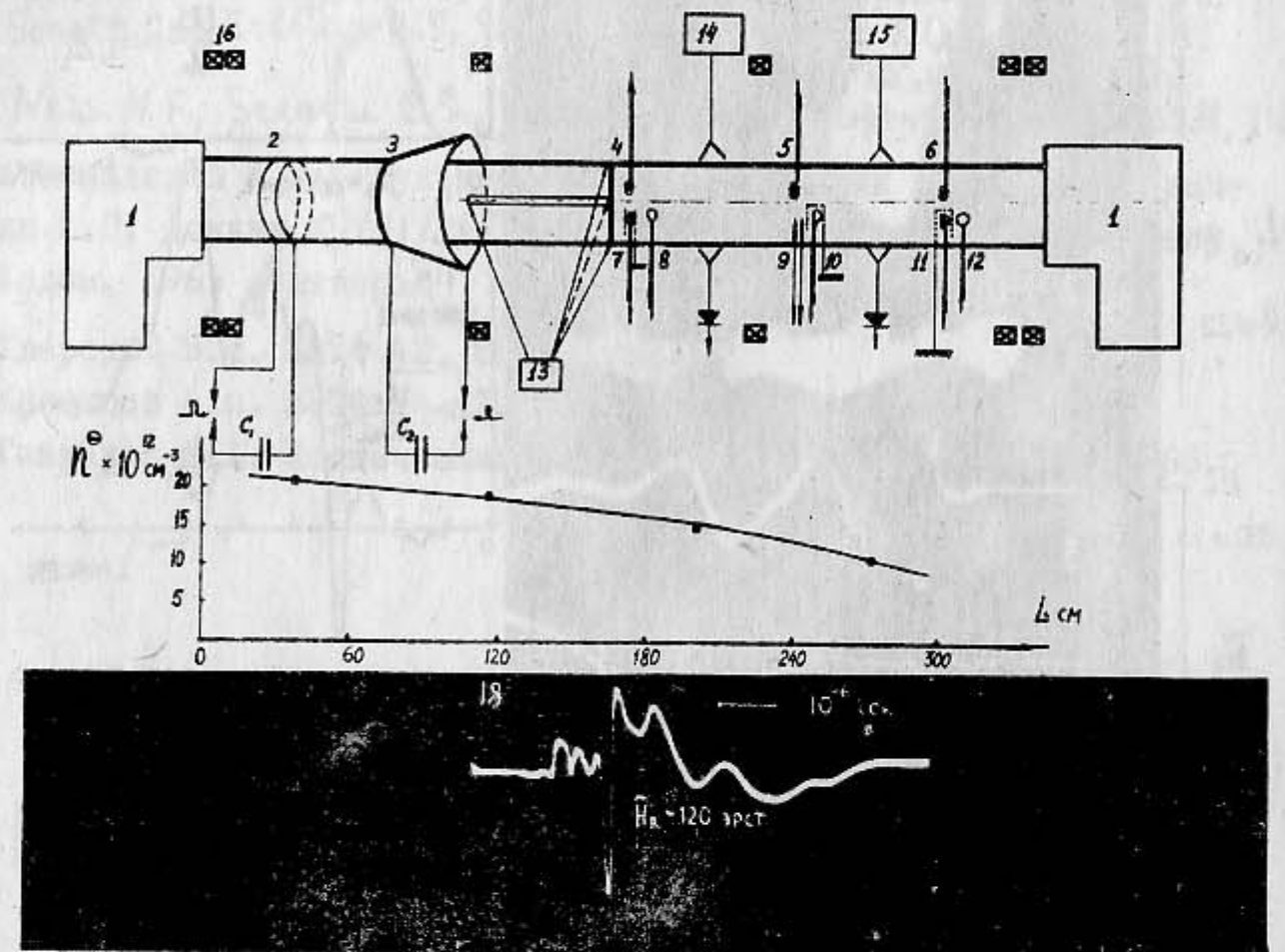


Рис. 1.

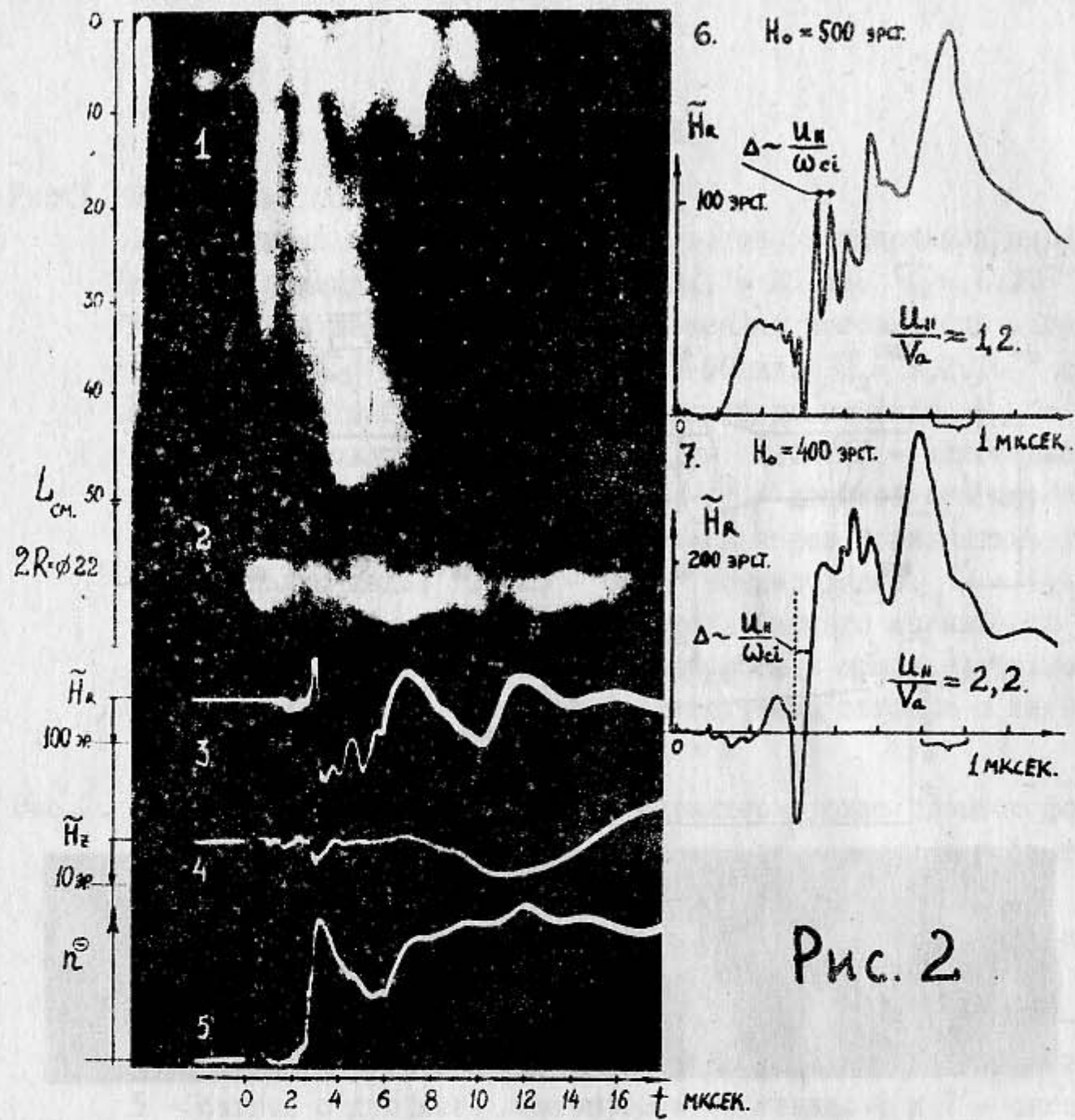


Рис. 2

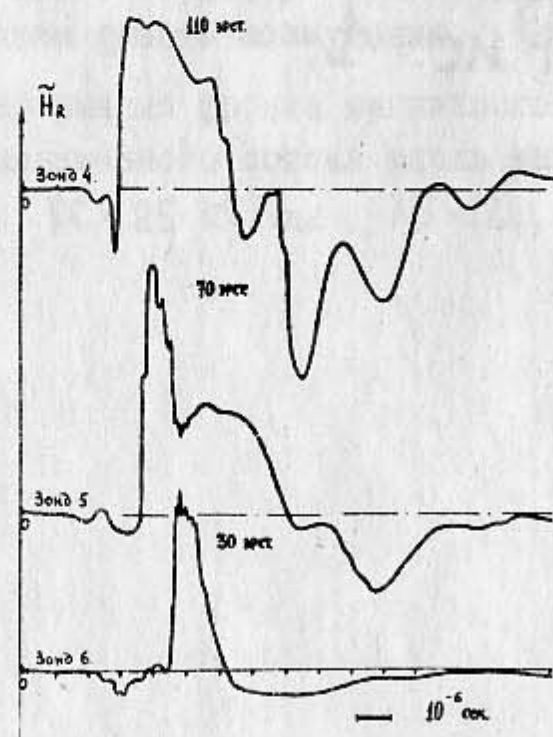


Рис. 3.

Л и т е р а т у р а

1. L.J. Cahill. Scientific American 212 (3), 58, (1965).
2. Сагдеев Р.З. Вопросы теории плазмы т.4, стр.20, 1964г.
3. Sonett C.P., Colburn D.S., Davis L.J., Smith E.J., Coleman P.J. Jr. Phys. Rev. Letters. 13, 153. (1964).
4. Ness. M.F., Searce C.S., Seck. J.B., J. Geophys. Res. 69, 3531, (1964)
5. Искольдский А.М., Лукьянов В.И., Нестерихин Ю.Е., Пономаренко А.Г. Доклад CN21/215 на конференции по ядерному синтезу, Калэм, 1965 сентябрь.
6. Тверской Б.П. ЖЭТФ 42, 833, (1962)
7. Казанцев А.И. ЖЭТФ 44, 1253, (1963)
8. Гинцбург М.А. Космические исследования т.3, в.2, 340, 1965.