

НАГРЕВ ИОНОВ И ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОРШНЯ С ПЛАЗМОЙ

Н.А.Кошилев, Н.А.Строкин, А.А.Шишко

Экспериментально исследовались ионный нагрев и структура потенциала при сжатии плазмы ($n_0 \approx 0,7 \cdot 10^{12} + 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) магнитным поршнем ($H = 1200 \text{ э}$, $T/4 = 400 \text{ нсек}$) в θ -пинче без начального магнитного поля. Показано существование широких спектров ионов, движущихся в радиальном направлении и рассеянных на угол 45° . Перед магнитным поршнем формируется скачок потенциала с шириной $\sim 50 + 100$ дебаевских длин. Результаты не противоречат предположению о существовании в рассмотренных условиях турбулентной электростатической ударной волны.

Как известно ударной волной может быть осуществлен быстрый нагрев плазмы до высоких температур. Для термоядерных исследований наибольший интерес представляют случаи, когда нагревается, в основном, ионная компонента. Результаты экспериментального изучения магнитозвуковых бесстолкновительных ударных волн [1, 2] показали, что преимущественный нагрев ионов происходит при больших числах Маха $M_A = \frac{U}{V_A} > M_c \approx 4,5$ ($V_A = H_0 / \sqrt{4\pi n_0 m_i}$) — альфзеновская

скорость, H_0 — начальное магнитное поле). Представляет интерес исследование процессов, протекающих в условиях, когда $M_A \rightarrow \infty$ ($H_0 \rightarrow 0$). В этих условиях следует выделить ситуацию, при которой формируется отражающий магнитный поршень, создающий встречные потоки ионов большой интенсивности. При развитии ион-ионной неустойчивости турбулентная вязкость должна приводить к эффективной бесстолкновительной диссипации энергии. Интересно также исследовать возможность формирования в плазме перед поршнем электростатической турбулентной ударной волны, обнаруживаемой в экспериментах при изучении взаимодействия потока разреженной плазмы с магнитным барьером [3].

Эксперименты проводились на установке "УН-Феникс" по схеме, описанной в [4]. Плазма с концентрацией $n_0 = (0,7 + 5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($T_e \approx T_i \approx 0,5 + 1,0 \text{ эв}$, $H_0 \lesssim 5 \text{ э}$) подвергалась в цилиндрической стеклянной камере ($d_1 = 16 \text{ см}$, $l_1 = 100 \text{ см}$) быстрому сжатию магнитным полем ($H = 1200 \text{ э}$, $T/4 = 400 \text{ нсек}$), возбуждаемым ударным витком ($l_2 = 30 \text{ см}$). Измерения параметров токового слоя (ширины Δ_M , радиальной скорости распространения U , скачка магнитного поля ΔH) проводились магнитными зондами с открытой петлей ($d_2 = 3 \text{ мм}$), расположенными на различных расстояниях от оси. Величина скачка потенциала $\Delta\phi_m$ в слое и его структура измерялись плавающими электрическими зондами. Использование зондов, аналогичных описанным в [1], и широкополосной регистрирующей аппаратуры ($\Delta f \sim 1 \text{ ГГц}$), позволило получить высокое временное ($\lesssim 1 \text{ нсек}$) и пространственное ($\sim 10^{-2} \text{ см}$) разрешения. Энергетические спектры ионов dn_i/dE измерялись по быстрым атомам перезарядки с помощью восьмиканального анализатора нейтраль-

ных частиц, имеющего временное разрешение $10 + 30$ нсек. Для исключения из рассмотрения эффектов кумуляции нейтральные частицы выводились по керамической трубке ($d_3 = 5$ мм), выдвинутой за ось камеры на расстояние $r = 2$ см.

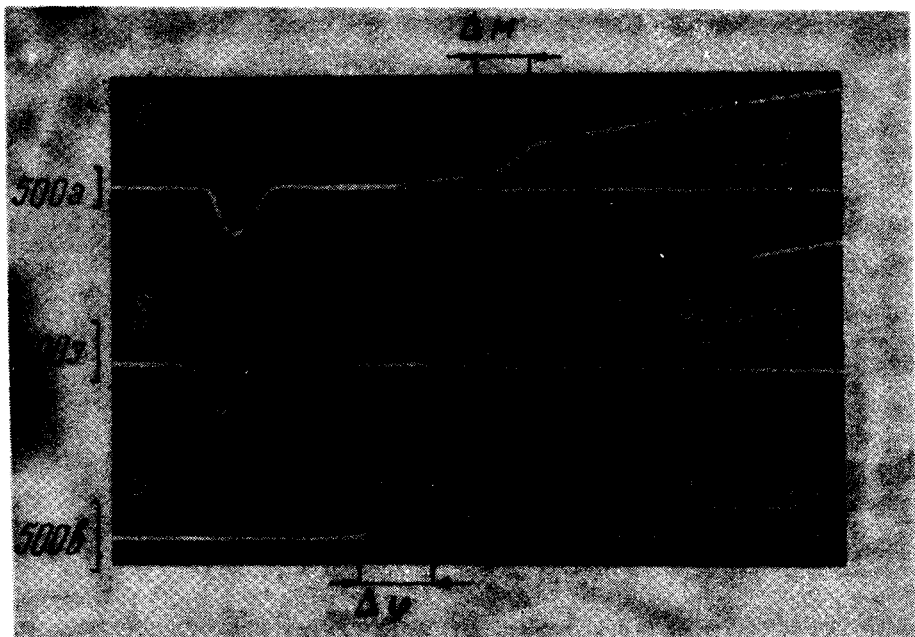


Рис. 1. Типичные осциллограммы сигналов с магнитных зондов, установленных на расстояниях (а) — $r_2 = 4,5$ см, (б) — $r_1 = 3,5$ см от оси и электрического зонда, (в) — $r_1 = 3,5$ см ($n_0 = 2 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $U \approx 3,8 \times 10^7$ см/сек)

Измерения магнитного поля пятью зондами, установленными вдоль радиуса камеры через равные промежутки $\Delta r = 1$ см, показали, что в плазме формируется квазистационарный (U, Δ_M практически не меняются на длине регистрации) токовый слой с шириной $\Delta_M \approx (2 + 4) C / \omega_{pe}$ (ω_{pe} — ленгмюровская частота электронов, C — скорость света) (рис. 1, а, б). Зависимость $U = f(n_0, \Delta H)$ близка к $U = \Delta H / \sqrt{16\pi n_0 m_i}$ (в исследованном диапазоне n_0 скорость U лежит в пределах $2,5 \cdot 10^7 + 7 \cdot 10^7$ см/сек). Одновременная регистрация амплитуды потенциала в слое $\Delta\phi_m$ позволила определить что величина $2e\Delta\phi_m / mU^2 \approx 1$. Полученные соотношения согласуются с условиями полного отражения плазмы магнитным поршнем [5]. При измерении dn_i / dE , в радиальном направлении регистрируется широкий спектр в виде плато с резким спадом при энергии E_1 (~ 1900 эв) (рис. 2, кривая 1). Одновременные измерения скорости слоя при различных n_0 показали, что энергия E_1 связана с U соотношением: $E_1 \approx m_i (2U)^2 / 2$, что является независимым подтверждением зондовых данных с существованием отражения. Важным фактом, указывающим на нагрев ионов при взаимодействии магнитного поршня с плаз-

мой является обнаруженное уширение спектра¹⁾. Измерения спектров ионов, идущих под углом 45° к аксиальному направлению (рис. 2, кривая 2) указывают на турбулентную природу взаимодействия отраженно-го и налетающего потоков плазмы. Из сравнения кривых 1 и 2 видно,

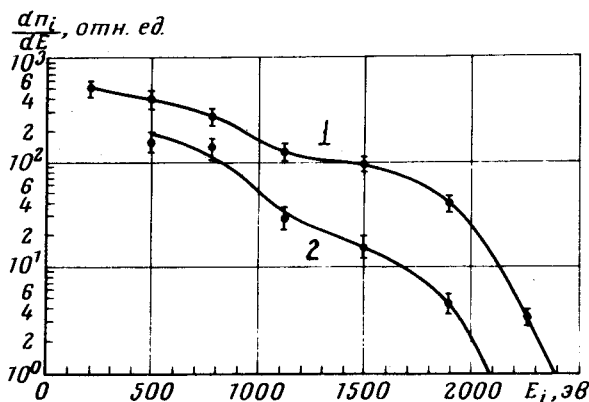


Рис. 2. Энергетические спектры ионов dn_i/dE , движущихся в радиальном направлении (кривая 1) и под углом 45° к аксиальному направлению (кривая 2) ($n_0 = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $U \approx 2,8 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$)

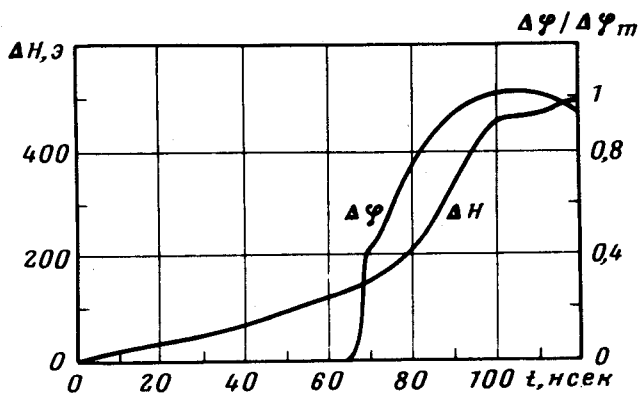


Рис. 3. Временная последовательность регистрации потенциального $\Delta\phi$ и магнитного ΔH скачков ($r_1 = 3,5 \text{ см}$) ($n_0 = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $U \approx 3,8 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$)

что относительная доля рассеянного потока достаточно велика $10 + 50\%$ и, как показывают оценки, не может быть объяснена рассеянием на кулоновских столкновениях $l_3/\lambda_K \sim 10^{-2} + 10^{-4}$, l_3 — толщина рассеивающей мишени, λ_K — кулоновская длина свободного пробега). Измерения спектров позволяют сделать вывод о наличии турбулентного нагрева

¹⁾ К уширению спектра нейтральных частиц, по которому восстанавливались dn_i/dE , могут привести эффекты перезарядки ионов в разных точках потенциала. Однако в режимах с $n_0 > 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, где ширина профиля потенциала много меньше длины пути перезарядки, также регистрируется широкий спектр.

ионной компоненты плазмы. Такое поведение может быть связано с развитием в плазме с $T_e > T_i$ ион-ионной неустойчивости [6] (неизотермичность плазмы, как показывают оценки, может достигаться за счет кулоновского прогрева электронов ($T_e \sim 30 \text{ эВ}$) в подножии, которое существует перед основным скачком магнитного поля (рис. 1, а, б).

Исходя из полученных экспериментальных данных можно сделать предположение о существовании в рассматриваемых условиях турбулентной электростатической ударной волны, образующейся при развитии ионной неустойчивости. Для обнаружения фронта этой волны электрический зонд устанавливался на расстоянии 3,5 см от оси. Одновременно контролировались профиль магнитного поля в поршне и скорость его распространения. На рис. 1, в приведена типичная для указанного диапазона n_0 осциллограмма сигнала с электрического зонда. Характерной особенностью регистрируемого профиля потенциала является наличие скачка с временной длительностью $\Delta t \approx 2 + 4 \text{ нсек}$, распространяющегося впереди магнитного поршня (рис. 3). Оценки пространственной ширины этого скачка, сделанные по удвоенной скорости поршня, дают величину $\Delta \phi \approx (50 + 100)r_D$ (r_D — дебаевский радиус при $T_e = 30 \text{ эВ}$, $n_e = n_0$).

Таким образом, совокупность экспериментальных фактов показывает, что при распространении в плазме отражающего магнитного поршня наблюдается эффективный бесстолкновительный нагрев ионной компоненты. Перед поршнем наблюдается фронт потенциала с шириной $\Delta \phi \ll \Delta_M$. Полученные результаты согласуются с предположением о существовании в рассмотренных условиях турбулентной электростатической ударной волны.

В заключение авторы благодарят В.Т.Бельды и Н.В.Лебедева за помощь в проведении измерений.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распределения радиоволн

Поступила в редакцию
30 июля 1977 г.

Литература

- [1] В.Г.Еселевич, А.Г.Еськов, Р.Х.Куртмуллаев, А.И.Малютин. ЖЭТФ, 60, 2079, 1971.
- [2] Н.И.Алиновский, А.Т.Алтынцев, Н.А.Кошилев. ЖЭТФ, 62, 2121, 1972.
- [3] О.Л.Волков, В.Г.Еселевич, Г.Н.Кичигин, В.Л.Паперный. ЖЭТФ, 67, 1689, 1974.
- [4] Н.А.Кошилев, В.Л.Масалов, Н.А.Строкин, А.А.Шишко. ЖЭТФ, 72, 2110, 1977.
- [5] К.Лэнгмайр. Физика плазмы. М., Атомиздат, 1966.
- [6] А.Б.Михайловский. Теория плазменных неустойчивостей, М., Атомиздат т. 1, 1970.