

**ОСЦИЛЛЯТОРНАЯ СТРУКТУРА КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ
МАГНИТО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ**

Г. Г. Долгов-Савельев, В. К. Малиновский, Ю. Е. Нестерихин

(Новосибирск)

В последнее время большое количество работ посвящено изучению структуры бесстолкновительных ударных волн в плазме [1, 3]. Теоретически и экспериментально было показано, что при $\omega_{Hi}\tau_i \gg 1$ и $\omega_{He}\tau_e \gg 1$ ($\omega_{Hi, e} = eH/m_{i,e}c$ — ларморова частота для ионов, электронов; $\tau_{i,e}$ — время свободного пролета) волна имеет осцилляторную структуру, причем пространственный масштаб осцилляций порядка c/Ω_0 , где $\Omega_0^2 = 4\pi ne^2/M$, если направление распространения волны не близко к поперечному по отношению к направлению магнитного поля.

Однако все предшествующие эксперименты имеют дело с нестационарными ударными волнами. В почти стационарном режиме подобные исследования бесстолкновительных волн в плазме ведутся при полетах спутников в околоземном пространстве, когда изучается взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой земли. К сожалению, совокупность экспериментальных данных в настоящее время здесь недостаточна.

Для изучения структуры ударной волны авторами была построена установка, которая включает в себя в качестве главных элементов плазменный инжектор [4] и интерферометр Майклсона [5].

Ударная волна образовывалась при сверхзвуковом обтекании тела потоком разреженной плазмы. В качестве такого обтекаемого тела брался цилиндр диаметром 10 мм и длиной 80 мм. Направление движения потока перпендикулярно образующей цилиндра.

Источником света для интерферометра служил рубиновый лазер в режиме импульсной добротности для кадровых съемок и в режиме квазинепрерывной генерации для хронографических разверток. Кадровые фотографии позволяли получить картину обтекания с экспозицией $2 \cdot 10^{-8}$ сек. Распределение плотности плазмы во времени и скорость потока определялись при помощи хронографических разверток интерференционной картины.

Температура электронной компоненты измерялась по рассеянию лазерного излучения на плазме.

В описываемых ниже экспериментах параметры рабочей части плазменного сгустка были следующими: $n_{0emax} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — максимальная плотность электронов; $T_{0e} = T_{0i} = T_0 = 4 \text{ эв}$ — температура плазмы; $v = 9.3 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ — направленная скорость потока.

Длительность рабочей части сгустка составляла около 10^{-5} сек во временном масштабе, так что условие квазистационарности процесса $\tau^\circ \gg L/v$ (τ° — длина рабочей части сгустка, L — размер обтекаемого тела, v — направленная скорость потока) выполнялось с большим запасом.

В качестве рабочего газа использовался водород. Плазменный инжектор и плазмопровод были помещены в продольное магнитное поле, величина которого могла изменяться от 0 до 3 кгс. Параметры сгустка при этом сохраняли названные значения с точностью 10%.

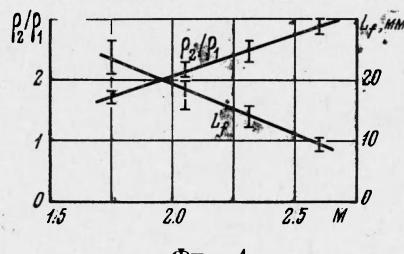
Исследовалась зависимость ширины фронта волны от величины магнитного поля. В присутствии магнитного поля эффективное число Маха равно

$$M_{ef} = \frac{M_0}{(1 + \beta/\gamma)^{1/2}} \quad \left(\beta = \frac{H^2}{8\pi p_0}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \right)$$

Здесь $1/8H^2/\pi$ — магнитное давление, p_0 — давление плазмы; c_p и c_v — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме; M_0 — число Маха потока при $H = 0$.

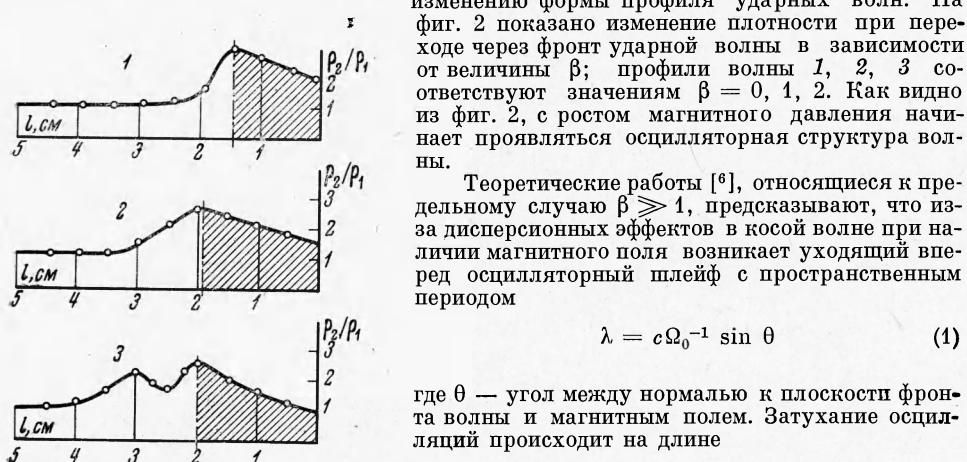
При $\beta < 1$ магнитное поле не оказывает сколько-нибудь заметного влияния как на характер обтекания, так и на структуру ударной волны. Ширина фронта при этом порядка нескольких длин свободного пробега.

При возрастании магнитного поля $\beta \geq 1$ увеличивается ширина скачка, интенсивность волны падает и увеличивается угол между направлением распространения ударной волны и направлением потока (фиг. 1).



Фиг. 1

При $\beta \sim 1$ влияние магнитного поля сводится практически только к изменению эффективного числа Маха потока. Дальнейшее увеличение β приводит к качественному изменению формы профиля ударных волн. На фиг. 2 показано изменение плотности при переходе через фронт ударной волны в зависимости от величины β ; профили волн 1, 2, 3 соответствуют значениям $\beta = 0, 1, 2$. Как видно из фиг. 2, с ростом магнитного давления начинает проявляться осцилляторная структура волн.



Фиг. 2

Теоретические работы [6], относящиеся к предельному случаю $\beta \gg 1$, предсказывают, что из-за дисперсионных эффектов в косой волне при наличии магнитного поля возникает уходящий вперед осцилляторный шлейф с пространственным периодом

$$\lambda = c \Omega_0^{-1} \sin \theta \quad (1)$$

где θ — угол между нормалью к плоскости фронта волны и магнитным полем. Затухание осцилляций происходит на длине

$$\Delta = c \Omega_0^{-1} \omega_{He} \tau_e \sin^2 \theta \quad (2)$$

Можно ожидать, что равенство (1) справедливо при конечных значениях β , больших некоторого критического, когда джоулева диссипация начинает превышать диссипацию из-за вязкости.

В проведенных экспериментах при $\beta \geq 2 \sin \theta \sim 1$, т. е. критерием существования осцилляторного режима будет условие $\omega_{He} \tau_e \gg 1$. При $\beta=2$ (фиг. 2) имеем $\omega_{He} \tau_e = 6$, $\lambda \sim 8 \text{ мм}$. Расчетное значение c / Ω_0 равно 3.0 мм , что по порядку величины удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Авторы благодарят Р. З. Сагдеева за внимание к работе и полезные дискуссии.

Поступила 1 IV 1967

ЛИТЕРАТУРА

- Сагдеев Р. З. О нелинейных движениях разреженной плазмы в магнитном поле. Сб. «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций», Атомиздат, 1958, т. 4, стр. 384.
- Березин Ю. А., Куртумулаев Р. Х., Нестерихин Ю. Е. Бесстолкновительные ударные волны в разреженной плазме. Физика горения и взрыва, 1966, № 1, 1.
- Paul I. W. M., Holmes L. S., Parkinson M. I., Sheffield I. Experimental observations on the structure of collisionless shock waves in a magnetized plasma. Докл. на II Международн. конф. по физике плазмы. Калэм (Англия), 1965.
- Кругляков Э. П., Малиновский В. К., Нестерихин Ю. Е. Параметры плазменных сгустков коаксиального инжектора. Магнитная гидродинамика, 1965, 1, 80.
- Кругляков Э. П., Малиновский В. К., Нестерихин Ю. Е. О возможности определения температуры и плотности нестационарной плазмы методами оптической интерферометрии. Магнитная гидродинамика, 1965, т. 2, 34.
- Кариман В. И. О структуре фронта ударной волны, распространяющейся под углом к магнитному полю в разреженной плазме. Ж. техн. физ., 1963, 33, 959.