

ВЛИЯНИЕ НЕПРОВОДЯЩИХ ПЕРЕГОРОДОК НА КОНЦЕВЫЕ ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ

Ю. Ф. Кашкин

(Москва)

Исследовано влияние условий замыкания индуцированных электрических токов на суммарные электрические и динамические характеристики движения сгустка плазмы по прямоугольному каналу электроразрядной трубы в неоднородном поперечном магнитном поле. Показано, что введение в канал достаточно длинной тонкой непроводящей перегородки в зону концевых токов уменьшает электрический ток примерно в два раза. Для предотвращения перетекания осевого электрического тока вокруг перегородки необходимо, чтобы ее длина была не менее 6 калибров канала.

Экспериментальное исследование движения сгустка плазмы через неоднородное поперечное магнитное поле в прямоугольном канале проведено в работе [1], где, как и в работе [2], показано влияние неоднородности магнитного поля в зоне входа в магнит на скорость потока плазмы. В работе [3] приведены результаты экспериментального исследования концевых электрических токов, индуцируемых в зонах входа и выхода из магнита и собственных магнитных полей концевых токов. Показано, что на величину концевых токов и магнитных полей влияет анизотропия проводимости плазмы и торможение потока, а также приведено сравнение с расчетными значениями, полученными по формулам работы [4].

Для борьбы с концевыми эффектами в зоны концевых токов следует вводить непроводящие тонкие перегородки [5]. Аналитическое исследование влияния перегородок, вводимых в канал МГД-генератора и расположенных вне электродной зоны, в предположении их бесконечной длины изучалось в [6], а конечной длины — в [7]. В статье [7] было показано, что введение перегородки становится эффективным, если ее длина достигает 10 калибров канала. В работах [1, 3] остались невыясненными вопросы влияния условий замыкания электрического тока на суммарные характеристики и динамику сгустка плазмы.

1. Экспериментальные исследования выполнялись в прямоугольном канале электроразрядной трубы сечением $3 \times 4 \text{ см}^2$ на расстоянии порядка 1 м от разрядной камеры. Внешнее неоднородное магнитное поле создавалось с помощью катушек в виде пары Гельмгольца, которые с двух сторон охватывали канал. Предварительные экспериментальные и расчетные оценки характеристик сгустка плазмы перед входом в магнитное поле, которые будем снабжать нижним индексом «плюс», дали следующие приближенные значения параметров: концентрация заряженных частиц $n_{e+} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, температура $T_+ \approx 18\,000^\circ \text{ К}$, скорость потока плазмы $u_+ = 2.8 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$, число M потока ~ 5 , электропроводность плазмы $\sigma_+ \approx 100 \text{ мО/см}$, время движения сгустка плазмы через магнитное поле $t \approx 100 \text{ мксек}$. Рабочим газом является аргон, который в указанных условиях предполагается полностью ионизированным.

По значениям этих величин вычислялись безразмерные параметры — магнитное число Рейнольдса R_m , параметр магнитогидродинамического взаимодействия N и параметр Холла β согласно формулам

$$R_m = \frac{4\pi\sigma_+u_+h}{c^2}, \quad N = \frac{\sigma_+B_0^2h}{c^2\rho_+u_+}, \quad \beta = \frac{B_0\sigma_+}{cen_{e+}}$$

($B_0 \approx 1 \text{ тл}$, $h = 4 \text{ см}$ — высота канала).

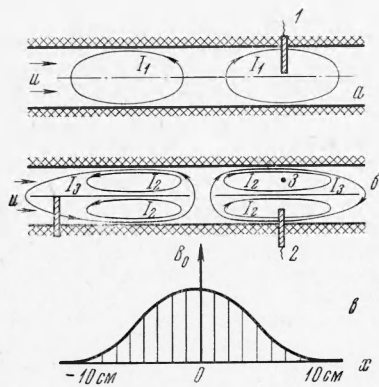
Здесь ρ_+ — плотность плазмы, e — заряд электрона. В результате были получены значения $R_m \approx 14$, $N \approx 2$, $\beta \approx 1$.

2. Исследование влияния магнитного поля на течение плазмы проводилось в канале из непроводящего материала высотой 4 см. На фиг. 1 приведены схемы канала (a — без перегородок, b — с перегородками, c — форма внешнего магнитного поля и картины индуцированных концевых токов в обоих типах каналов). В статье [3] было показано, что длина переднего или заднего витков концевого тока в канале без перегородок составляет примерно 2.5 калибра канала ($\sim 10 \text{ см}$). Передний виток тока заканчивается на расстоянии немного менее калибра от центра магнита.

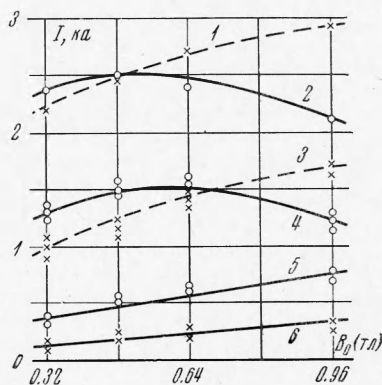
Если длина непроводящей перегородки меньше длины витка концевого тока по оси канала, то ее влияние на концевой ток относительно невелико. При отсутствии поперечного магнитного поля эксперимент и расчет показали, что при установке в канал перегородки длиной 5 калибров (20 см) с острой передней кромкой скорость потока плазмы за счет образования ударной волны на передней кромке пластины и нарастания пограничного слоя по длине перегородки уменьшается на 5—7%. Для полностью ионизованного аргона в указанных выше условиях приближенная расчетная

толщина турбулентного пограничного слоя δ_t составляет несколько миллиметров ($\delta_t \approx 0.37xR_x^{-0.2}$, $x = 20$ см — длина пластины), а для ламинарного пограничного слоя δ_l — доли миллиметра ($\delta_l \approx 5(\eta x/u_\rho)^{0.5}$), где η — коэффициент динамической вязкости. Экспериментальная толщина пограничного слоя, определенная по измерениям индуцированной разности потенциалов, а также с помощью зондов (при измерениях вольт-амперных характеристик) на конце пластины достигает 0.1 см.

При длине перегородки более 2.5 калибров резко меняется форма витка концевых токов; в верхнем и нижнем подканалах появляются витки концевых токов I_2 (фиг. 1, б), а также до определенной длины перегородки существует концевой электрический ток I_3 , охватывающий перегородку.



Фиг. 1



Фиг. 2

Для измерения концевых токов был использован, как и в работе [3], малоразмерный пояс Роговского с интегрирующей цепочкой с диаметром витка 0.3 см. Пояс устанавливался в верхнем или нижнем подканалах (2 на фиг. 1, б) так, что часть его, находящаяся внутри канала, занимала центральную часть поперечного сечения. Плоскость пояса перпендикулярна оси канала и находилась на расстоянии от 1 до 2 калибров канала относительно центра магнитного поля B_0 . В подканал, где не было пояса Роговского, для сохранения равенства площадей проходных сечений подканалов вводился металлический стержень диаметром 0.3 см в той же плоскости, что и пояс Роговского (3 на фиг. 1, б).

На фиг. 2 показана зависимость концевых индуцированных токов для обоих витков концевых токов от величины поперечного магнитного поля при отсутствии перегородки в канале (1, 2) и с перегородкой (3, 4). Следует заметить, что при наличии перегородки замеряемая поясом Роговского величина тока I_2 включает в себя ток I_3 , охватывающий перегородку. Зависимости 1 и 3 относятся к переднему витку концевых токов, а 2 и 4 — к заднему витку тока. Зависимость концевых токов I_1 как переднего, так и заднего витков тока по форме такая же, как зависимость тока I_1 от магнитного поля для канала без перегородок. Электрический ток I_2 замерялся в канале при длине перегородки равной 5 калибрам. Перегородка находилась или на входе в магнитное поле, когда ее задняя кромка доходила до центра магнита ($x = 0$), или на выходе из магнита, когда ее передняя кромка находилась в центре B_0 . Как в канале с перегородкой, так и без нее концевой электрический ток увеличивается с ростом магнитного поля в переднем витке и имеет максимум при $B_0 \approx 0.5$ тл для заднего витка тока.

При постановке в канал непроводящей перегородки длиной 5 калибров величина концевых токов в переднем витке падает до 0.47—0.55 тока в канале без перегородки, а величина тока в заднем витке — до 0.58—0.6 при разных магнитных полях. Для определения приведенных выше отношений использовался ток I_2 только одного из подканалов.

Для определения влияния длины перегородки на обтекающий ее ток I_3 проводилось измерение электрического тока при длине перегородки от 4 до 6 калибров канала. Пояс Роговского устанавливался в канале на расстоянии 3 калибров до центра магнита (1 на фиг. 1, б) так, что охватывал полностью верхнюю или нижнюю половину канала за счет разделения перегородки на две части.

На фиг. 2 (5, 6) показаны зависимости электрического тока от магнитного поля B_0 для перегородок длиной 4 и 5 калибров соответственно, устанавливавшихся в зоне

переднего витка тока. При длине перегородки в 4 калибра ток I_3 (5) достигает 800 а, а при длине 5 калибров (6) — 350 а при $B_0 \approx 1$ тл. При длине перегородки 6 калибров сигналы с пояса Роговского отсутствовали при увеличении магнитного поля до 1 тл, т. е. величина тока была очень мала и, вероятно, не превышала 10а. Таким образом, при $B_0 \leq 1$ тл обтекающие перегородку электрические токи практически равны нулю, если длина перегородки оказывается не менее 6 калибров канала. Следует заметить, что для определения истинной величины электрического тока в витке над или под перегородкой при длине менее 6 калибров нужно из величины тока I_2 на фиг. 2 (3, 4) вычесть величину I_3 .

Для оценки влияния перегородки на скорость потока за счет изменения величины концевой тока, а следовательно, и тормозящей силы проводилось измерение скорости переднего фронта сгустка плазмы на расстоянии 1 калибра за центром магнита с помощью двух пар зондов, как в работе [1]. Было получено, что при $B_0 \approx 1$ тл скорость переднего фронта сгустка плазмы увеличивается при постановке перегородки длиной 5 калибров на входе в магнит с $1.1 \cdot 10^6$ до $1.7 \cdot 10^6$ см/сек вследствие уменьшения концевой тока в переднем витке с 2800 до 1600 а. Степень изменения скорости не совпадает со степенью изменения концевой тока. Следует учесть, что измерение скорости проводилось в сечении, где скорость потока в магнитном поле минимальна, т. е. когда передний фронт сгустка уже прошел зону торможения переднего и заднего витков тока. В экспериментах замечено, что при уменьшении электрического тока переднего витка за счет перегородки на входе в магнит растет концевой электрический ток в заднем витке электрического тока и возрастает тормозящая сила в заднем витке.

Попытаемся объяснить полученные результаты, исходя из простейших теоретических представлений. Используя уравнения, описывающие распределение электрических параметров в канале, можно показать [8], что при фиксированной геометрии внешнего магнитного поля при наличии участков быстрого его нарастания и спада, для каналов без перегородок справедливо приближенное соотношение

$$\frac{I}{c^{-1} a \sigma u B_0 h} = C_0 f(R_m, \beta), \quad C_0 = \text{const} \left(R_m = \frac{4\pi \sigma u h}{c^2}, \beta = \frac{B_0 \sigma}{c n_e} \right) \quad (1)$$

Здесь I — ток в витке, σ , u , n_e — средние значения электропроводности, скорости и концентрации заряженных частиц в области взаимодействия плазмы с магнитным полем, а a — размер канала в направлении магнитного поля, характерная величина которого равна B_0 .

Функция f , представляющая собой безразмерную джоулеву диссипацию в канале, подробно изучена в работе [8].

Если же рассмотреть распределение электрических параметров в канале высотой $1/2 h$, то при той же геометрии внешнего магнитного поля циркулирующий в витке электрический ток будет равен

$$\frac{I}{c^{-1} a \sigma_{0.5} u_{0.5} B_0^{1/2} h} \approx \frac{C_0}{K} f(R_{m,0.5}, \beta_{0.5}) \quad (2)$$

Здесь нижний индекс 0.5 соответствует параметрам в канале высотой $1/2 h$, функция f и величина C_0 те же, что и в формуле (1), число Рейнольдса $R_{m,0.5}$ рассчитывается по величинам $\sigma_{0.5}$, $u_{0.5}$ и $1/2 h$, а параметр Холла — по $\sigma_{0.5}$ и $n_{e,0.5}$. Величина B_0 для двух рассматриваемых случаев одинакова.

Параметр K учитывает скорость спадания (или нарастания) заданного магнитного поля в рассматриваемых каналах (по отношению к характерным размерам h и $1/2 h$). В том случае, если поле спадает очень быстро (ступенчатое магнитное поле), то K близко к единице. При более плавном спадании магнитного поля величина $K \approx 1.5$.

Введение перегородки в канал до центра магнита, где электрический ток практически равен нулю, в первом приближении эквивалентно разбиению канала в верхней по потоку зоне магнитного поля на два подканала. Поэтому для расчета токов можно использовать формулы (1) и (2). Отношение тока в витке I в канале без перегородки к току в витке $I_{0.5}$ в канале с перегородкой выражается соотношением

$$\frac{I}{I_{0.5}} = \frac{\sigma}{\sigma_{0.5}} \frac{u}{u_{0.5}} \frac{2K}{1} \frac{f(R_{m,0.5}, \beta_{0.5})}{f(R_m, \beta)} \quad (3)$$

Оценим отношение величин, стоящих в правой части этого равенства. Так как проводимость в потоке полностью ионизованного газа на незначительных длинах изменяется не очень сильно (во всяком случае, ее изменение выражено меньше изменения скорости), то можно принять

$$\sigma_{0.5} / \sigma \approx 1$$

Отношение соответствующих параметров Холла и магнитных чисел Рейнольдса равно

$$\frac{\beta_{0.5}}{\beta} = \frac{\sigma_{0.5}}{\sigma} \frac{n_e}{n_{e,0.5}} = \frac{\sigma_{0.5}}{\sigma} \frac{u_{0.5}}{u} \approx \frac{u_{0.5}}{u}$$

$$\frac{R_{m,0.5}}{R_m} = \frac{\sigma_{0.5}}{\sigma} \frac{u_{0.5}}{u} \frac{1}{2} \approx \frac{1}{2} \frac{u_{0.5}}{u}$$

Рассмотрим данные экспериментов, когда $B_0 \approx 1$ тл. В этом случае

$$u_{0.5}/u \approx 3/2, \quad R_{m,0.5}/R_m \approx 3/4, \quad \beta_{0.5}/\beta \approx 3/2$$

Используя данные работы [8], имеем

$$f(R_m, \beta) \approx f(3/4 R_m, 3/2 \beta)$$

если $R_m \approx 10$, $\beta \approx 1$. Поэтому из (3) получим $I_{0.5}/I \approx 1/2$.

Это соответствует экспериментально измеренному отношению токов.

Указанные на фиг. 2 зависимости изменения тока в заднем витке при увеличении B_0 (как при наличии перегородки, так и без нее) можно объяснить очень сильным суммарным уменьшением скорости в двух витках концевых токов.

3. Если верхнюю и нижнюю непроводящие стенки канала заменить сплошными медными полированными электродами так, чтобы границы их находились достаточно далеко за границами внешнего магнитного поля, то после экспериментов на полированных поверхностях остаются следы перетекания электрического тока из плазмы в металл в виде катодных и анодных пятен. Верхний и нижний электроды между собой не связаны. Концы электродов находились при $X = \pm 15$ см (~ 4 калибра) относительно центра магнита, а границы магнитного поля при $X = \pm 10$ см (2.5 калибра).

На электродах, расположенных до центра магнитного поля, видны пятна при $-4 < X < 0$ и $-14 < X < -11$ см как на верхней, так и на нижней металлических стенках. Вблизи центра магнита на верхнем электроде видны следы катодных пятен малого размера, а на нижнем электроде — большие темные анодные пятна. В зоне, удаленной от центра магнита ($X < -11$ см), на верхнем электроде находятся анодные пятна, а на нижнем — катодные. На электродах за центром магнита в непосредственной близости от него находятся на верхнем электроде катодные пятна, а снизу — анодные ($5 > X > 2$ см), вдали от центра магнита сверху расположен анод, а снизу — катод ($15 > X > 11$ см).

Катодные пятна вблизи центра магнита с обеих сторон его значительно крупнее и глубже, чем вдали от центра магнитного поля, так как в центре магнита $B_0 \approx 1$ тл, а вдали от центра $B_0 \approx 0$. Таким образом, зоны катодных и анодных пятен на электродах совпадают с зонами границ витков концевых токов, а направление электрического тока совпадает с направлением, показанным на фиг. 1, а. Проводилось сравнение величин разности потенциала между зондами, установленными в центре магнита, при одном и том же межэлектродном расстоянии и одинаковых величинах магнитного поля для канала с непроводящими стенками и канала с электродами. Разность потенциалов между электродами в случае канала с непроводящими стенками значительно больше, чем для канала с электродами, что указывает на увеличение электрического тока в зоне входа в магнит в канале с электродами.

В последующих экспериментах сплошные медные электроды были заменены непроводящими стенками с установленными в них металлическими электродами диаметром 2.5 см, торцовые поверхности которых располагались заподлицо со стенками канала. На входе в магнит ось одной пары электродов находилась при $X = -3$ см, а второй — при $X = -13$ см. На выходе из магнита ось первой пары находилась при $X = 3$ см, а второй — при $X = 13$ см. Верхние электроды между собой замыкались накоротко медными шинами, так же как и нижние электроды, как показано на фиг. 3, а. Разность потенциалов между зондами в центре магнита совпадает друг с другом как в случае канала со сплошными электродами, так и с электродами диаметром 2.5 см для одинаковых величин магнитного поля.

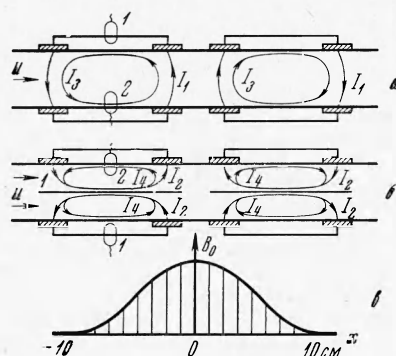
Экспериментальное исследование концевых электрических токов проводилось с помощью поясов Роговского (I на фиг. 3, а), устанавливаемых на шинах, соединяющих электроды. Пояс Роговского фиксировал только электрический ток I_1 , который из плазмы попадал в цепь электродов. На фиг. 4 (I) и фиг. 5 (I) приведена зависимость электрического тока, проходящего через цепь электродов, соответственно для участка канала на входе в магнитное поле и на выходе. При увеличении магнитного поля до $B_0 \approx 1$ тл электрический ток I_1 (фиг. 3, а) через электроды увеличивается на входе в магнит до 2600 а, а на выходе — до 3000 а.

Измерение электрического тока во внешней цепи электродов I_2 в канале с непроводящей перегородкой длиной 5 калибров, установленной в зоне входа или выхода из магнитного поля (фиг. 3, б) показало, что на входе и выходе из магнита ток через

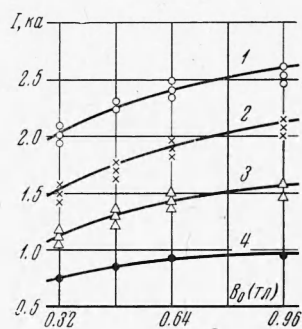
плазму и электроды I_2 (2 на фиг. 4 и фиг. 5) меньше, чем ток I_1 в случае отсутствия перегородок. На входе в магнит ток I_2 составляет 0.75—0.80 тока I_1 , а на выходе из магнита — 0.4—0.45 тока I_1 .

При введении в канал электродов витки концевой электрического тока внутри канала полностью не исчезают вследствие наличия контактного сопротивления в приэлектродном слое (приэлектродные падения напряжения) (фиг. 3, а). Кроме электрического тока I_1 через плазму и электроды существует электрический ток I_3 внутри канала как на входе, так и на выходе из магнита.

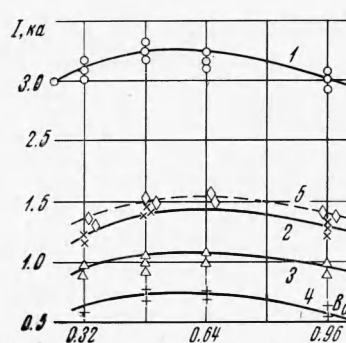
Проводилось измерение электрических токов одновременно двумя поясами Роговского, один из которых измерял электрический ток на шине I_1 , а другой, устанавливаемый в канале и охватывавший половину поперечного сечения канала, измерял ток I_3 в витке внутри канала. Электрический ток I_3 появляется раньше, чем ток I_1 , так как для появления электрического тока в цепи электродов необходимо, чтобы передний фронт плазмы прошел участок между парами электродов. Если электрический ток внутри канала нарастает до максимума за 4—5 мксек, то ток через внешнюю цепь электродов — через 15 мксек. Такая разница во времени объясняется, вероятно,



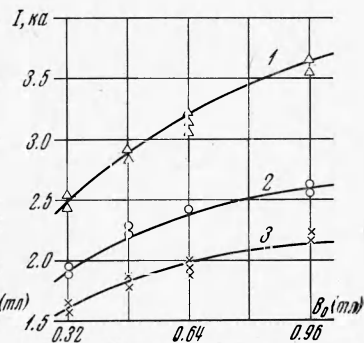
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

процессами формирования приэлектродных пятен. Когда электрический ток I_1 достигает максимума, ток внутри канала уменьшается до 0.7—0.8 своей максимальной величины. На фиг. 4 и 5 приведены максимальные значения величин электрических токов.

Зависимость величины концевой электрического тока внутри канала с электродами I_3 от магнитного поля показана на фиг. 4 (3) и фиг. 5 (3) соответственно для входа и выхода из магнитного поля. Концевой ток внутри канала I_3 составляет 0.55—0.62 тока через цепь электродов I_1 на входе в магнит и 0.3—0.33 — на выходе из магнита для максимальных значений электрического тока.

При установке в канал с электродами непроводящих перегородок концевые электрические токи внутри полуканалов I_4 сохраняются (фиг. 3, б), хотя и не такие большие, как в канале с непроводящими стенками. На фиг. 4 (4) и фиг. 5 (4) приведены значения концевых токов внутри полуканалов I_4 для разных магнитных полей. Электрический ток I_4 составляет 0.43—0.48 на входе в магнит и 0.4 на выходе от концевой

тока I_2 через цепь электродов в канале с пластиной. Электрический ток I_4 внутри канала с электродами и с перегородкой составляет 0.55—0.58 для переднего витка концевой тока и 0.6—0.65 для заднего витка концевой тока от концевой тока I_3 в канале с электродами без пластин.

Таким образом, как в канале с непроводящими стенками, так и с электродами отношение величин электрических токов в витках концевой тока в канале с перегородками к концевому току в канале без перегородок составляет 0.5—0.6 для входа в магнит и 0.6—0.65 для выхода из него.

Во всех описанных выше экспериментах электроды, как и перегородки, устанавливались или только на входе, или только на выходе из магнита, но не одновременно. На фиг. 5 (*I*) показана величина концевой тока через цепь электродов на выходе из магнита в случае, когда на входе в магнит канал имел непроводящие стенки. Если же ввести электроды и на входе в магнит, то величина концевой тока через цепь электродов на выходе из магнита резко падает (5 на фиг. 5). Например, при $B_0 \approx 0.5$ тл величины концевых токов отличаются более чем в два раза. При введении электродов на входе в магнит суммарный ток на входе увеличивается с 2700 до 3800 а ($B_0 \approx 0.5$ тл), а на выходе из магнитного поля уменьшается с 3300 до 1500 а в цепи электродов. Концевые токи I_4 внутри канала различаются при этом в гораздо меньшей степени.

Таким образом, концевые токи на входе и на выходе из магнитного поля взаимосвязаны, и с ростом одного из токов вследствие роста тормозящей силы уменьшается другой концевой ток.

Как и для канала с непроводящими стенками, проводилось измерение скорости переднего фронта сгустка в сечении, расположенном на расстоянии 1 калибра за центром магнита. В канале с электродами без перегородки скорость потока составляет $0.8 \cdot 10^6$ см/сек, а в канале с перегородкой — $1.3 \cdot 10^6$ см/сек при $B_0 \approx 1$ тл.

Отношение скоростей для канала без перегородки и канала с перегородкой почти такое же, как для канала с непроводящими стенками. Величина концевой электрической тока в канале зависит как от скорости потока, градиента магнитного поля, геометрии канала и т. д., так и от электропроводности плазмы. Измерение с помощью электродов показало, что на расстоянии 50 см длины канала (≈ 12.5 калибров) электропроводность плазмы уменьшается от 130 до 60 мо/см. Начальный участок, где проводились измерения, находился на расстоянии 70 см от источника плазмы. Концевой ток в цепи электродов в зоне переднего витка тока при $B_0 \approx 1$ тл изменяется с 3700 до 2600 а при удалении магнита вниз по потоку на 12.5 калибров (фиг. 6).

Если на расстоянии 70 см от источника плазмы (*I* на фиг. 6) концевой ток увеличивается с ростом магнитного поля с 0.32 до 0.96 тл в 1.5 раза, то на расстоянии 95 см (2 на фиг. 6) и 120 см (3 на фиг. 6) от разрядной камеры — только в 1.3 раза. Чем ближе к источнику плазмы, тем меньше магнитное поле влияет на изменение электропроводности плазмы, чем и объясняется разница в изменении величины концевой тока с ростом магнитного поля для разных участков канала.

Автор благодарит А. Б. Ватажина за помощь в работе и обсуждение статьи.

Поступила 8 V 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. К а ш к и н Ю. Ф. О торможении сгустка плазмы в неоднородном магнитном поле. ПМТФ, 1969, № 3.
2. Д е м и д е н к о И. И., Л о м и н о Н. С., П а д а л к а В. Г., Р у т к е в и ч Б. Н., С и н е л ь н и к о в К. Д. Плазменный поток в неоднородном поперечном магнитном поле. Ж. техн. физ., 1969, т. 39, № 1.
3. К а ш к и н Ю. Ф. Исследование концевых электрических токов при движении плазмы по каналу электроразрядной трубы через неоднородное магнитное поле. ПМТФ, 1970, № 1.
4. В а т а ж и н А. Б. О деформации профиля скорости в неоднородном магнитном поле. ПМТФ, 1967, т. 31, вып. 1.
5. Ш е р к л и ф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. М., «Мир», 1965.
6. В а т а ж и н А. Б., Н е м к о в а Н. Г. Некоторые двумерные задачи о распределении электрического тока в канале магнитогидродинамического генератора с непроводящими перегородками. ПМТФ, 1964, № 2.
7. Л а в р е н т ь е в И. В. Влияние длины непроводящей перегородки на характеристики МГД-генератора. Магнитная гидродинамика, 1968, № 1.
8. Х о л щ е в н и к о в а Е. К. Стационарное сверхзвуковое течение проводящего газа в канале с непроводящими стенками при слабом магнитогидродинамическом взаимодействии. ПМТФ, 1970, № 4.