

03;04;12

©1994

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИНЕРТНОГО ГАЗА В ХОЛЛОВСКОМ МГД-КАНАЛЕ ПРИ РАЗВИТИИ ИОНИЗАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

*Р.В.Васильева, А.В.Ерофеев,
А.Д.Зуев, Е.А.Дьяконова, А.А.Мартонок*

Экспериментальное исследование направлено на изучение ионизационной неустойчивости в потоке плазмы чистого инертного газа с неравновесной ионизацией и ее влияние на основные характеристики потока в МГД-канале Холловского типа. Исследования проводились в окрестности критического значения магнитного поля.

До сих пор в качестве рабочего тела МГД-генераторов закрытого цикла использовались инертные газы с присадкой щелочного металла. Развитие ионизационной неустойчивости в этом случае приводит к падению эффективной проводимости [1]. В данной работе развивается идея авторов о том, что в качестве перспективного рабочего тела МГД-генераторов может использоваться ионизационно неустойчивая плазма чистых инертных газов [2].

Основное отличие в условиях МГД-каналов в состояниях плазмы с присадкой и без присадки состоит в том, что в первом случае степень ионизации газа при флуктуациях температуры ограничивается полной ионизацией присадки, а во втором случае в неоднородностях с повышенной температурой ионизация может развиваться свободно. В данной работе планировалось выявить, как развитие неоднородностей и появление флуктуационных токов скажется на вольт-амперных характеристиках, значении эффективной проводимости плазмы и изменении удельной мощности с ростом магнитного поля при переходе через его критические значения.

Установка, на которой производилось исследование, представляет собой дисковый канал, сочлененный с ударной трубой. Рабочий газ — ксенон. Диаметр дисков 0.30 м, диаметр канала ударной трубы 0.05 м, длина камеры высокого давления 1.3 м, низкого давления — 3.0 м. Более подробное описание установки и методов расчета можно найти в [3].

Сверхзвуковой поток из ударной трубы попадает в разворачивающееся сопло, в котором за счет подтормаживания

происходит предионизация газа. Число Маха на входе в дисковый канал ($r = 20$ мм) $M = 1.21$, температура газа $T = 5900$ К, концентрация атомов $n_a = 0.625 \cdot 10^{25}$ л/м³, степень ионизации $\gamma = 0.3 \cdot 10^{-3}$. Магнитное поле направлено по нормали к плоскости дисков, а его величина изменялась от 0.3 до 0.9 Тл. Длительность процесса — порядка 500 мкс.

В результате движения ионизованного газа поперек линий магнитного поля индуцируются кольцевой Фарадеевский и радиальный Холловский токи. Холловский ток собирался двумя кольцевыми электродами (радиусы 0.12 и 0.26 м), установленными в начале и конце канала, и замыкался на различные нагрузки, от много больших (200 кОм) до сравнимых с внутренним сопротивлением плазмы (0.15 Ом).

Производилось снятие вольт-амперных характеристик МГД-канала при различных значениях магнитного поля (вблизи критики), собственного свечения плазмы в начале и конце канала, а также локальных значений плотностей токов в азимутальном и радиальном направлениях. Данные с локальных индукционных катушек и ФЭУ позволили судить о развитии неустойчивостей по возникновению осцилляций на осциллограммах плотностей токов и собственного свечения плазмы, периодичность которых связывалась с масштабом неоднородностей, а амплитуда — с различием параметров в стратах и областях между ними. Величина критического магнитного поля определялась из обработки флуктуаций на осциллограммах плотностей токов и излучения. Установлено затягивание развития неустойчивостей с уменьшением нагрузки. Так, при изменении нагрузки от 200 кОм до 0.15 Ом величина критического магнитного поля изменяется от 0.53 до 0.78 Тл. Критическое значение параметра Холла $\beta_{\text{ср}} \approx 2$.

На рис. 1, а представлены вольт-амперные характеристики, полученные по измерениям с электродов. Часть кривых соответствует неустойчивым режимам. Резкий излом кривых, соответствующий началу протекания тока, связан с приэлектродным падением напряжения. При переходе от устойчивого состояния к неустойчивому кривые ВАХ сохраняют и тенденцию своего изменения.

Приэлектродное падение напряжения, связанное с низкой температурой электродов, оценивалось с помощью закона Ома для исчезающе малых токов:

$$j_x = \frac{\sigma_0}{1 + \beta^2} \left(\beta v B - \frac{U_h + \Delta U_{\text{пр}}}{l} \right),$$

$$j_\varphi = \frac{\sigma_0}{1 + \beta^2} \left(v B - \beta \frac{U_h + \Delta U_{\text{пр}}}{l} \right), \quad \sigma_0 = \frac{e^3 n_e}{m_e \langle \nu \rangle},$$

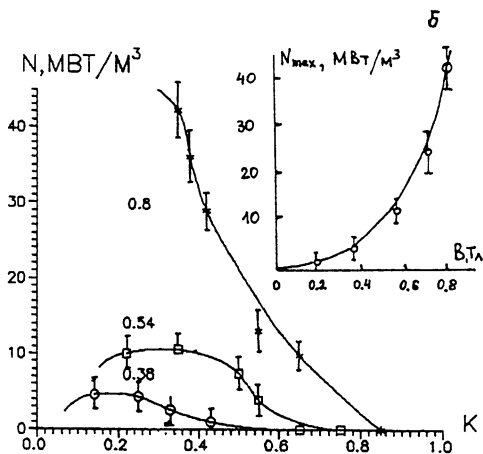
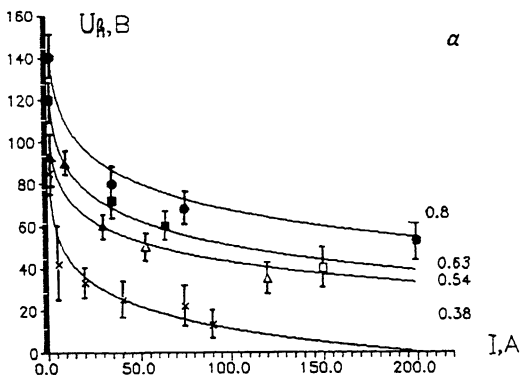


Рис. 1. *а* — вольт-амперные характеристики Холловского МГД-канала для различных значений магнитного поля (цифры у кривых — B, T). Светлые точки — устойчивые режимы, черные — неустойчивые. *б* — удельная мощность в зависимости от коэффициента нагрузки K .

где l — расстояние между электродами, U_A — напряжение на нагрузке, $\Delta U_{\text{пр}}$ — приэлектродное падение напряжения. Устремляя $i_x \rightarrow 0$, получим $\Delta U_{\text{пр}} = \beta v B - U_h$. Оценка дала величину $\Delta U_{\text{пр}} \approx 50 \pm 5$ В, сравнимую с напряжениями на нагрузке.

Кривая удельной мощности, снимаемой с нагрузки (рис. 1, *б*), в зависимости от коэффициента нагрузки имеет максимумы, и лишь для $B = 0.8$ Тл максимальная точка

не была получена, т.е. не были проведены измерения для нагрузок, меньших 0.15 Ом. Величина максимальной мощности N_{\max} в зависимости от магнитного поля (при фиксированном значении коэффициента нагрузки $K = 0.32$, близком к оптимальным режимам) при переходе из докритики в закритику монотонно возрастает.

На рис. 2, а представлены величины радиальной и азимутальной плотностей токов, которые были измерены с помощью локальных индукционных катушек при различных значениях магнитного поля. Крестики соответствуют измерениям с электродов. Видно, что значения токов при переходе от устойчивых к неустойчивым режимам монотонно возрастают с увеличением магнитного поля. Величина азимутального тока на порядок больше радиального и не зависит от величины нагрузки, что говорит о том, что значительной части энергии от плазмы отвести не удалось из-за больших приэлектродных потерь.

На рис. 2, б представлена зависимость интенсивности сплошного осредненного по флуктуациям излучения плазмы от магнитного поля для двух радиусов, соответствующих началу и концу канала (относительно излучения плазмы при отсутствии магнитного поля). Интенсивность излучения монотонно возрастает с увеличением магнитного поля в окрестности его критических значений.

Как известно, интенсивность свечения плазмы в области континуума зависит от концентрации и температуры электронов как $J_\nu \sim n_e^2 \cdot T_e^{-\frac{1}{2}}$. Возрастание $J_\nu(B)$ на порядок при переходе за критику свидетельствует о росте концентрации электронов в стратах.

Данные по проводимостям представлены на рис. 2, в. Для расчета использовался закон Ома. При измерении проводимости ожидалось ее уменьшение вследствие образования неоднородностей, ухудшающих условия протекания токов в канале. Однако эксперимент показал, что как средняя проводимость $\langle \sigma \rangle = \langle \sigma_0 / (1 + \beta^2) \rangle$ (по данным с локальных катушек), так и эффективная $\sigma_{\text{eff}} = [\sigma_0 / (1 + \beta^2)]_{\text{eff}}$ (с электродов) при переходе через критику продолжают монотонно расти с увеличением магнитного поля, при этом значение скалярной проводимости составляет $\sigma_0 = 300 - 400$ с/м. Наблюдаемое в устойчивых режимах расхождение между $\langle \sigma \rangle$ и $\langle \sigma \rangle_{\text{eff}}$ связано с тем, что при малых магнитных полях индуцированная ЭДС сравнима с приэлектродным падением. При вычислении проводимости возникает малая разность больших величин, приводящая к большим погрешностям.

Обработка осцилляций на осциллограммах плотности радиального тока при $B > B_{\text{cr}}$ позволила вычислить отношение эффективной проводимости к средней, которое со-

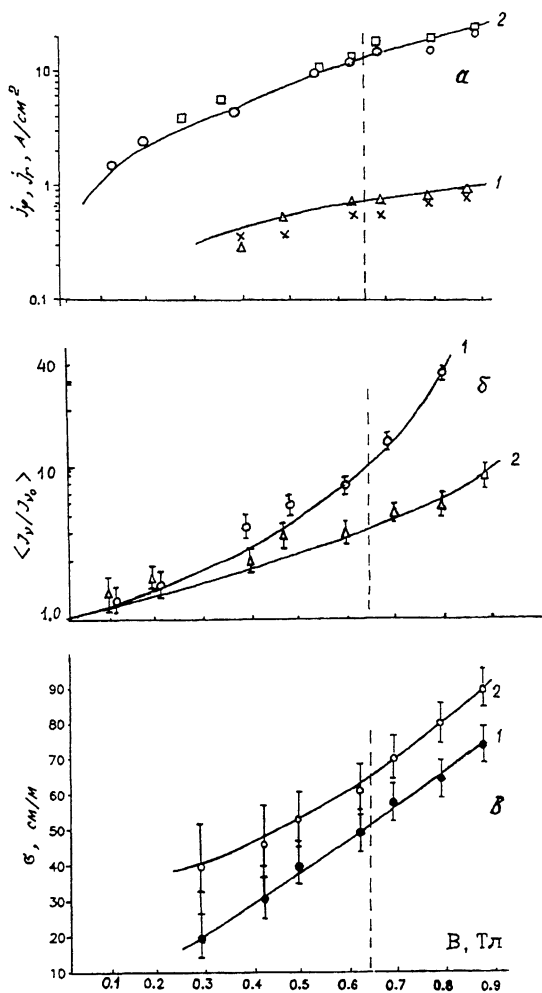


Рис. 2. Зависимость параметров плазмы от магнитного поля: *a* — плотности радиального (1) и азимутального (2) токов для нагрузки $R_H = 2.0$ Ом по данным локальных индукционных катушек (крестики соответствуют измерениям с электродов). *б* — собственного излучения плазмы в начале (1) и конце (2) канала. *в* — эффективной (1) и средней (2) проводимости ($R_H = 2.0$ Ом). Пунктиром отмечено критическое матричное поле.

ставляет 60%. Следовательно, неоднородности в потоке достаточно сильно влияют на условия протекания токов.

Таким образом, эксперимент показал, что как в устойчивых, так и в неустойчивых режимах в плазме чистых инерт-

ных газов наблюдается монотонное возрастание проводимости и максимальной удельной мощности с ростом магнитного поля. Это оказывается возможным благодаря тому, что нарушение неоднородностями условий протекания токов в канале, снижающее проводимость, оказывается слабее эффекта от резкого увеличения степени ионизации в статах.

Список литературы

- [1] *Velikhov E.P., Golubev V.S., Dykhne A.M.* // *Atom. Energi Rev.* 1976. V. 14. N 2. P. 325-385.
- [2] *Vasil'eva R.V., Erofeev A.V., Zuev A.D.* Proc. of the Eleventh Int. Conf. on MHD Electrical Power Generation. Beijing. China. 1992. V. 4. P. 1199-1205.
- [3] *Васильева Р.В., Генкин А.Л., Горячев В.А., Ерофеев А.В., Зуев А.Д., Мирианов Д.Н., Ременный А.С., Силин Н.А.* Низкотемпературная плазма чистых инертных газов с неравновесной ионизацией и МГД-генераторы. ФТИ РАН. 1991. С. 79-92.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
8 июня 1994 г.