

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ПЛАЗМЫ
С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Ю. Ф. Каижин

(Москва)

Рассматривается движение потока плазмы в осесимметричном магнитном поле при магнитном числе Рейнольдса $R_m \approx 10$, параметре магнитогидродинамического взаимодействия $N \approx 1$ и параметре Холла $\beta \approx 1$. Исследуется торможение потока в канале круглого поперечного сечения на входе в магнитное поле за счет образования витков азимутального электрического тока.

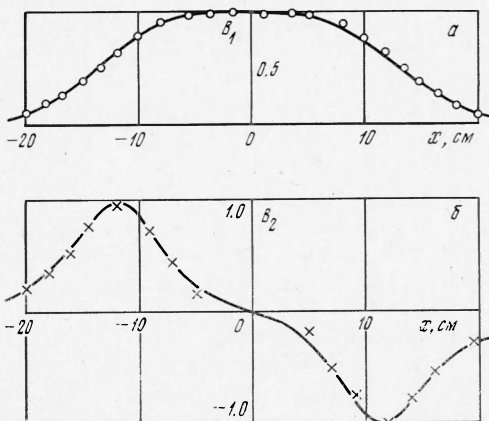
Течение плазмы в канале в осесимметричном магнитном поле при малом параметре МГД взаимодействия и при малом параметре Холла теоретически рассмотрено в работе [1]. В работе [2] исследована динамика движения переднего фронта сгустка плазмы в осесимметричном магнитном поле при больших скоростях потока и показано, что торможение переднего фронта сгустка должно иметь место как в зоне входа, так и выхода из магнитной системы. Исследование течения плазмы в таких полях при низкой плотности плазмы ($n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$) с целью выяснения характера движения потока в осесимметричном магнитном поле описано в работе [3].

Цель данной работы — выяснить особенности течения плазмы в осесимметричном магнитном поле при плотности плазмы $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, магнитном числе Рейнольдса $R_m \approx 10$ и параметре МГД взаимодействия $N \approx 1$; исследовать динамику торможения переднего фронта сгустка плазмы; определить азимутальные токи, индуцируемые ими магнитные поля, а также электрические токи в меридианальной плоскости канала, возникающие вследствие эффекта Холла; сопоставить экспериментальные результаты с имеющимися теоретическими данными.

Исследование взаимодействия плазмы с осесимметричным магнитным полем проводилось на импульсной электроразрядной трубе при диаметре канала 3.5 см. Параметры сгустка плазмы перед входом в магнитное поле по оценкам составляли: температура $\approx 15\ 000^\circ \text{ К}$, электропроводность $\sigma \approx 100 \text{ мо/см}$, скорость переднего фронта сгустка $U = 3 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$, число Маха $M = 5$, концентрация электронов $n_e \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

На фиг. 1 показаны безразмерные экспериментально полученные зависимости осевой B_1 и радиальной B_2 составляющих приложенного магнитного поля в вакууме вдоль оси канала. При изменении поля B_1 от 0.43 до 1,3 тл радиальная составляющая поля B_2 увеличивается от 0.036 до 0.11 тл.

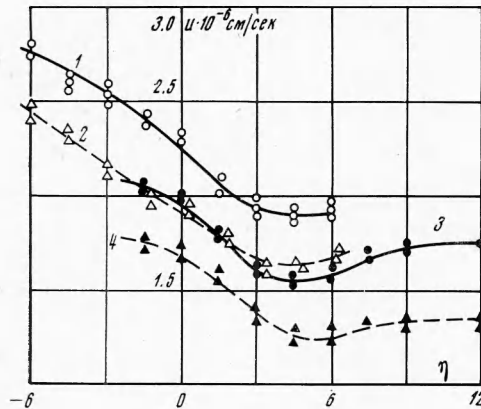
При движении потока плазмы по каналу в осесимметричном магнитном поле в сгустке плазмы наводятся азимутальные токи $j_\theta = \sigma U B_2$, приводя-



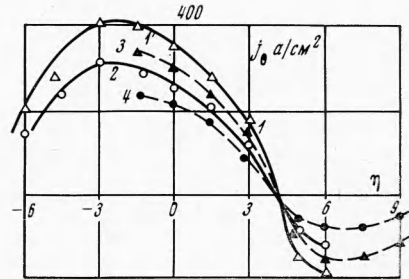
Фиг. 1

щие к образованию объемной тормозящей силы $F = -j_{\theta} B_2$, которая имеет

одно и то же направление как в зоне входа, так и в зоне выхода из магнита, так как с изменением направления радиальной составляю-



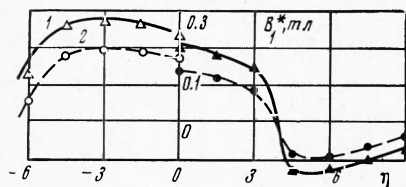
Фиг. 2



Фиг. 3

щей магнитного поля на выходе из магнита меняется и направление азимутального тока. Для упрощения оценок порядка величин формулы записаны без учета эффекта Холла.

Были проведены измерения скорости переднего фронта U в двух сечениях канала $x_1 / 2R_k = 24$ (фиг. 2, кривые 1 и 2) и $x_1 / 2R_k = 33$ (фиг. 2, кривые 3 и 4, где R_k — радиус канала), при различных положениях магнитной системы, которая могла передвигаться вдоль оси канала. На фиг. 2 представлены зависимости $U(\eta)$, где η — отнесенное к $2R_k$ расстояние от



Фиг. 4

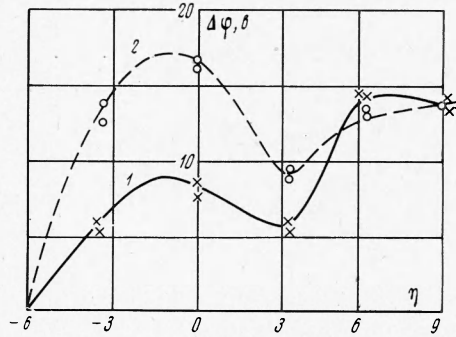
выбранного сечения до центра магнита (знаки плюс и минус соответствуют расположению правее и левее от центра магнита). Необходимо обратить внимание на то, что скорость в канале изменяется не только вследствие действия электромагнитных сил, но и из-за газодинамического трения о стенки канала. Так, при $B_1 = 0$ скорость потока падает на расстоянии 80 см почти в 1,5 раза. Этим эффектом объясняется разрыв зависимости $U(\eta)$ при одном и том же магнитном поле. Если бы на поток оказывали влияние только электромагнитные эффекты, то кривые 1, 3 и 2, 4 (фиг. 2) непрерывно переходили бы друг в друга. Кривые 1 и 3 (фиг. 2) получены при $B_1 = 0.86$ тл, а 2 и 4 — при $B_1 = 1.3$ тл.

Для измерения азимутального тока j_{θ} , индуцируемого в зонах входа и выхода из магнита, применялся малоразмерный пояс Роговского с интегрирующей цепочкой. Одна сторона пояса находилась на оси канала, так что он охватывал весь азимутальный ток на участке канала длиной 5 см. Измерение тока j_{θ} производилось при положении пояса на участке $-6 < \eta < 6$. На фиг. 3 показана зависимость эффективной плотности азимутального тока для разных участков канала относительно центра магнита, которая получена делением величины тока, замеряемого поясом Роговского, на площадь, охватываемую поясом. Кривые 1 и 2 получены при $x_1 / 2R_k = 24$, а 3 и 4 — при $x_1 / 2R_k = 33$, причем кривые 1 и 3 соответствуют $B_1 = 0.86$ тл, а 2 и 4 — $B_1 = 1.3$ тл. Оказалось, что плотность тока на выходе из магнита меньше, чем на входе.

С помощью пояса Роговского определялось распределение j_{θ} в радиальном направлении в центре магнита. Эксперименты показали, что плотность

тока распределяется следующим образом: $j_1 : j_2 : j_3 = 0.15 : 0.65 : 0.2$, где j_1 , j_2 и j_3 — токи, протекающие через участки $(0, \frac{1}{3}R)$, $(\frac{1}{3}R, \frac{2}{3}R)$, $(\frac{2}{3}R, R)$. На среднюю часть радиуса ($\frac{1}{3}R < r < \frac{2}{3}R$) приходится большая часть азимутального тока.

Для измерений осевой составляющей магнитного поля в плазме B^* и индуцированного магнитного поля B_1^* применялся экранированный магнитный зонд. На фиг. 4 показана зависимость индуцированного магнитного поля B_1^* по оси канала для внешнего магнитного поля $B_1 = 1.3$ тл (1) и $B_1 = 0.43$ тл (2) при расстоянии зонда от источника плазмы $x_1 / 2R_k = 24$ для $\eta < 0$ и $x_1 / 2R_k = 33$ для $\eta > 0$. Индуцированное магнитное поле составляет 45–20% приложенного осевого магнитного поля. Это отношение тем меньше, чем приложенное осевое магнитное поле. Как $j_\theta(\eta)$, так и зависимости $B_1^*(\eta)$ показали, что граница между витками азимутального тока находится при $\eta \approx 4$.



Фиг. 5

Магнитное поле B^* в плазме смещено вправо по потоку по отношению к полю B_1 в вакууме, что характерно для потоков с $R_m > 1$. Деформация магнитного поля в плазме тем меньше, чем больше поле B_1 , что связано с нелинейным увеличением азимутального тока с ростом поля B_1 .

Радиальное поле в плазме рассчитывалось с использованием зависимости $B^* = f(x)$. Деформация радиального магнитного поля в плазме уменьшается с ростом приложенного магнитного поля.

При исследовании торможения фронта сгустка плазмы отмечалось, что снижение скорости происходит до $\eta \approx 4$. Следовательно, торможение потока происходит только в переднем витке тока.

Известно, что при наличии эффекта Холла в канале с осесимметричным магнитным полем появляются токи Холла в меридианальной плоскости и разность потенциалов меняется по длине канала [1]. Для исследования этого эффекта экспериментально измерялось распределение разности потенциалов по длине канала в осесимметричном магнитном поле $B_1 = 0.86$ тл с помощью ряда тонких металлических зондов. Измерение разности потенциалов проводилось как на оси (фиг. 5, кривая 1), так и у стенки канала (фиг. 5, кривая 2). Распределение разности потенциалов вдоль канала характеризуется двумя участками нарастания потенциала и одним участком понижения потенциала, что качественно соответствует распределению B_1 вдоль оси x [1]. Как и следует из теории, разность потенциалов между электродами, находящимися вне границ магнитного поля, не зависит от положения электродов относительно стенок канала.

Поступила 19 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Ватажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах. М., «Наука», 1970.
2. Ватажин А. Б. Распространение ударной волны в канале при взаимодействии сжатого в ней газа с неоднородным магнитным полем. ПММ, 1970, т. 34, вып. 4.
3. Азовский Ю. С., Гужовский И. Т., Мазалов Ю. П., Пистряк В. М. Взаимодействие плазменных сгустков с аксиально-симметричным магнитным полем. В сб. «Исследование плазменных сгустков», Киев, «Наукова Думка», 1965.