

## РАЗВИТИЕ ТОКОВОГО СЛОЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С НУЛЕВОЙ ЛИНИЕЙ

С. И. Сыроватский, А. Г. Франк, А. З. Ходжаев

Исследование возникновения токовых слоев в плазме представляет интерес в связи с проблемами астрофизики (солнечные хромосферные вспышки, шлейф магнитосферы Земли), а также в связи с проблемой ускорения частиц в плазме. Как было показано теоретически [1], токовые слои могут возникать при движении хорошо проводящей замагниченной плазмы в магнитном поле с нулевой линией. Образование токового слоя должно приводить к существенному увеличению плотности магнитной энергии в окрестности нулевой линии [2]. Получение такого токового слоя в лабораторных условиях встречает серьезные трудности из-за развития в плазме неустойчивостей, возникновения аномального сопротивления и невыполнения условия вморооженности магнитного поля в вещество [3]. В настоящем сообщении описывается эксперимент, в котором удалось создать токовый слой с градиентом магнитного поля в нем, значительно увеличенным по сравнению с градиентом начального поля.

Образование токового слоя при двумерном движении плазмы в окрестности нулевой линии магнитного поля исследовалось на лабораторной установке с квазистационарным магнитным полем квадрупольной конфигурации с градиентом до  $5 \cdot 10^3$  э/см. Нулевая линия магнитного поля совмещалась с осью цилиндрической стеклянной вакуумной камеры диаметром 6 см и длиной 80 см. Для создания плазмы в камере, наполненной исследуемым газом до давления  $10^{-1} - 10^{-2}$  тор, возбуждался индукционный  $\theta$ -разряд в квадрупольном поле; плотность образующейся плазмы в рабочих условиях превышала  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. После заполнения камеры плазмой включалось индукционное электрическое поле  $E_z$  напряженностью до 500 в/см, направление которого совпадало с нулевой линией квадрупольного магнитного поля и осью вакуумной камеры. Электрическое поле вызывало движение плазмы, возникновение в ней тока и, следовательно, искажение начального квадрупольного магнитного поля. Добавочное магнитное поле, т. е. поле, связанное с токами в плазме, измерялось магнитными зондами, которые перемещались в плоскости ( $x$ ,  $y$ ) вдоль прямых I или II, пересекавших нулевую линию под углом  $\approx 10^\circ$  к осям  $u$  или  $x$  (см. схемы рис. 1, 2). Измерялись две компоненты магнитного поля в плоскости ( $x$ ,  $y$ ): вдоль направления перемещения магнитного зонда и перпендикулярно к нему.

Пространственное распределение добавочного магнитного поля в различные моменты времени после включения электрического поля  $E_z$  приведено на рис. 1 и 2. Как видно из рисунков, наложение электрического поля на плазму, находящуюся в квадрупольном магнитном поле, вызывает искажение магнитного поля на границах плазмы, ко-

торое затем распространяется в виде сходящейся волны к центру камеры, т. е. к нулевой линии. После того как передний фронт волны подходит к центру, на нулевой линии возникает ток и плотность его увеличивается во времени.

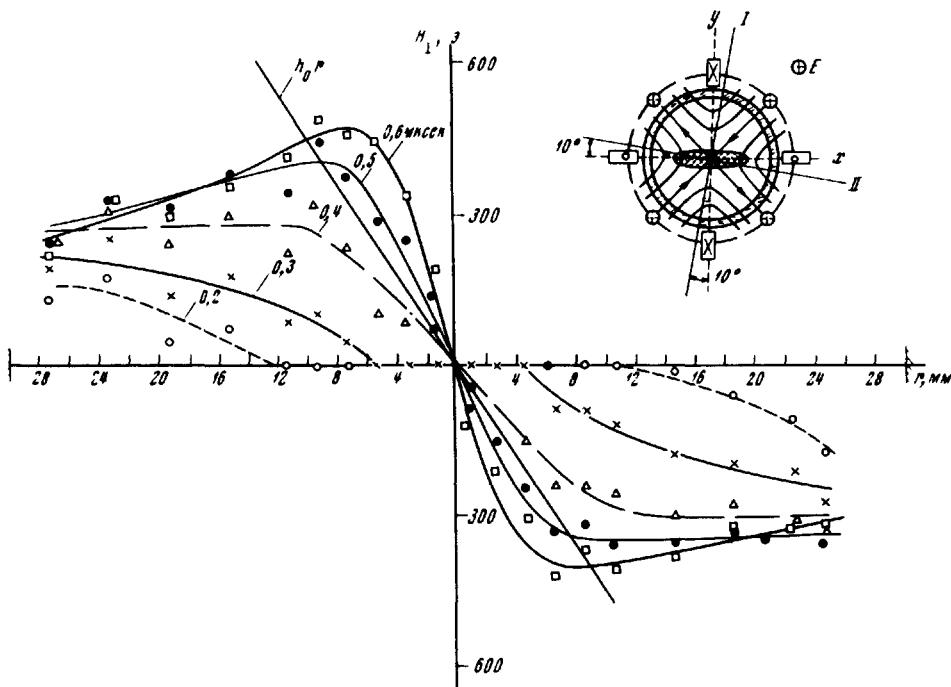


Рис. 1. Искажение квадрупольного магнитного поля в различные моменты времени после наложения на плазму электрического поля  $E_z$ . Магнитный зонд перемещался вдоль линии I, измерялась компонента магнитного поля, перпендикулярная к направлению перемещения зонда. ( $h_0 = 440 \text{ э/см}$ , плазма создавалась при разряде в He,  $E_z = 150 \text{ в/см}$ )

На первой стадии, когда волна распространяется от границ плазмы к центру возмущение магнитного поля мало по сравнению с начальным квадрупольным магнитным полем. Это непосредственно видно из рис. 1, 2, на которых проведена прямая линия  $H = h_0 r$ , характеризующая величину квадрупольного поля. По мере приближения переднего фронта к нулевой линии магнитное поле в волне увеличивается. В радиальной сходящейся волне имеется лишь одна компонента магнитного поля,  $H_\phi$ , перпендикулярная к направлению распространения;  $H_r$ -компоненты в волне отсутствует и появляется лишь после того, как начинается ток на нулевой линии. Измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль линий I и II) показали, что распределение добавочного магнитного поля в волне симметрично относительно поворота на  $\pi/2$ . Скорость распространения фронта волны в каждой точке зависит от локального значения магнитного поля, причем с ростом магнитного поля скорость волны увеличивается. Из рис. 1 видно, что в магнитном поле с начальным градиентом  $h_0 = 440 \text{ э/см}$  волна доходит до центра камеры к моменту  $t \approx 0,4 \text{ мксек}$ , тогда как

в магнитном поле с градиентом  $h_0 = 920 \text{ э/см}$  волна сходится на нулевой линии уже при  $t \lesssim 0,25 \text{ мксек}$  (рис. 2). Кроме того скорость волны у границ плазмы, т. е. в области больших магнитных полей, выше, чем вблизи нулевой линии.

Перечисленные особенности заставляют предположить, что наблюдаемая волна является быстрой магнитозвуковой волной, симметрично сходящейся к нулевой линии квадрупольного магнитного поля. Ее свойства хорошо согласуются с решением, найденным в [4].

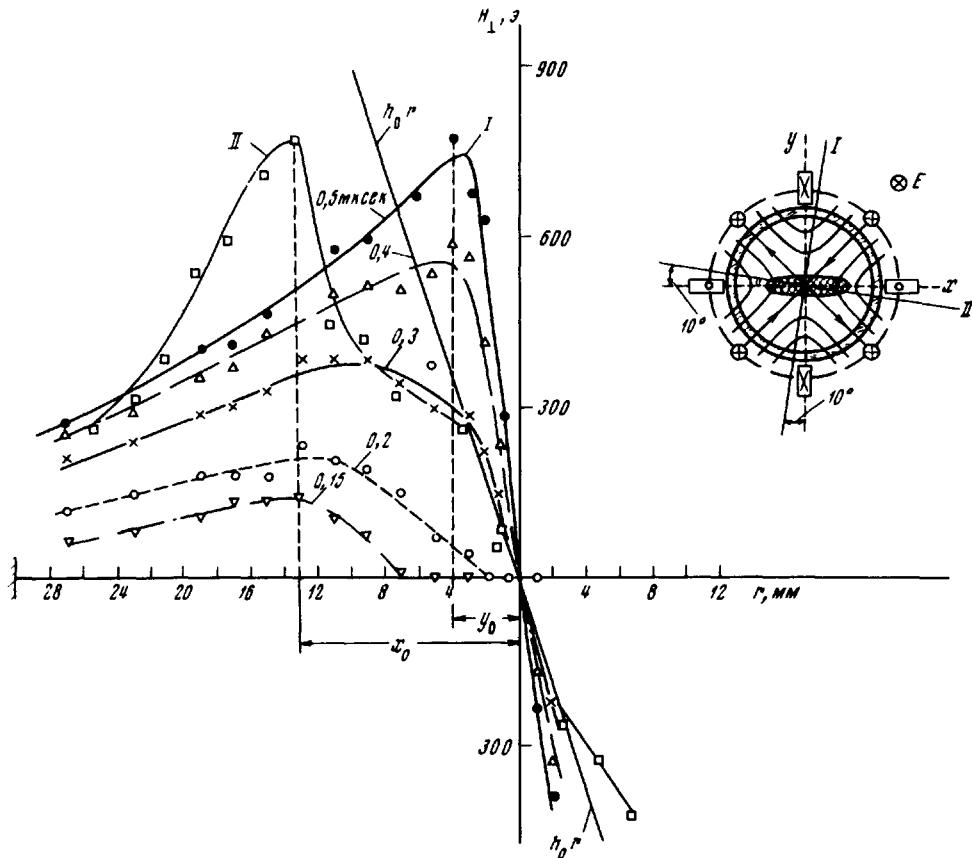


Рис. 2. Искажение квадрупольного магнитного поля в различные моменты времени после наложения на плазму электрического поля  $E$ . Магнитный зонд перемещался либо вдоль линии II (кривая II), либо вдоль линии I (все остальные кривые). Измерялась компонента магнитного поля, перпендикулярная к направлению перемещения зонда ( $h_0 = 920 \text{ э/см}$ , плазма создавалась при разряде в  $\text{He}$ ,  $E_z = 150 \text{ в/см}$ )

После того как фронт волны подходит к центру, начинается вторая стадия процесса – образование токовой области в окрестности нулевой линии магнитного поля. Плотность тока  $I_z$  на нулевой линии быстро растет во времени, что видно по увеличению наклона кривых рис. 1 ( $t \geq 0,4 \text{ мксек}$ ) и рис. 2 ( $t \geq 0,3 \text{ мксек}$ ). Об этом же свидетельствуют и измерения плотности тока, выполненные миниатюрным поясом Роговского. Распределение тока в плоскости  $(x, y)$  уже не симметрично

относительно поворота на  $\pi/2$ , токовая область вытянута вдоль оси  $x$  и сжата по оси  $y$ . На рис. 2 приведены кривые I и II, относящиеся к одному и тому же моменту времени,  $t = 0,5 \text{ мксек}$ , но полученные при перемещении магнитного зонда в двух взаимно перпендикулярных направлениях (I и II соответственно). Из сравнения кривых видно, что размер токовой области вдоль оси  $x$  ( $x_0 = 13 \text{ мм}$ ) в  $\sim 3,3$  раза превышает ее размер по оси  $y$  ( $y_0 = 4 \text{ мм}$ ). Непосредственные измерения распределения тока  $I_z$  в плоскости  $(x, y)$  (рис. 3) наглядно

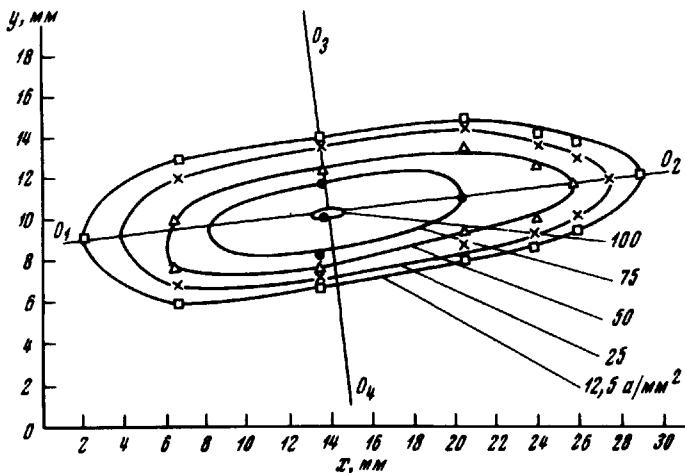


Рис. 3. Распределение плотности тока по сечению камеры в момент  $t = 0,5 \text{ мксек}$  ( $h_0 = 920 \text{ э/см}$ , разряд в  $\text{He}$ ,  $E_z = 250 \text{ в/см}$ )

показывают, что в районе нулевой линии возникает токовый слой. Наблюдается увеличение ширины слоя, т. е. его размера по оси  $x$  во времени. Ширина токового слоя растет также при увеличении электрического поля  $E_z$ . Магнитное поле вблизи токового слоя существенно больше начального квадрупольного поля. Как видно из рис. 2, на расстоянии от нулевой линии  $\approx 4 \text{ мм}$ , добавочное магнитное поле, обусловленное протекающим в плазме током, примерно вдвое превышает начальное поле в той же точке, т. е. на толщине слоя магнитное поле и градиент возрастают в  $\sim 3$  раза.

Как было показано в [3], развитие турбулентности в плазме затрудняет получение токового слоя, существенно изменяющего конфигурацию квадрупольного поля. В описываемом эксперименте плотность плазмы была примерно на порядок выше, чем в [3], что позволило увеличить турбулентную проводимость плазмы до значения  $\sigma_{\text{турб}} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ CGSE}$  и получить токовый слой с полным током в нем  $\approx 10 \text{ ka}$  и значительным увеличением магнитного поля в окрестности слоя.

Таким образом экспериментально показано, что электрическое поле, направленное вдоль нулевой линии магнитного поля, приводит к возникновению токового слоя, разделяющего противоположно направленные магнитные поля. Этот слой возникает в результате кумуляции

сходящейся быстрой магнитозвуковой волны, амплитуда которой нарастает по мере приближения ее фронта к нулевой линии. Развившийся токовый слой существенно искажает исходное магнитное поле и создает значительный избыток магнитной энергии в окрестности нулевой линии.

Авторы благодарны Г.М.Батанову и М.С.Рабиновичу за полезные обсуждения и Е.Ф.Большакову за помощь в эксперименте.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
21 декабря 1971 г.

### Литература

- [ 1] С.И.Сыроватский. ЖЭТФ, 60, 1727, 1971.
  - [ 2] С.И.Сыроватский. Астроном. т., 43, 2, 1966.
  - [ 3] S.I.Syrovatsky, A.G.Frank, A.Z.Khudzhaev. Proc. IV, Europ. Conf. on Contr. Fus., Rome 1970, p.66.
  - [ 4] С.И.Сыроватский. ЖЭТФ, 50, 1133, 1966.
-