

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЛАЗМЫ ПО КАНАЛУ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТРУБЫ ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ю. Ф. Кашкин

(Москва)

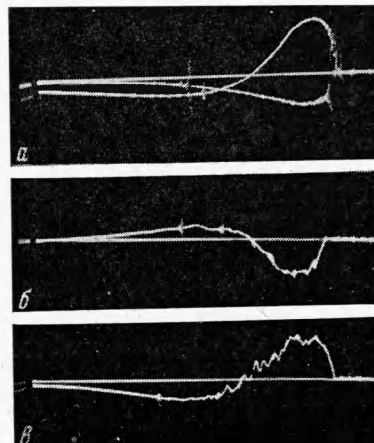
В работе [1] экспериментально обнаружено торможение потока плазмы в неоднородном магнитном поле и показано, что при течении плазмы в линейном прямоугольном канале через неоднородное магнитное поле происходит торможение потока плазмы перед центром магнита в зоне нарастания магнитного поля и за центром магнита в зоне спада магнитного поля. При внешнем поперечном магнитном поле с напряженностью $B \sim 1$ тл в центре магнита поток плазмы с электропроводностью $\sigma \approx 100$ мо/см тормозится с $2.8 \cdot 10^6$ см/сек на входе в магнитное поле до $1 \cdot 10^6$ см/сек за центром магнита. На выходе из магнитного поля имело место резкое ускорение плазмы, которое не было объяснено.

Торможение потока в магнитном поле отмечалось в ряде работ. Например, в работе [2] показано, что в зоне выхода из магнитного поля происходило торможение потока и экспериментальная величина э.д.с. оказалась меньше расчетной на 17%, а в работе [3] разница в э.д.с. достигала 50%. Такая разница между экспериментальными и расчетными величинами э.д.с. объясняется торможением потока плазмы в зоне нарастания магнитного поля вследствие возникновения концевых электрических токов.

Исследование торможения потока плазмы в магнитном поле описано в работе [4], где показана возможность резкого торможения потока при электропроводности плазмы $\sigma \approx 70$ мо/см в магнитном поле $B \approx 0.6$ тл. Плотность возникающего при этом электрического тока в зоне магнитного поля составляла $j = 3200$ а/см².

Ниже исследуются концевые токи и индуцируемые ими магнитные поля.

1. Для определения величины концевых токов в зоне нарастания и спада внешнего магнитного поля применялся малоразмерный пояс Роговского с интегрирующей цепочкой. Пояс представлял собой тороидальную катушку с обратным витком, состоящую из 125 витков медного провода диаметром 0.1 см при диаметре витков 0.5 см, и устанавливался в рабочем прямоугольном канале сечением 3×4 см² так, что плоскость катушки перпендикулярна оси канала и параллельна магнитным силовым линиям внешнего магнитного поля.



Фиг. 1 Осциллограммы тока:

- а) калибровка пояса Роговского (шунтом (осциллограмма с шунтом снизу);
- б) для заднего витка концевой тока, $x = 3$ см;
- в) для переднего витка концевой тока, $x = 8$ см.

Пояс охватывал верхнюю или нижнюю половину поперечного сечения канала, т. е. полностью охватывал концевой электрический ток одного из витков тока в каком-либо сечении канала относительно центра магнита. Большая часть тора пояса Роговского находилась вне поперечного сечения канала и лишь четвертая часть его находилась в потоке в центре поперечного сечения канала.

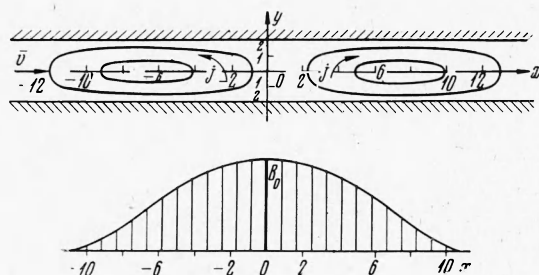
Калибровка интегрирующего пояса Роговского проводилась с помощью малоиндуктивного шунта при токе разряда конденсатора 3000—7000 а. На фиг. 1, а показана осциллограмма калибровки пояса Роговского.

При помощи пояса Роговского были определены границы витков концевой тока. При исследовании витка электрического тока за центром магнита было получено, что передняя граница витка находится на расстоянии 3 см от центра магнита вниз по потоку при изменении приложенного магнитного поля от 0.16 до 0.96 тл, а задняя граница находится на расстоянии 13 см от центра магнита. Таким образом, длина витка концевой тока по оси канала составляет примерно 10 см.

Для одной и той же величины внешнего магнитного поля одинаковые сигналы с пояса Роговского получаются при расстоянии от центра магнита более 5 см, но не более 10 см. При расстоянии меньшем 3 см и большем 13 см сигналы с пояса Роговского отсут-

ствуют. Таким образом, пояс Роговского полностью охватывал концевой электрический ток при $10 \gg x > 5$ см, где x — расстояние от центра магнита. На фиг. 2 показана картина расположения витков концевой тока в канале относительно центра магнитного поля. Задний виток концевой тока выходит за пределы магнитного поля почти на 3 см.

Изучение следов на боковых прозрачных стенках канала после эксперимента показало, что границы витков концевой тока находятся на расстоянии около 0.5 см от верхней и нижней стенок канала.

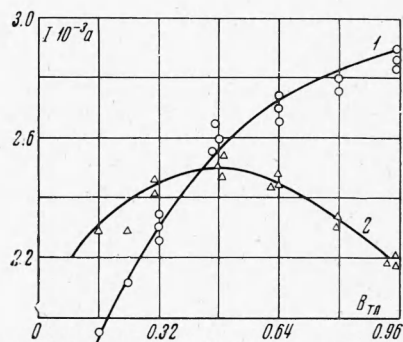


Фиг. 2 Схема расположения витков концевой тока по оси канала относительно центра поперечного магнитного поля B_0

Аналогичные измерения проводились и для витка концевой тока до центра магнита, т. е. при $x < 0$. Передняя граница витка электрического тока находится при $x = -11$ см, а задняя граница — при $x = -1$ см, т. е. длина переднего витка концевой тока по оси канала, как и заднего витка, составляет около 10 см. Одинаковые сигналы с пояса Роговского получены при $-4 > x > -9$ см. Сигналы с пояса Роговского в переднем витке тока отличались от сигнала в заднем витке как по знаку, так и в большинстве случаев по величине. Разная полярность сигналов указывает на разное направление векторов плотности концевой тока.

На фиг. 2 показано, что витки тока расположены в канале несимметрично относительно центра магнита, что можно объяснить лишь «деформацией» магнитных силовых линий, так как магнитное число Рейнольдса в потоке достигает 10. Участок канала, свободный от концевых токов, занимает область $-1 < x < 3$ см. При изучении размеров витков пояса Роговского занимал нижнюю половину поперечного сечения канала, контрольные измерения для верхней половины поперечного сечения канала дала аналогичные результаты.

Фиг. 3. Зависимость величины концевой тока от поперечного магнитного поля;
1) передний виток концевой тока;
2) задний виток концевой тока



Зависимость величины концевых токов от величины внешнего приложенного магнитного поля изучалась поясом Роговского только в двух точках канала на расстоянии 8 см по обе стороны от центра приложенного магнитного поля ($x = \pm 8$ см), т. е. примерно в центре переднего и заднего витков концевой тока. Величина внешнего магнитного поля изменялась от 0.24 до 0.96 тл. На фиг. 3 показана зависимость концевой тока в обоих витках от величины внешнего магнитного поля. Для переднего витка концевой тока характерен некоторый рост электрического тока с ростом магнитного поля. При увеличении магнитного поля в четыре раза величина концевой тока увеличивается с 1900 до 2900 а, т. е. примерно на 50%.

Для заднего витка концевой тока характерен максимум электрического тока, равный 2500 а, при $B \approx 0.48$ тл; при увеличении магнитного поля более 0.48 тл концевой ток уменьшается, что объясняется резким торможением потока в переднем витке концевой тока.

2. Для исследования собственных магнитных полей концевых токов в область расположения витков концевой тока вводился магнитный зонд в виде однослойной катушки диаметром 0.5 см и состоящий из 50 витков провода диаметром 0.015 см. Сигнал с катушки интегрировался RC-цепочкой и подавался на вход осциллографа ОК-17М.

Из-за сильных электрических полей в плазме катушка помещалась в заземленный электрический экран в виде цилиндра из немагнитной стали толщиной 0.01 см с разрезами.

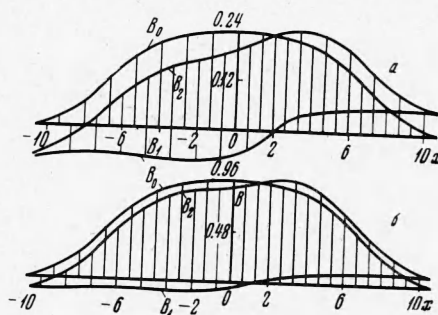
При прохождении сгустка плазмы через магнитное поле катушка фиксирует появление собственного магнитного поля концевых токов в виде изменения формы осциллограммы в области максимума внешнего магнитного поля. На осциллограмму внешнего магнитного поля накладывается осциллограмма собственного магнитного поля, знак которой зависит от положения катушки относительно центра магнита. Для заднего витка концевых токов знаки осциллограмм совпадают, а для переднего витка — противоположны.

Для исследования распределения собственного магнитного поля B_1 вдоль оси канала магнитный зонд помещался на расстоянии до 10 см по обе стороны от центра магнита. На фиг. 4 показано распределение собственного магнитного поля B_1 и магнитного поля B_2 в плазме для внешнего магнитного поля 0.24 и 0.96 тл. Собственное магнитное поле переднего витка тока простирается за центр магнита примерно на 2 см.

При одной и той же величине внешнего поля B_0 величина поля B_1 в переднем витке тока в большинстве случаев больше, чем в заднем витке тока. Для переднего витка тока характерен рост поля B_1 с ростом поля B_0 . При увеличении внешнего магнитного поля с 0.24 до 0.96 тл собственное магнитное поле изменяется с 0.07 до 0.104 тл, т. е. не более 50%, что соответствует экспериментально определенному росту концевых токов.

Фиг. 4 Распределение поперечного магнитного поля по оси канала:

- а) $B_0 = 0.24$ тл,
б) $B_0 = 0.96$ тл



Для заднего витка концевых токов характерен максимум собственного магнитного поля при внешнем магнитном поле $B_0 = 0.48$ тл, который равен 0.08 тл. При $B_0 = 0.24$ и 0.96 тл собственные магнитные поля B_1 для заднего витка тока составляют 0.055 тл. Картина распределения собственных магнитных полей по оси канала аналогична распределению концевых токов в канале.

Как и следовало ожидать, за счет индуцированных полей концевых токов происходит смещение максимума магнитного поля в плазме B_2 вправо по потоку относительно максимума приложенного магнитного поля B_0 , составляющее примерно 2 см. Если в сечении $x = \pm 10$ см внешнее магнитное поле равно нулю, то магнитное поле в плазме в сечении $x = -10$ см $B_2 < 0$, а в сечении $x = 10$ см $B_2 > 0$.

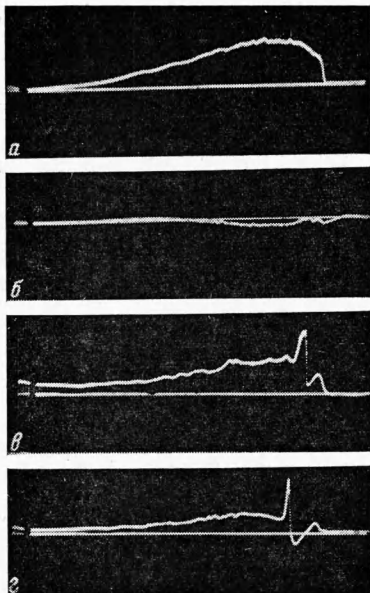
Таким образом, отмеченная выше несимметрия концевых токов в канале относительно центра внешнего магнитного поля B_0 связана со смещением поперечного магнитного поля в плазме B_2 вниз по потоку. Концевые токи оказываются симметричными относительно центра магнитного поля в плазме B_2 .

Расчет собственных магнитных полей концевых токов проводился для изотропной плазмы, движущейся в канале с непроводящими стенками, в присутствии внешнего магнитного поля, имеющего форму ступеньки. Оказалось, что для магнитного числа Рейнольдса $R_m \approx 10$ собственное магнитное поле достигает 50% внешнего приложенного магнитного поля. Экспериментально получено, что собственное магнитное поле B_1 достигает 30% приложенного поля B_0 при $B_0 = 0.24$ тл. При $B_0 = 0.96$ тл $B_1 = 0.11 B_0$, т. е. с ростом приложенного поля степень нарастания собственного магнитного поля уменьшается. Следует учитывать, что магнитное поле в действительности не имеет формы ступеньки и плазма анизотропна, а также внешнее магнитное поле B_0 имеет указанные значения лишь в центре магнита.

3. При изучении скорости переднего фронта сгустка от величины поперечного магнитного поля и положения фронта относительно центра магнита с помощью зондов отмечалось в [1], что за центром магнита при $x > 4$ см передний фронт сгустка начинает ускоряться. Ускорение переднего фронта сгустка превышало степень торможения сгустка в одном и том же заднем витке концевых токов, хотя ускорение происходило при меньших значениях внешнего магнитного поля, так как этот участок находился дальше от центра неоднородного магнитного поля.

В работе [1] было высказано предположение, что ускоряется не весь сгусток плазмы в такой степени, а лишь его малая часть в области переднего фронта, а ускорение основной части сгустка, хотя и имеет место, но в меньшей степени.

Рассмотрение движения переднего фронта при $x > 0$ показывает, что когда передний фронт сгустка попадает в зону спада внешнего магнитного поля, то формируется задний виток концевой тока, при этом некоторая часть сгустка вблизи переднего фронта при формировании концевой тока успевает попасть в зону ускорения, не претерпев торможения, а основная часть потока тормозится сформировавшимся витком тока, т. е. при взаимодействии концевой тока передней по потоку половины витка концевой тока с внешним магнитным полем, и только после этого попадает в зону ускорения за центром заднего витка. Происходит отрыв небольшой части сгустка вблизи переднего фронта, которая не испытала торможения.



С помощью зондов нельзя определить скорость плазмы внутри сгустка, так как они реагируют лишь на фронт проводимости плазмы. Для выяснения явления проводилось исследование э.д.с. при расстоянии между цилиндрическими электродами, равном 2 см, которые устанавливались в разных сечениях канала относительно центра магнита. Электроды устанавливались последовательно в сечениях от $x = -10$ см до $x = 10$ см с интервалом в 2 см.

Фиг. 5. Осциллограммы э.д.с. между электродами при $h = 2$ см, $B_0 = 0,96$ тл для разных расстояний электродов (x) от центра магнита:

- а) $5 > x > -8$ см, б) $x = -10$ см,
в) $x = 8$ см, г) $x = 10$ см.

На фиг. 5,а показана осциллограмма э.д.с. при $4 \geq x > -8$ см. При $x > 4$ см меняется вид осциллограммы (фиг. 5,г), впереди появляется пик э.д.с., почти линейно зависящий от величины магнитного поля и по времени равный 2—4 мксек, т. е. длина впереди идущего сгустка составляет 5—10 см в зависимости от магнитного поля и расстояния от центра магнита.

Осциллограммы э.д.с. при $x > 4$ см подтвердили предположение об ускорении части сгустка в области переднего фронта за центром магнита. Скорость потока, рассчитанная по пиковым значениям э.д.с. (фиг. 5,г), довольно хорошо совпадает с величиной скорости, полученной зондовым методом при $x > 4$ см, т. е. действительно, зонды фиксируют лишь скорость переднего фронта сгустка, которая не всегда совпадает со скоростью основного потока.

Скорость, рассчитанная по э.д.с. при $x < 4$ см, по осциллограммам в пределах погрешности измерения совпадает со скоростью, замеренной зондами. Измерение э.д.с. по осциллограммам производилось примерно через 10 мксек после появления сигнала, т. е. на расстоянии 20—30 см от переднего фронта. Следует заметить, что длительность течения сгустка зависит от величины магнитного поля и, например, при $B_0 \approx 1$ тл длительность течения плазмы составляет около 70 мксек, тогда как при отсутствии магнитного поля она составляет 150 мксек. Измерение скорости по э.д.с. для разных моментов времени показало, что почти половина сгустка плазмы имеет постоянную скорость, равную скорости переднего фронта плазмы.

Для определения скорости потока при $x > 4$ см проводилось измерение э.д.с. по осциллограммам за пиком э.д.с. через 10 мксек после появления сигнала, как и раньше при $x < 4$ см. Расчет, проведенный для разных магнитных полей и расстояний от центра магнита, показал, что поток при $x > 4$ см ускоряется примерно на 20% в сечении $x = 10$ см, что значительно меньше ускорения части сгустка вблизи переднего фронта, при этом минимум скорости основного потока плазмы оказывается при $x = 6$ см, а не при $x = 4$ см, как у переднего фронта.

4. Для изучения картины течения плазмы в неоднородном магнитном поле производилась высокоскоростная съемка течения в канале с помощью скоростного фоторегистратора СФР. Наиболее наглядной получается картина течения при фотографировании через верхнюю прозрачную стенку канала, т. е. через зазор между катушками магнита. Для этого часть верхней стенки канала длиной 20 см заменялась прозрачной пластиной толщиной 0,1 см. Съемка проводилась при разных магнитных полях.

На СФР-граммах видны две темные зоны, т. е. участки, где происходит торможение потока, один перед центром магнита длиной около 5 см, который не доходит до

центра магнита примерно на 2 см, а второй участок начинается точно в центре магнита и простирается на 4—5 см. Ширина темных зон равна ширине канала.

На СФР-граммах нет следов ударных волн, и, вероятно, торможение сверхзвукового потока происходит постепенно без ударных волн. Первая темная зона на СФР-граммах занимает положение от центра переднего витка концевых токов до его конца, а вторая зона начинается раньше, чем начинается задний виток концевых токов.

При сопоставлении зон торможения на СФР-граммах с зависимостью скорости переднего фронта [1] видно, что передняя темная зона совпадает с зоной торможения потока ($-3 > x > -8$ см), а вторая зона совпадает с зоной торможения ($5 > x > 0$). Отпечатки на боковых стенках канала ($-8 \leq x \leq 5$ см) точно совпадают с границами темных зон на СФР-граммах.

5. Исследование взаимодействия сгустка плазмы с неоднородным магнитным полем при $R_m > 1$ и анизотропной плазме в прямоугольном изолированном канале показало, что при течении высокоскоростного потока полностью ионизированной плазмы в зонах неоднородности магнитного поля за счет утечки зарядов формируются две петли концевых токов, величина электрического тока в которых зависит от скорости потока, его электропроводности и приложенного магнитного поля.

Анизотропия проводимости плазмы влияет на электропроводность плазмы, резко подавляя рост концевых токов с ростом внешнего магнитного поля.

Магнитные поля, индуцированные концевыми токами, направлены так, что в зоне нарастания внешнего магнитного поля уменьшают поперечное магнитное поле в плазме, т. е. индуцированное магнитное поле противоположно по знаку внешнему магнитному полю, а в зоне спада поля B_0 увеличивают магнитное поле в плазме, т. е. индуцированное поле совпадает по знаку с внешним магнитным полем. Происходит смещение центра магнитного поля в плазме вниз по потоку, характерное для $R_m > 1$.

Особенно заметно влияние собственного магнитного поля концевых токов при малых внешних магнитных полях, когда $B_1 = 0.3 B_0$, так как с ростом приложенного магнитного поля собственные магнитные поля концевых токов меняются слабо вследствие анизотропии проводимости плазмы.

При взаимодействии концевых токов с поперечным магнитным полем в плазме возникает ponderomotive сила $\mathbf{F} = c^{-1} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$, которая тормозит поток перед центром магнита и в передней половине витка за центром магнита и ускоряет поток во второй половине заднего витка тока. Торможение сверхзвукового потока происходит плавно без образования ударных волн.

В зоне спада магнитного поля имеет место разделение потока с появлением фог-сгустка, отделившегося от основного потока плазмы вблизи переднего фронта, длина которого не превышает 5% длины всего сгустка плазмы. Витки концевых токов несимметричны относительно центра внешнего магнитного поля, но симметричны центру магнитного поля в плазме.

Экспериментальные значения концевых токов и индуцированные ими магнитные поля более близки к расчетным при малых приложенных магнитных полях, а для $B_0 \geq 0.1$ тл необходимо учитывать эффект Холла.

Скоростная съемка, как и зондовые измерения, показала существование двух зон торможения потока. Следовательно, при расчете э.д.с. нужно знать скорость потока в области электродов с учетом торможения потока в зоне нарастания магнитного поля, величину магнитного поля в плазме с учетом индуцированных полей и профиль скорости с учетом пограничного слоя.

В заключение автор благодарит Г. М. Бам-Зеликовича и А. Б. Ватажина за помощь и обсуждение данной работы.

Поступила 1 VII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. К а ш к и н Ю. Ф. О торможении сгустка плазмы в неоднородном магнитном поле ПМТФ, 1969, № 3.
2. L e o n a r d R. L., F a y J. A., Experiments on a quasisteady $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ -accelerator. AIAA Journal, 1965, vol. 3, No. 1.
3. В а л е н с и Ж., И н г л е с а к и с Г., П а р р о П. Исследование влияния сильного поперечного магнитного поля на сверхзвуковой поток ионизированного газа. В сб.: «Низкотемпературная плазма», М., «Мир», 1967.
4. Д е р е в я н к о В. А., З а к л я з ь м и н с к и й Л. А., К а ц н е л ь с о н С. С., К е р к и с А. Ю., Л е б е д е в Е. Ф., Т р ы н к и н а Н. А., Ф о м и ч е в В. П., Исследование нестационарного взаимодействия сгустка проводящего газа с заданным электрическим контуром. ПМТФ, 1968, № 2.