

В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, В.И.Пильский

**Влияние дисперсионных эффектов на
структуру ударной волны в замагниченной
плазме**

г.Новосибирск 1967

Препринт

В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, В.И.Пильский

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НА СТРУКТУРУ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

г.Новосибирск
1967г.

Важным проявлением дисперсионных свойств замагниченной плазмы являются ударные волны с осцилляционным профилем. Решения, полученные в теории, зависят от наклона фронта к магнитному полю /1/.

При углах $\theta \ll \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$ ("прямая волна" /1/) осцилляции имеют "длину" $\delta \sim \frac{c}{\omega_0}$ и отстают от основного скачка во фронте, при $\theta \gg \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$

("косая волна" /1,2/) осцилляции опережают скачок; $\delta \sim \frac{c}{\Omega_0} \theta$ (m_e, m_i - масса электрона, иона; ω_0, Ω_0 - плазменная частота электрона, иона; c - скорость света). Профиль и характерные размеры плазменных возмущений, наблюдавшихся в /3-5/, позволили отождествить их с косой /3/ и прямой /4,5/ ударными волнами. Однако, в этих и подобных /6/ экспериментах не измерялся непосредственно угол наклона θ и не исследовалась его роль в волновых процессах. Такие опыты излагаются в настоящей работе. Для косой квазистационарной волны было проведено корректное сравнение δ с теоретическим значением, тогда как ранее /5,6/ использовались довольно произвольные оценки θ из геометрии опыта. Регистрация θ позволила исследовать дисперсионные эффекты и структуру волн при значениях угла $\theta \gg \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$, $\theta \ll \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$, для которых отсутствует аналитическое описание явления. Влияние дисперсии изучалось в условиях ламинарной и турбулентной плазмы.

Эксперименты проводились на установке УН-4 /4,5/. Плазма, помещенная в квазистационарное магнитное поле H_0 , подвергалась быстрому ($\Delta t \sim 50 + 300$ нсек) сжатию переменным полем H_1 , приложенным к её границе (рис.1). Пространственно-временное развитие возмущений регистрировалось с помощью системы из шести магнитных зондов. По запаздыванию сигналов между ближайшими зондами, разнесенными по радиусу (τ_r) и параллельно оси (τ_z), находятся значения радиальной и продольной компонент скорости,

$$u_r(z,z) = \frac{\Delta z}{\tau_r}, \quad u_z(z,z) = \frac{\Delta z}{\tau_z} \quad \text{и угол наклона фронта}$$

$$\sin \theta(z,z) = \frac{u_r \tau_z}{\Delta z} = \frac{\Delta z}{\Delta z} \frac{\tau_z}{\tau_z}, \quad \text{усредненные по интервалам } \Delta z, \Delta z.$$

Наблюдения показали, что перекося фронта задается начальной конфигурацией скинующего слоя плазмы, играющего роль поршня. При достаточной однородности плазмы искривление поршня возникает из-за

неоднородности давления $\frac{H_z^2(z)}{8\pi}$ у края ударного витка (рис.1). В этой области ($10^0 \leq \theta \leq 30^0$) процесс имеет следующие характерные особенности. Если начальное возмущение достаточно укрупнено, от него отщепляется "волна разрежения". При непрерывном давлении поршня перед скачком нарастает шлейф знакопеременных осцилляций, фазовая скорость которых увеличивается с уменьшением длины волны (в аргоновой плазме она могла достигать значений, превышающих $10 V_A$, где $V_A = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi n_0 m_i}}$ - альфвеновская скорость).

В определенных условиях ($\frac{c\sqrt{m_i}}{\sqrt{4\pi n_0 e^2}} \theta \ll R, \Delta t \ll \frac{R\sqrt{4\pi n_0 m_i}}{H_0}$) устанавливается квазистационарная фаза, когда скорость переноса внутри шлейфа становится практически постоянной, а размер последней осцилляции хорошо соответствует значению $\frac{c}{\omega_0} \theta$ (рис.2а). Компонента H_y ($\perp H_0, U$; рис.3а) примерно одинакова по амплитуде с H_z (рис.2а) и сдвинута относительно нее по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Все указанные закономерности согласуются с теорией для $\theta \gg \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$ [1,2].

Внутри ударного витка перекося поршня невелик ($\theta \sim 0 + 10^0$) и возникает из-за неоднородности плазмы. С уменьшением θ убывает число и амплитуда опережающих осцилляций, а в области скачка и за ним нарастают колебания с $\delta \sim \frac{c}{\omega_0}$ (рис.2б). Это указывает на одновременное проявление противоположных дисперсионных эффектов, не компенсирующих друг друга, которые формируют профиль в виде гибрида косоугольной и прямой волн.

При углах $\theta \lesssim 2\sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$ (т.е. ранее, чем при $\theta \ll \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$) преобладает дисперсия, обусловленная инерцией электронов, на что указывает отстающий осцилляторный шлейф и $\delta \sim \frac{c}{\omega_0} / |1|$ (рис.2в). Отличие от стационарного вида прямой волны связано с кумуляцией [5].

Изложенные результаты согласуются с численным решением, полученным в [7], если в качестве общего параметра брать $\frac{\theta}{\sqrt{m_e/m_i}}$.

Регистрация H_y позволяет более четко установить механизм, формирующий ширину скачка при малых углах. Оказалось, что уже после исчезновения опережающих осцилляций остается вклад дисперсии с

$\delta \sim \frac{c}{\omega_0} \theta$, о чем свидетельствуют возмущения H_y , локализованные в области основного скачка (рис.3в,г). В "прямой" волне преобладают отстающие в.ч. колебания H_y с $\delta \sim \frac{c}{\omega_0}$; при $\theta \rightarrow 0 H_y \rightarrow 0$ (рис.3д,е,ж).

Развитие мелкомасштабных неустойчивостей при $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ "замазывает" осцилляции с $\delta \sim \frac{c}{\omega_0}$, однако эффективная глубина скинирования $\delta_s \sim 10^6 \omega_0 / 4$ не препятствует формированию "косых" осцилляций, т.к. $\frac{S_{\omega_0} \theta}{\delta_s} \gg 1$ уже при $\theta \geq 10 \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$. В таком режиме при $\theta \rightarrow 0$ мы наблюдали переход к аperiodическому профилю (турбулентность плазмы фиксировалась независимо по шумовому излучению и рассеянию внешнего пучка электромагнитных волн). Действие джоулевой диссипации, сравнимое с эффектом дисперсии ($\theta \gg \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$), обнаруживалось лишь при очень низких степенях ионизации ($P_0 \sim 10^{-2} + 10^{-1}$ мм.рт.ст., $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$).

Авторы глубоко признательны Р.З.Сагдееву, Ю.В.Нестерихину, В.П.Карпману, А.А.Галееву за помощь и обсуждения работы.

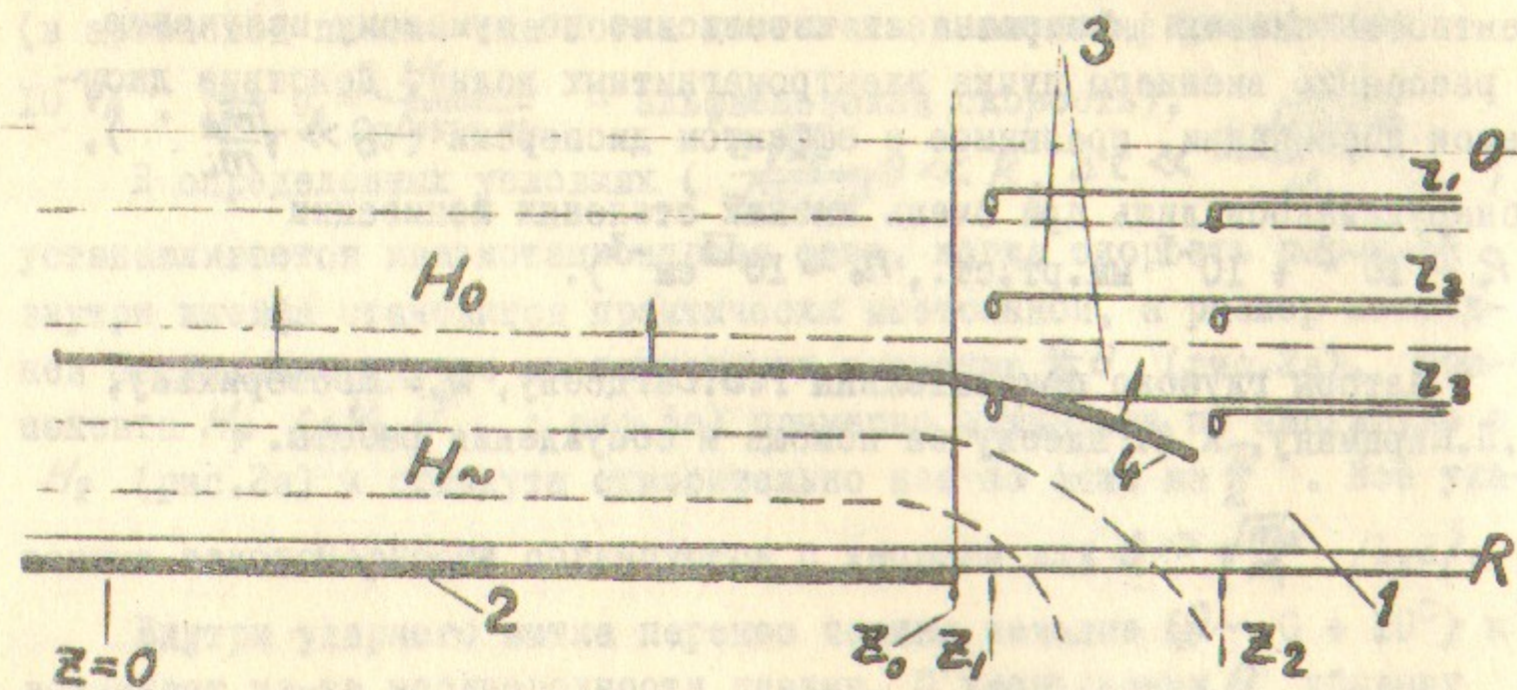


Рис.1. Схема возбуждения и регистрации ударных волн.

- 1 - вакуумный объем (стеклянная трубка, $R = 8$ см);
- 2 - ударный виток (разрез), возбуждающий поле ($z = 0$ - среднее сечение, $z_0 = 15$ см - край витка);
- 3 - магнитные зонды ($z_1 = 0,5$ см, $z_2 = 2,9$ см, $z_3 = 5,3$ см; $\Delta z = z_2 - z_1 = 5$ см); 4 - фронт волны; $H_0 \sim 0 + 2$ кэ, $H_0 \sim 1 + 5$ кэ.

H_z

1. Р.С.Сандеев
2. И.А.Карман
3. А.А.Николаев
4. Р.Х.Куртмурад
5. Р.Л.Куртмурад
6. М.М.Мухоморов
7. А.В.Мухоморов

а

б

в

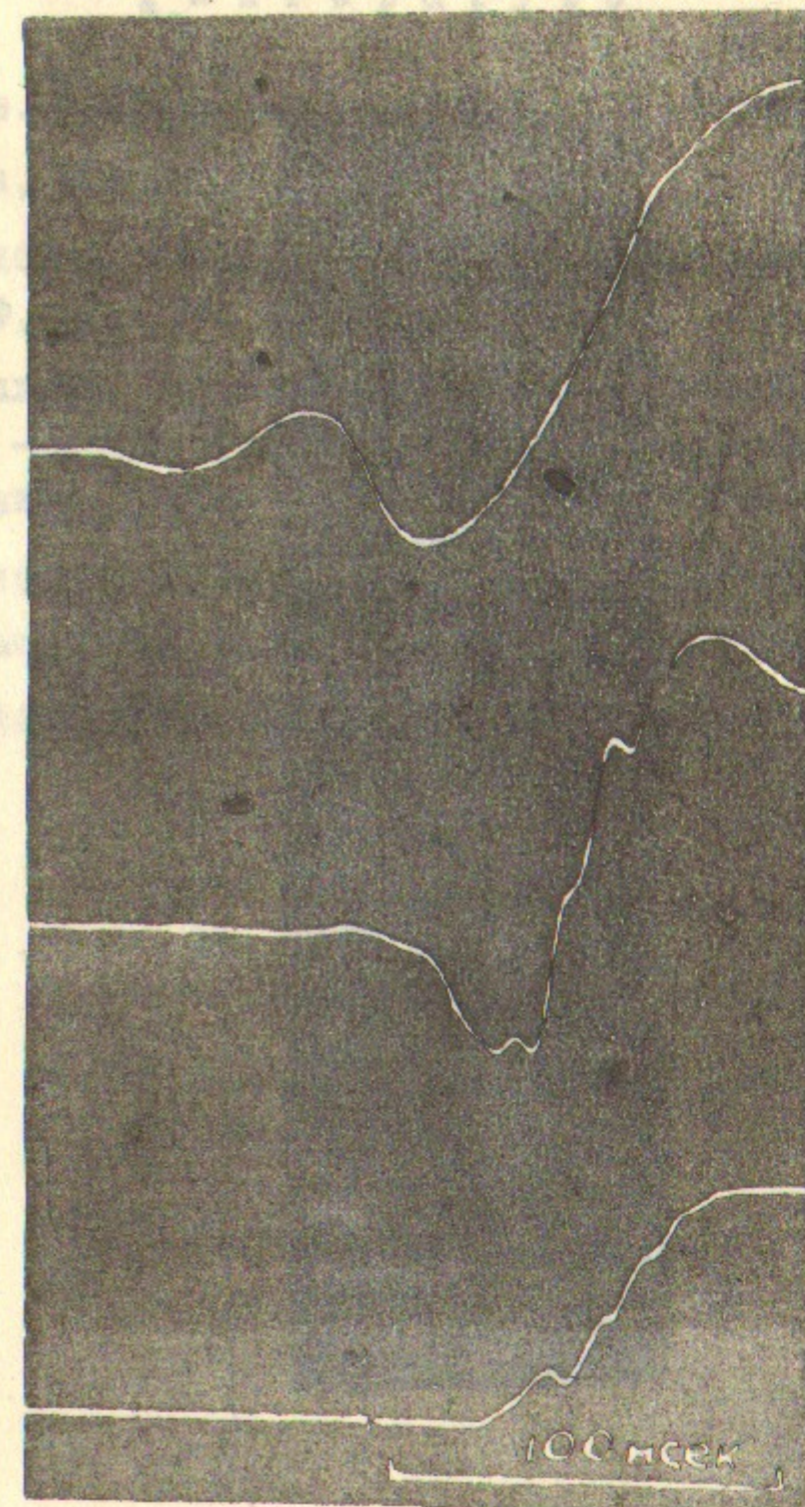


Рис.2. Зависимость профиля ударной волны от наклона фронта к магнитному полю.

- Водород. а) $\theta \sim 10^\circ$, $n_0 \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 110$ э, $z_1 = 15$ см,
- б) $\theta \sim 7^\circ$, $n_0 \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 110$ э, $z_1 = 0$,
- в) $\theta \leq 2^\circ$, $n_0 \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 170$ э, $z_1 = 0$.

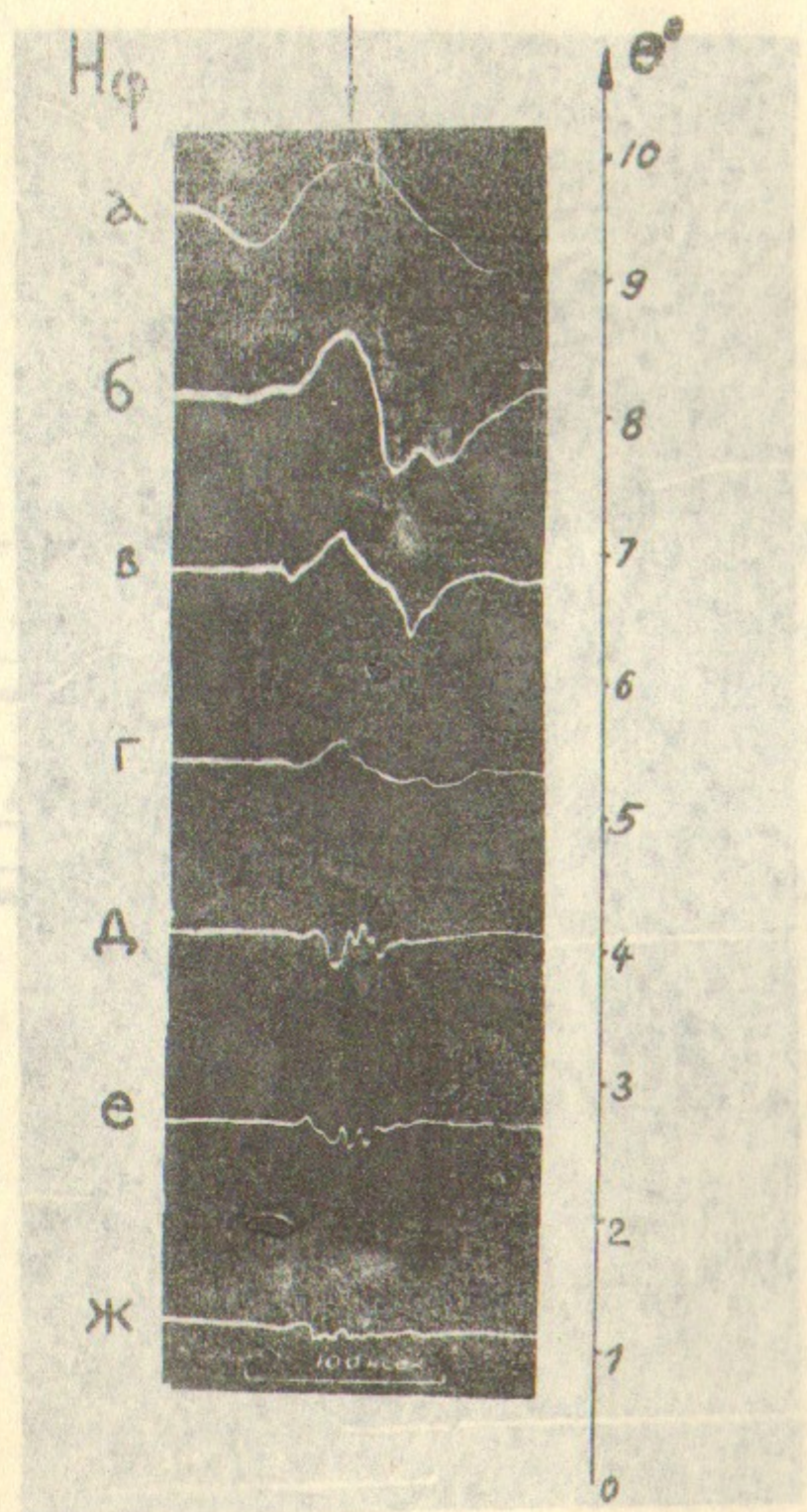
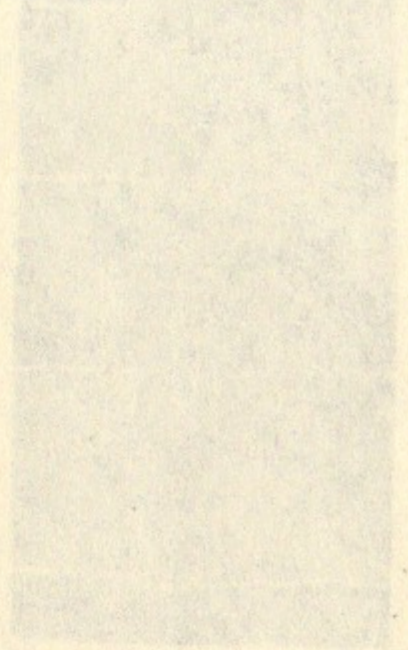


Рис.3. Трансформация φ -ой компоненты магнитного поля с изменением θ .
 Водород. а) $n_0 \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 110 \text{ э}$, $Z_1 = 15 \text{ см}$,
 б) $n_0 \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 110 \text{ э}$, $Z_1 = 0$,
 в-ж) $n_0 \sim 5 \cdot 10^{11} + 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $H_0 \sim 110 + 170 \text{ э}$, $Z_1 = 0$.
 Стрелкой указана область основного скачка H_z .

Л и т е р а т у р а

1. Р.З.Сагдеев. Вопросы теории плазмы, т.4, Атомиздат, 1964.
2. В.И.Карпман, ЖТФ вып.8, 38, 959, 1963.
3. А.М.Искольдский, Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко, ЖЭТФ, 47, 774, 1964.
4. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Доклад CN-21/218 на II Международной конференции по физике плазмы, Калхэм, 1965. *Conference Proceedings vII*, 367.
5. Р.Х.Куртмуллаев, Диссертация, Новосибирск, 1965.
6. M. Morton, *Phys. Letters*, 22, № I, 73 (1966).
7. K. W. Morton, *Phys. Fluids*, 7, № II, 1800 (1964).

1. P.B. Gorbunov. *Вопросы теории...* М., Издательство, 1964.
2. B.N. Karimov. *Курс...* М., 1965.
3. A.M. Nikolaev. *Методы...* А.Т. Понякин, 1966.
4. P.Y. Kuznetsov. *Вопросы...* М., 1967.
5. M. Morozov. *Вопросы...* М., 1967.
6. K.W. Morozov. *Вопросы...* М., 1967.



Ответственный за выпуск редактор К.И.

Подписано к печати 2.02.1967г., заказ № 94

0,2 печ.л., тираж 200 экз., бесплатно.

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР