

УДК 533.9;519.6

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ И ЯВЛЕНИЕ КРИЗИСА ТОКА В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ СИЛЬНОТОЧНОМ ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

© 2011 г.

А.Н. Козлов

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

ankoz@keldysh.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведено исследование приэлектродных процессов и устойчивости потоков плазмы в канале квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя. Математическое моделирование выполнено на основе двухжидкостной магнитогидродинамической модели. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными, определяющими наличие критических режимов. Выявлена область параметров и сформулирован критерий, отвечающие ламинарным течениям плазмы в отсутствие приэлектродных неустойчивостей. Исследовано влияние способов подачи вещества на входе в канал и дополнительного продольного магнитного поля на развитие приэлектродных процессов и формирование кризиса тока.

Ключевые слова: двухжидкостная МГД-модель, приэлектродная неустойчивость, кризис тока, квазистационарный плазменный ускоритель, дополнительное продольное магнитное поле.

Исследование устойчивости потоков плазмы проводится различными методами, включая анализ дисперсионных соотношений, использование энергетического принципа. Достаточно полную картину дает моделирование развития возмущений в рамках той или иной системы уравнений. Динамика плазмы для достаточно плотной среды адекватным образом описывается системой магнитогидродинамических (МГД) уравнений с соответствующими коэффициентами переноса (см., например [1–4]).

Простейшие плазменные ускорители состоят из двух сплошных коаксиальных электродов, подсоединенных к электрической цепи. Механизм ускорения плазмы обусловлен действием силы Ампера $1/c[\mathbf{j}, \mathbf{H}]$, где плазменный ток в межэлектродном промежутке имеет преимущественно радиальное направление, в свою очередь электрический ток, протекающий вдоль внутреннего электрода, генерирует азимутальное магнитное поле. Генерация высокоскоростных потоков плазмы в КСПУ представляет интерес для решения задач инжекции в различные термоядерные установки, взаимодействия плазмы с материалами и реализации ряда технологических приложений, а также для перспективных разработок мощных электрореактивных плазменных двигателей. В настоящее время опробовано несколько модификаций плазменных ускорителей (см., например [5–8]), которые позволяют частично решить проблему

взаимодействия потоков плазмы с электродами.

На практике в целом ряде случаев продолжают использовать сплошные электроды. Теоретический анализ [1] динамики плазмы поперек магнитного поля $H = H_\phi$ в окрестности эквипотенциального непроницаемого электрода ($\mathbf{E} \perp \mathbf{V}$, $V_n = 0$, $E_\tau = 0$) был проведен на основе обобщенного закона Ома. Поскольку $\mathbf{V}_e \neq \mathbf{V}_i$, учет эффекта Холла и параметра $\omega_e \tau_e$ приводит к появлению продольной холловской компоненты тока $j_\parallel \cong -\omega_e \tau_e j_\perp$ и отжатию плазмы от анода. В свою очередь уменьшение концентрации в окрестности электрода увеличивает $\omega_e \tau_e$ и еще больше увеличивает ток вдоль анода и отжатие плазмы от электрода. В результате при определенных условиях может произойти полное изменение структуры течения. В ускорителе появляются колебания большой амплитуды. В экспериментах это приводит к явлению кризиса тока, которое проявляется на вольт-амперных характеристиках. Когда разрядный ток в системе больше некоторого критического значения J_{cr} , то напряжение на разряде резко растет и система препятствует прохождению токов большей величины.

В теоретических и численных исследованиях влияние пограничных слоев на основной поток реализуется через граничные условия, которые должны учитывать характер взаимодействия плазмы с поверхностью металла или

изолятора. Ранее использовались упрощенные численные модели (см., например [9, 10]), которые не включали зависимость коэффициентов в уравнениях и граничных условиях от параметра $\omega_e \tau_e$. Прежний уровень моделей не давал возможности согласования с теорией явления кризиса тока и сравнения с экспериментальными данными.

В настоящее время разработана двумерная, в общем случае нестационарная, двухжидкостная МГД-модель с учетом эффекта Холла, тензора проводимости среды и зависимости коэффициентов переноса от $\omega_e \tau_e$. Различные модификации двухжидкостной МГД-модели отвечают постановке различных граничных условий и использовались ранее для сопоставления двумерных осесимметричных численной и аналитической моделей [11–13], а также для анализа режима ионного токопереноса в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ) с проницаемыми электродами при наличии дополнительного продольного магнитного поля [14]. В данном случае речь идет о численных исследованиях динамики плазмы, приэлектродных процессах и устойчивости потока в КСПУ со сплошными электродами.

Исследования подтвердили теоретические предпосылки возникновения явления кризиса тока, обусловленного эффектом Холла и развитием приэлектродных неустойчивостей. В окрестности непроницаемого сплошного анода обнаружено формирование прианодного слоя и процессов, которые предшествуют возникновению при электродных неустойчивостях и явлению кризиса тока. В соответствии с теорией уменьшение концентрации в окрестности электрода за счет продольной холловской компоненты тока приводит к увеличению значений $\omega_e \tau_e$, еще большему увеличению тока вдоль анода и отжатию плазмы от электрода. В результате при определенных условиях и достаточно низкой концентрации плазмы n_0 на входе в канал ускорителя происходит изменение структуры течения: возникают колебания, и наблюдается развитие неустойчивости. Граница раздела между стационарными и неустойчивыми режимами течения представляет собой линейную функцию в плоскости переменных (J_g, n_{cr}) , где J_g – разрядный ток в системе, а n_{cr} – критическое значение характерной концентрации плазмы на входе.

Согласно экспериментам, условие возникновения явления кризиса тока определяется соотношением $J_{cr}^a / J_m \cong K$, где J_{cr} – критическая величина разрядного тока, $J_m = e \dot{m} / m_i$ – рас-

ход газа \dot{m} , выраженный в токовых единицах. В данном приближенном экспериментальном соотношении полагают, что $\alpha \approx 2$. Результаты численного моделирования приводят к значениям $\alpha \cong 1.5$.

Исследования показали, что увеличение характерных размеров плазменного ускорителя расширяет область значений n_0 , отвечающих стационарным устойчивым режимам течения. Установлено, что варьирование характерной температуры плазмы на входе $T_0 = 1 \div 5$ эВ и наличие слабого продольного магнитного поля в ускорителе не оказывает существенного влияния на процесс формирования кризиса тока при условии равномерной подачи плазмы на входе в канал КСПУ. Исследовано влияние способов подачи вещества на входе в канал ускорителя, в том числе рассмотрен случай неравномерной подачи в соответствии с аналитической моделью динамики плазмы в приближении плавного канала [11], когда плотность на входе меняется обратно пропорционально квадрату радиуса. В экспериментальных исследованиях также используются различные способы подачи рабочего вещества. Численные эксперименты показали, что неравномерная подача не оказывает существенного влияния на развитие приэлектродных неустойчивостей. Однако одновременное использование неравномерной подачи и слабого продольного магнитного поля [8, 10–14] заметным образом расширяет область значений параметров, отвечающих ламинарным течениям в отсутствие неустойчивостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН (программа № 14(1) фундаментальных исследований Президиума РАН).

Список литературы

1. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2008.
2. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962; М.: Логос, 2005.
3. Брагинский С.И. Явление переноса в плазме // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 1. С. 183–272.
4. Физико-химические процессы в газовой динамике: Справочник / Под ред. Г.Г. Черного, С.А. Лосева. М.: МГУ, 1992. Т. 1; 2002. Т. 2.
5. Белан В.Г. и др. // Физика плазмы. 1990. Т. 16, №2. С. 176–185.
6. Tereshin V.I. et al. // Plasma Phys. Contr. Fusion. 2007. Vol. 49. P. A231–A239.
7. Ананин С.И. и др. // Физика плазмы. 1998. Т.24, № 11. С. 1003–1009.
8. Kozlov A.N. et al. // Problems of Atomic Science and

- Technology. Series: Plasma Physics. 2009. No 1. P. 92–94. C. 165–175.
9. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. Фортова В.Е. Т. IX-2. М.: Янус-К, 2007. С. 334–369.
10. Козлов А.Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32, №5. С. 413–422.
11. Козлов А.Н. // Изв. РАН. МЖГ. 2003. №4. С. 44–55.
12. Kozlov A.N. // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2005. No1. P. 104–106.
13. Kozlov A.N. // J. Plasma Physics. 2008. V. 74, No 2. P. 261–286.
14. Козлов А.Н. // ПМТФ. 2009. Т. 50, №3. С. 44–55.

**STABILITY OF FLOWS AND THE PHENOMENON OF THE CURRENT CRISIS
IN THE QUASI-STEADY HIGH-CURRENT PLASMA ACCELERATOR**

A.N. Kozlov

Processes in a vicinity of electrodes and the stability of the plasma streams in the channel of the quasi-steady high-current plasma accelerator are studied. Mathematical modeling is done on the basis of the two-fluid MHD model. The computational results are compared to the experimental data defining the presence of the critical modes. The area of parameters is found, and a criterion adequate to the laminar plasma flows in the absence of instability in the vicinity of the electrodes is formulated. The effect of changing the ways of the plasma inflow on the channel input and of an additional longitudinal magnetic field on the development of the processes in the vicinity of the electrodes and formation of the current crisis are investigated.

Keywords: two-fluid MHD model, instability in a vicinity of electrodes, current crisis, quasi-steady plasma accelerator, additional longitudinal magnetic field.