

E.82

Зуби.

22

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

препринт 312

В.Г.Еселевич, А.Г.Еськов, Р.Х.Куртмуллаев

А.И.Малютин

**К МЕХАНИЗМУ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ
БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫМИ КОСЫМИ
УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**

НОВОСИБИРСК

1969

В.Г.Еселевич, А.Г.Еськов, Р.Х.Куртмуллаев, А.И.Малютин

К МЕХАНИЗМУ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫМИ
КОСЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А Н Н О Т А Ц И Я

В данной работе излагаются экспериментальные результаты по исследованию механизма нагрева плазмы бесстолкновительными косыми ударными волнами.

По распределению электрического и магнитного полей в волне построен ход температуры и проводимости внутри фронта.

Получена экспериментальная зависимость электронного нагрева за фронтом от относительной амплитуды волны h .

Близость экспериментальной кривой к теоретической адиабате Гюгонио позволяет сделать вывод о преимущественном нагреве электронов в волне, а значит о резистивном характере диссипации энергии.

Измерения микрофлуктуаций электрических и магнитных полей не противоречат предположению о раскачке во фронте косой волны ионно-звуковой неустойчивости.

При числах Маха $M \geq M_c$ наблюдается так называемое "опрокидывание" косой ударной волны. Получена зависимость M_c от угла θ . (θ - угол наклона фронта к начальному магнитному полю H_0).

Осцилляторная структура косой ударной волны, предсказанная теорией / 1, 3 /, получила надежное подтверждение в экспериментах / 2, 4, 5, 7 /. Однако, при числах Маха $M > M_c$ ($M = u/V_A$

u - скорость волны, V_A - альфвеновская скорость, M_c - критическое значение числа Маха) возможно разрушение осцилляторной структуры фронта / 4, 6 /.

В настоящей работе косая ударная волна возбуждалась в цилиндрическом плазменном объеме диаметром 16 см (начальная концентрация водородной плазмы $n_0 \sim 5 \cdot 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, начальное магнитное поле $H_0 \sim 100 - 1000 \text{ э}$) с помощью "магнитного поршня", созданного ударным витком /5/. Система зондов, размещенных по координатам " ζ " и " ξ ", позволяла регистрировать локальные значения компонент магнитных и электрических полей. Исследование диссипативных свойств плазмы проводилось по макроскопическому распределению основных параметров во фронте, а также по измерениям микрофлуктуаций электрического поля.

Связь между различными параметрами во фронте волны в предположении её стационарности можно получить из уравнения баланса сил: инерции ионов, магнитного и электронного давлений. В системе волны:

$$P_e - P_0 = n_0 m_i u^2 \left(1 - \frac{V_n}{u}\right) - \left(\frac{H^2}{8\pi} - \frac{H_0^2}{8\pi}\right), \quad (1)$$

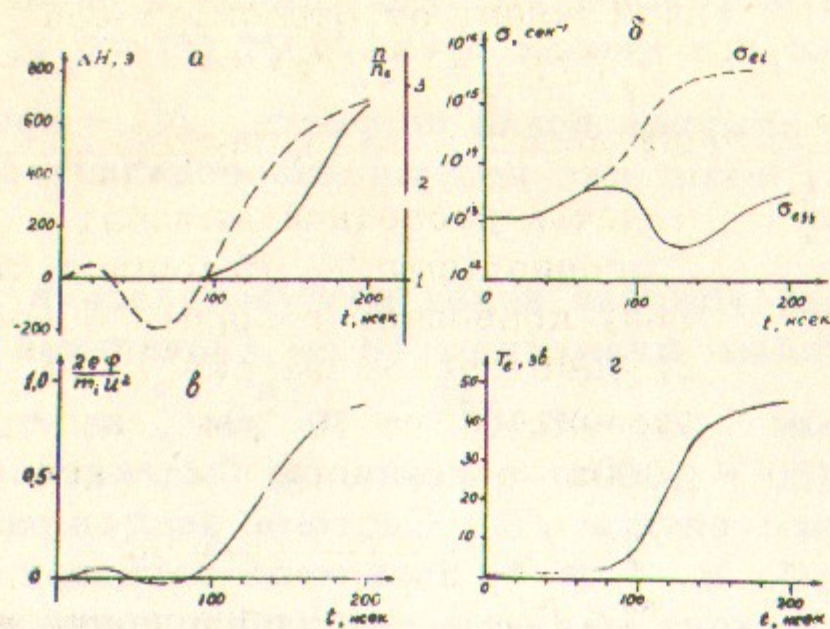
где P_0 и P_e - давление электронов перед и внутри фронта,
 m_i - масса ионов,

$$V_n = u \left[1 - \frac{2e}{m_i u^2} \left(\int_0^x E_n(x') dx' + \frac{u \sin 2\theta}{2M^2 c} \int_0^x H_\varphi(x') dx' \right)\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

E_n - нормальная компонента электрического поля,

H_φ - азимутальная компонента магнитного поля,

θ - угол между фронтом волны и направлением магнитного поля.



Фиг.1

свидетельствует о низкой проводимости плазмы во фронте.

Как видно из фиг.1, г, основной нагрев электронов происходит в области скачка H . В шлейфе измеренное значение T_e в наших условиях весьма мало и может быть объяснено столкновительной диссипацией.

Ход проводимости σ во фронте можно определить из соотношения

$$\frac{d}{dt} \frac{P_e}{n(\gamma-1)} = \frac{j^2}{\sigma n} - P_e \frac{d}{dt} \frac{1}{n}, \quad (5)$$

где ток $\vec{j} = \frac{c}{4\pi} \text{rot} \vec{H}$.

Проводимость в шлейфе растет как $T^{3/2}$, а в области основного скачка наблюдается её резкое уменьшение до аномально низкого значения $\sigma_{eff} \sim 10^{-3} \sigma_{кул}$. Было установлено, что резкое уменьшение проводимости связано с выполнением условий: $T_e > T_i$

и $v_{др} > c_s$, где

$v_{др}$ - дрейфовая (токовая) скорость электронов,

c_s - скорость ионного звука.

На фиг.1 (а, в, г) показаны найденные из эксперимента временные зависимости

$$H, n = n_0(u/V_n),$$

$$\varphi = \int_0^x E(x') dx'$$

$$\text{и } T_e = \frac{P_e}{n}$$

в кривой волне. Отставание профиля плотности от профиля магнитного поля (установленное первоначально интерферометрическим методом [4])

С помощью диамагнитных зондов [8] получена зависимость электронного давления за фронтом ударной волны от относительной амплитуды $h = H_t(2)/H_t(1)$ (где $H_t(1)$ и $H_t(2)$ - тангенциальные компоненты магнитного поля перед и за фронтом волны).

Близость экспериментальных точек и расчетной адиабаты

Гюгонио (фиг.2, сплошная линия) позволяет говорить о преимущественном нагреве электронов плазмы и преобладании резистивной диссипации при

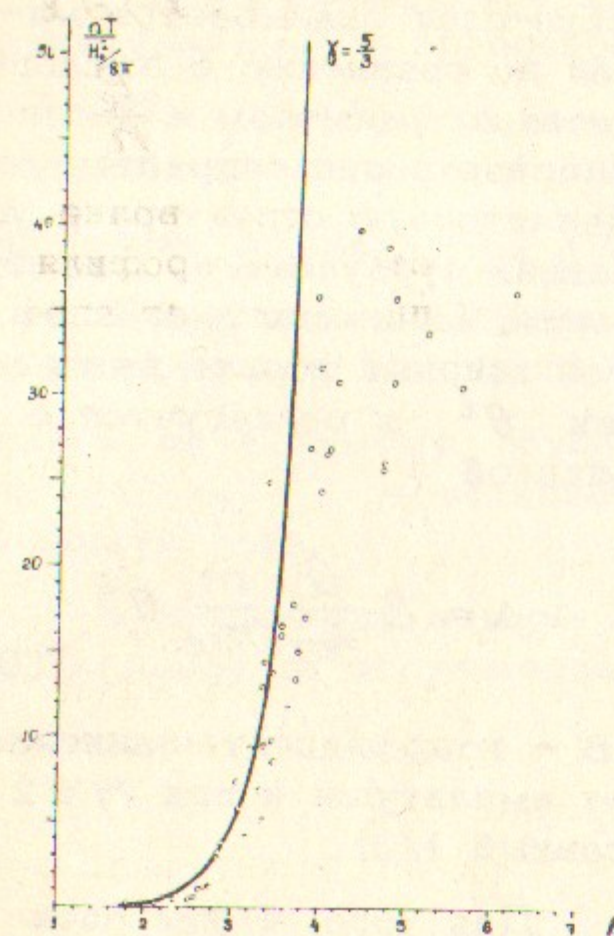
$$h < h_c \text{ (соответственно)}$$

$M < M_c$). Для объяснения изменения хода $n T_e$ при $M > M_c$

можно предположить быстрое возрастание ионного давления в этих условиях. Весьма существенным является тот факт, что наблюдаемое в работе [8] "опрокидывание" кривой ударной волны также происходит при

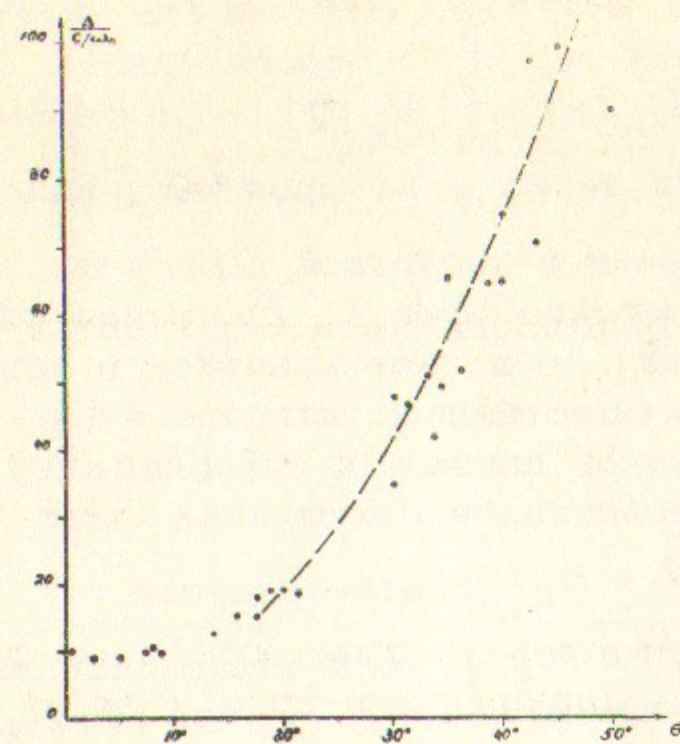
$M = M_c$. Была обнаружена зависимость M_c от θ (так для $\theta = 0^\circ$, $M_c \approx 3$; для $\theta = 30^\circ$, $M_c \approx 4 \div 5$).

Была исследована зависимость относительной ширины фронта $\Delta/(c/\omega_0)$ от угла для чисел Маха $M \approx 2 \div 3$.



Фиг.2.

Из фиг.3 видно, что при $\theta < 14^\circ$ величина $\Delta/(c/\omega_0)$ постоянна и совпадает с шириной диссипативного фронта прямой ударной волны, равной 10 (ω_0 - электронная ленгмюровская частота). Отсюда следует, что для этих углов величина резистивной диссипации постоянна ($v_{eff} \sim 10M\omega_r$, где ω_r - гибридная ларморовская частота $\omega_r = eH_0/c\sqrt{m_e m_i}$), и толщина скин-слоя больше дисперсионного размера $(c/\Omega)\theta$ (Ω_0 - ионная ленгмюровская частота).



Фиг.3.

Если предположить, что и при углах $\theta > 14^\circ$ эффективная частота столкновений слабо зависит от θ и равна $\sim 10M\omega_r$, то соответствующая толщина скин-слоя оказывается малой по сравнению с дисперсионным размером и косая ударная волна сохраняет осцилляторную структуру в условиях турбулентной диссипации. При этом наблюдаемая ширина фронта растёт как θ^2 и согласуется с оценкой

$$\Delta \approx B \frac{u}{v_{eff}} \frac{m_i}{m_e} \theta^2 \quad (6)$$

(B - коэффициент, зависящий от амплитуды и при $M \approx 2 \div 3$ равный $1/3$).

Для того, чтобы оценить относительный вклад парных столкновений в диссипацию и найти границу бесстолкновительности, была исследована зависимость относительной ширины фронта волны от начальной концентрации. Видно, что вплоть до $n_0 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ширина фронта остается постоянной, т.е. преобладающую роль играет бесстолкновительная диссипация (фиг.4а,

$$\theta \approx 0^\circ \div 14^\circ, \quad \Delta \approx 10 \frac{c}{\omega_0}).$$

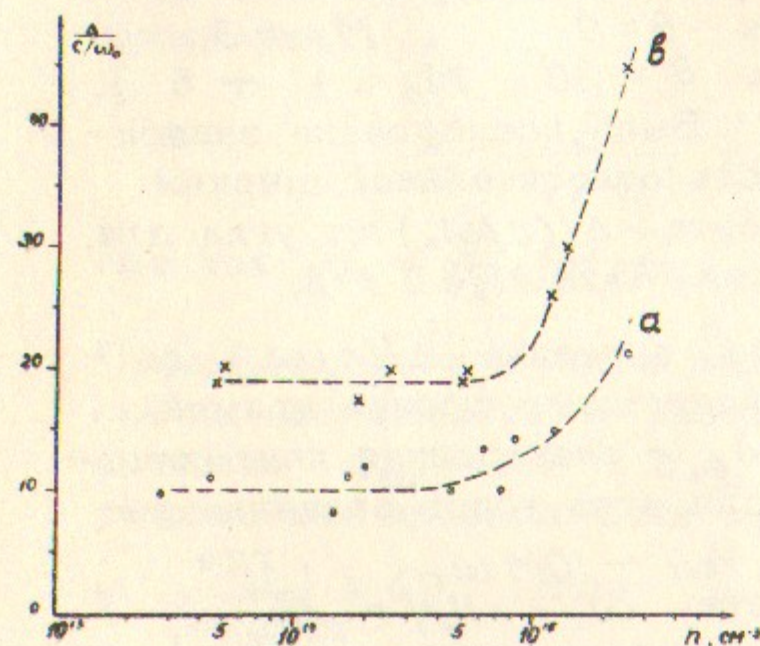
Увеличение Δ при $n_0 > 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ связано с возрастанием роли парных столкновений ($\nu_{ei} \sim 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ при температуре за фронтом $T_e \sim 5 \text{ эв}$, концентрации $n \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). При увеличении θ (рис.4б, $\theta \sim 20^\circ$) переход к аperiodическому профилю происходит при больших значениях n_0 , что связано с ростом характерного дисперсионного размера $(c/\Omega_e)\theta$.

Измерение микрофлуктуаций проводилось двойным электрическим зондом /6/ в аргоновой плазме при $n_0 \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и

$M < M_c$. Во фронте косой ударной волны были обнаружены электростатические колебания с частотами, близкими к $\Omega_e/2\pi$ при выполнении условия $v_{gp} > c_s$.

Совокупность изложенных результатов указывает на аномальную резистивную диссипацию в косой ударной волне при $M < M_c$, которая, по-видимому, обусловлена ионно-звуковой неустойчивостью. При $M > M_c$ резистивная диссипация перестает играть преобладающую роль.

В заключении авторы выражают искреннюю признательность Р.З.Сагдееву за обсуждение и помощь в работе.



Фиг.4

Л и т е р а т у р а

1. Р.З.Сагдеев. Вопросы теории плазмы, т.4, 20, Москва, Атомиздат, 1964 г.
2. А.М.Искольдский и др. ЖЭТФ, 47, 774 (1964).
3. *K.W. Morton, Phys. Fluids*, 7, № 11, 1800(1964)
4. В.Г.Еселевич и др. Доклад на II Европейской конференции по физике плазмы, Стокгольм, 1967 г.
5. В.Г.Еселевич и др. Письма в редакцию ЖЭТФ, 5, в.9, 311 (1967).
6. С.Г.Алиханов и др. Доклад *CM - 24/A-1* на III Международной конференции по термоядерному синтезу. Новосибирск.1968г.
7. *Robson A.E.* и др. Доклад *CM - 24/A-6* на III Международной конференции по термоядерному синтезу. Новосибирск, 1968 г.
8. Р.Х.Куртмуллаев и др. Препринт № 228, ИЯФ, Новосибирск, 1968 г.

Ответственный за выпуск А.Г.Еськов

Подписано к печати 27.5.68.

Усл. 94 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.

Заказ № 312

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.