

СВЕРХАЛЬФВЕНОВСКАЯ ВОЛНА РАЗРЕЖЕНИЯ В ПЛАЗМЕ

*А. Т. Алтынцев, Н. А. Кошилев, В. И. Красов,
В. Л. Масалов, О. Г. Парфенов, А. А. Шишко*

Обнаружена сверхальфвеновская волна разрежения распространяющаяся в замагниченной плазме с $\beta < 1$ поперек магнитного поля. При $\omega_{He} / \omega_{pe} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ скорость волны достигает значений $10 \div 30 v_A$. Аномально низкая проводимость σ указывает на турбулентный характер процессов во фронте волны, где проникновение поля носит диффузный характер.

Как известно, в магнитной гидродинамике скорость проникновения импульса разрежения магнитного поля в замагниченную плазму при $\beta = H^2 / 8\pi nT \ll 1$ определяется альфвеновской скоростью v_A . В данной работе изложены результаты экспериментальных исследований, которые показывают, что в некоторых условиях скорость волны разрежения может достигать значений $10 \div 30 v_A$, где v_A определяется по начальным параметрам плазмы.

Эксперимент проводился на установке "УН-Феникс", описанной в работах [1, 2]. Плазма с концентрацией $n_0 = 10^{11} + 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и начальной температурой $T_0 = 1 \div 5 \text{ эв}$ создавалась в цилиндрическом стеклянном объеме ($l = 100 \text{ см}$, $\phi = 16 \text{ см}$), помещенном в квазистационарное магнитное поле ($H_0 = 10^2 \div 10^3 \text{ э}$, $\tau = 1,5 \text{ мсек}$). В качестве рабочих газов использовались H_2 , He, Ar. Волна разрежения, движущаяся к оси системы поперек начального магнитного поля, возбуждалась при разряде малоиндуктивного конденсатора на ударный виток длиной 30 см. Поле ударного витка \tilde{H} было направлено навстречу начальному полю и в процессе эксперимента принимало два значения:

$$\tilde{H} = 1200 \text{ э}, \tau/4 = 500 \text{ нсек}; \quad \tilde{H} = 200 \text{ э}, \tau/4 = 250 \text{ нсек}.$$

Измерения начальной концентрации плазмы проводились с помощью 4-х и 8-ми миллиметрового радиоинтерферометров. Начальная температура плазмы контролировалась тройным лэнгмюровским зондом.

Распространение магнитного возмущения по радиусу исследовалось с помощью магнитных зондов H_z ($\phi = 3 \text{ мм}$). Зонды были расположены в центральном сечении ударного витка ($r_1 = 3,0 \text{ см}$; $r_2 = 4,5$; $r_3 = 6,0 \text{ см}$).

Типичные осциллограммы сигналов с магнитных зондов показаны на рис. 1. Скорость проникновения магнитного возмущения в плазму определялась по началам сигналов $\partial H / \partial t$, которые снимались одновременно с магнитным полем. На рис. 1 соответствующие моменты времени указаны стрелками.

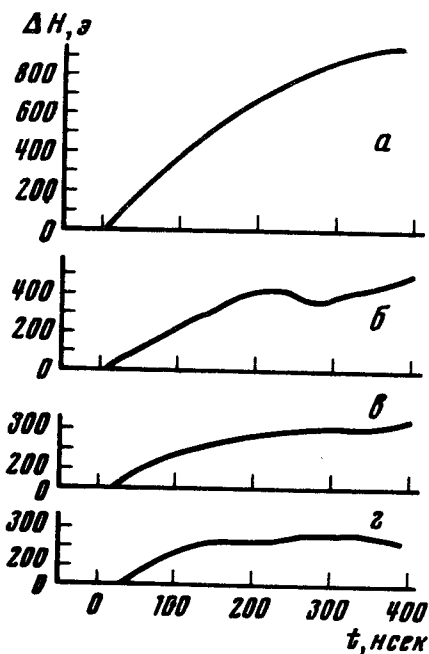


Рис. 1. Сигналы с магнитных зондов ($\Delta H = H_0 - H$): а — магнитное поле вне плазменного объема; б, в, г — магнитное поле в плазме на различных расстояниях от оси: $r = 6,0$ см; $r = 4,5$ см; $r = 3,0$ см соответственно $H_0 = 700$ э, $n_0 = 4,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$

В условиях эксперимента скорость u зависит только от начальных параметров плазмы n_0 и H_0 и эту зависимость удобно представить как функцию $u/v_A = f(v_A)$ (рис. 2). Видно, что она носит резонансный характер, причем, максимальная скорость проникновения магнитного возмущения в плазму для разных газов достигается при одном и том же значении $H_0/\sqrt{n_0}$, соответствующем $\omega_{He}/\omega_{pe} = 3,3 \cdot 10^{-2}$. Здесь ω_{pe} — плазменная, ω_{He} — циклотронная электронные частоты. В оптимальных условиях u достигает значения $20 + 30 v_A$ (для Ar).

Из осциллограмм магнитных сигналов, снятых в оптимальных условиях на водороде (рис. 1), видно, что процесс проникновения магнитного возмущения в плазму нестационарен, поскольку амплитуда и скорость возмущения уменьшаются при его движении к оси системы. Пространственный размер фронта магнитного сигнала сравним с радиусом плазменного объема.

Потенциальные и электрические измерения в этих условиях показывают, что ионы в плазме ускоряются в направлении, противоположном направлению движения магнитного возмущения и скорость их не превышает v_A .

Этот результат подтверждается непосредственными измерениями энергии ионов, движущихся от оси системы, проведенными с помощью электростатического анализатора нейтралов перезарядки.

Локальные измерения концентрации, проведенные во фронте волны разрежения при помощи микроволнового отражательного зонда подобного описанному в работе [3], показали, что в начальной стадии сигнала (~ 150 нсек) при изменении магнитного поля в плазме в 1,5–2 раза плотность практически не меняется.

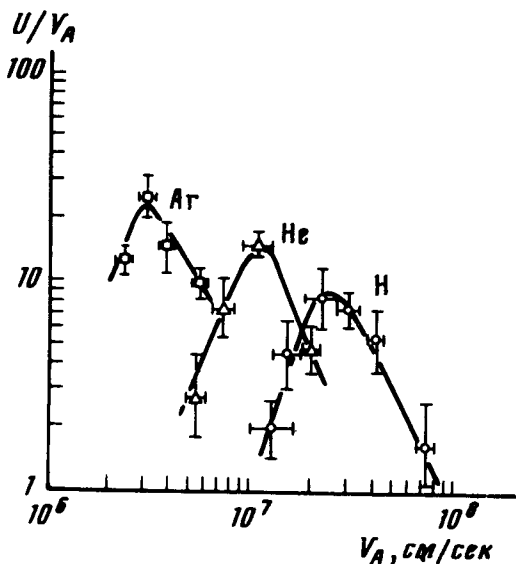


Рис. 2. Зависимость скорости проникновения импульса разрежения магнитного поля U от альфвеновской скорости V_A для разных газов (аргон, гелий, водород)

На основании изложенных фактов можно сделать вывод, что в оптимальных условиях проникновение импульса разрежения магнитного поля в плазму носит диффузный характер.

Оценка величины проводимости σ во фронте волны разрежения проводилась следующими способами: 1) оценка σ по динамике радиального распределения магнитного поля в плазме в предположении, что проникновение импульса разрежения описывается уравнением диффузии; 2) вычисление σ по закону Ома с помощью данных с электрических зондов (E_r , E_ϕ) и определенной по магнитным сигналам азимутальной плотности тока i_ϕ .

В оптимальных условиях оба метода дают для проводимости значение $\sigma \leq 10^{12}$ сек $^{-1}$. Классическая проводимость плазмы в условиях эксперимента равна $10^{13} \pm 10^{14}$ сек $^{-1}$.

Таким образом в замагниченной плазме при $\omega_{He} / \omega_{pe} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ возможно существование сверхальфвеновской волны разрежения, движущейся поперек магнитного поля. Проникновение импульса разрежения магнитного поля в плазму носит диффузный характер. Аномально низкое значение проводимости во фронте указывает на турбулентную природу этой диффузии.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
13 июля 1973 г.

Литература

- [1] Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев.
II Междунар. конф. по физике плазмы, Калэм, 1965, доклад
С № 21/218.
- [2] А.Г.Еськов, Р.Х.Куртмуллаев, А.И.Малютин, В.И.Пильский, В.Н.Семенов. ЖЭТФ, 56, 1480, 1969.
- [3] Н. Hermansdorfer. Z. Naturforsch, 21a, 1471, 1966.
-