

04;09

О высокочастотной стабилизации магнитоплазмодинамического двигателя

© К.П. Кирдяшев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 30 июня 2003 г.

Представлены экспериментальные данные о высокочастотной стабилизации и подавлении низкочастотных колебаний в магнитоплазмодинамическом двигателе. Выявлены условия и эффективность стабилизирующего действия высокочастотного магнитного поля на создаваемый двигателем плазменный поток.

Известно, что в электрических разрядах, предназначенных для ускорения плазмы, проявляются крупномасштабные низкочастотные неустойчивости, приводящие к снижению эффективности ускорения, колебаниям плотности и разбросу скоростей ионов в выходящих плазменных потоках. В предельных (высоковольтных) режимах магнитоплазмодинамических (МПД) ускорителей развитие таких неустойчивостей сопровождается возбуждением колебаний напряжения в разрядах, сравнимых с приложенным напряжением и приводящих к срыву ускорительных процессов [1–3]. При использовании таких ускорителей в качестве элементов космических двигательных установок возбуждение низкочастотных неустойчивостей является причиной возникновения флуктуаций амплитуды и фазы радиоволн при их рассеянии на колебаниях в плазменных образованиях, создаваемых вблизи космических аппаратов. В связи с этим особое значение приобретает исследование применимости известных методов стабилизации плазмы для подавления колебаний при ускорении плазмы и создании слаботурбулентных плазменных образований.

Разработанные ранее методы высокочастотной стабилизации позволяют осуществлять эффективное подавление наиболее опасных для формирования ускоряющих слоев в плазме низкочастотных неустойчивостей, приводящих к возбуждению вытянутых вдоль магнитного поля возмущений плотности и потенциала плазмы. При формировании неоднородных плазменных потоков такие неустойчивости проявляются

в виде азимутальных дрейфовых волн, экспериментально наблюдаемых при испытаниях МПД двигателей [2]. Установлено [4–5], что стабилизация дрейфовых неустойчивостей плазмы основывается на представлении об осцилляции электронов в высокочастотном электрическом поле, в результате чего возрастает эффективная температура электронов и происходит увеличение частоты и затухания на тепловых электронах возбуждаемых дрейфовых волн. При ускорении плазмы в электрическом и магнитном полях применим метод стабилизации, основанный на воздействии на плазму магнитной составляющей высокочастотного поля [6,7]. Такой метод стабилизации реализуется с помощью проводников с высокочастотным током, создающих в области ускорения плазмы переменное магнитное поле, которое приводит к колебаниям магнитных силовых линий основного поля двигательной установки. Электроны, двигающиеся вдоль колеблющихся магнитных силовых линий с тепловыми скоростями, уменьшают электрическое поле низкочастотных возмущений, что приводит к стабилизации неустойчивости и подавлению колебаний в выходящем плазменном потоке. Возможность реализации метода высокочастотной стабилизации при ускорении плазмы в МПД двигателях отмечалась в экспериментах [8].

В данной работе на основе результатов проведенных стендовых испытаний газоразрядной модели стационарного МПД двигателя [9] выявлены условия проявления и эффективность стабилизирующего действия высокочастотного поля на ускоряющую область плазменного потока. Исследования проводились на установке с коаксиальной геометрией электродов — подогревного катода и кольцевого анода (рис. 1). В рабочих режимах двигательной установки обеспечивалось формирование в области ускорения плазмы несамостоятельного электрического разряда в слабо расходящемся магнитном поле. Ионизация газа в разряде осуществлялась термоэмиссионными электронами при подаче рабочего газа (аргона) через поверхность анода, расположенную на срезе магнитной катушки. Исследованы режимы плазменной установки при напряжении на разряде 150–200 В, разрядном токе в пределах 1–2 А и напряженности продольного магнитного поля в области катода до $4 \cdot 10^4$ А/м. В проведенной серии экспериментов расход газа составлял $(1–5) \cdot 10^{-2}$ г/с при давлении остаточного газа в вакуумной камере экспериментальной установки $8.5 \cdot 10^{-2}–1.5 \cdot 10^{-1}$ Н/м². В этих режимах разряда максимальная концентрация электронов в области ускорения плазмы составляла $(1.0–2.5) \cdot 10^{11}$ см⁻³ при электронной температуре вблизи катода 5–10 эВ. Как следует из зондовых изме-

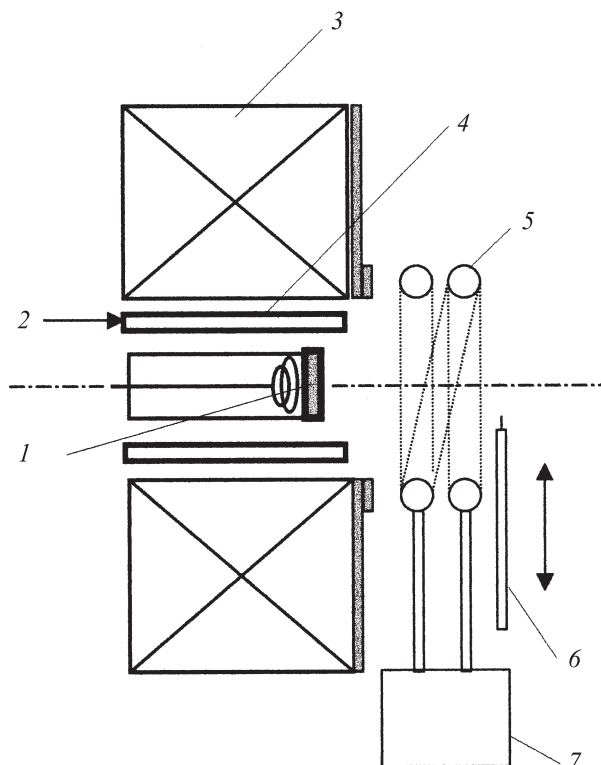


Рис. 1. Схема экспериментальной плазменной установки: 1 — катодный узел (внутренний диаметр катода 2.1 см), 2 — подача рабочего газа, 3 — магнитная система, 4 — анод (внутренний диаметр 4.9 см), 5 — стабилизирующий контур, 6 — электрический зонд, 7 — высокочастотный генератор.

рений, на выходе из ускоряющей области МПД двигателя формируется плазменный поток с неоднородным распределением параметров плазмы по длине и радиусу. Начальное сечение плазменного потока определяется поперечными размерами катода, и во внешней области на расстоянии 1.0–1.5 см от оси концентрация и температура электронов уменьшаются соответственно до значений 10^{10} cm^{-3} и 1 eV.

В исследованных режимах двигательной установки наблюдаются колебания потенциала зонда в диапазоне частот 30–50 kHz, связанные

с колебаниями плотности выходящего плазменного потока. Особенность проявления этих колебаний — наличие порога возбуждения по магнитному полю и максимум интенсивности в периферийной области разряда с наибольшим градиентом концентрации электронов, что позволяет рассматривать дрейфовую неустойчивость ускоряющей области плазмы в качестве одного из механизмов возбуждения низкочастотных колебаний в плазменном потоке. Оценка частоты дрейфовых колебаний с учетом данных о градиенте концентрации и температуре электронов в неоднородной плазме согласуется с частотами дискретных составляющих спектров экспериментально наблюдаемых колебаний (рис. 2, *a*). Амплитуда колебаний потенциала плазмы в периферийной области потока составляет 0.5–1.0 В, что при условии потенциальности колебаний и значениях электронной температуры 1–5 эВ соответствует колебаниям концентрации электронов в выходящем плазменном потоке $\Delta n_e/n_e \leq 0.2$ –1.0.

Воздействие на МПД двигатель стабилизирующего высокочастотного поля осуществлялось на частоте 40 МГц с помощью спирального контура с током, установленного вблизи границы выходящего плазменного потока. Выбор частоты стабилизирующего генератора обеспечивал режим эффективной стабилизации плазмы при воздействии поля на частоте Ω , удовлетворяющей условиям: $\omega_{ei} < \Omega \ll \omega_{He}$ и $\Omega > \nu_e$, здесь ω_{ei} — нижняя гибридная частота, ω_{He} — циклотронная частота электронов, ν_e — эффективная частота электронных столкновений (как показывают оценки, в условиях проведенного эксперимента преобладают столкновения электронов с атомами рабочего газа). Глубина проникновения стабилизирующего поля в плазменный поток $\delta \approx c/\omega_{pe}$ определена исходя из значения ленгмюровской частоты электронов ω_{pe} в неоднородной области плазменного потока. Эта величина составляла 2–3 см, что позволяет рассматривать объемное воздействие поля на неравновесную область плазмы с возбуждаемой в ней дрейфовой неустойчивостью. Об этом свидетельствует слабо изменяющееся в поперечном сечении потока распределение интенсивности высокочастотного поля, регистрируемое с помощью подвижного электрического зонда. Следует отметить, что воздействие стабилизирующего поля на плазменный поток сопровождалось нелинейными эффектами, связанными с возбуждением гармоник основной частоты, при этом интенсивность второй гармоники составляла 0.3–0.4 от интенсивности поля на основной частоте.

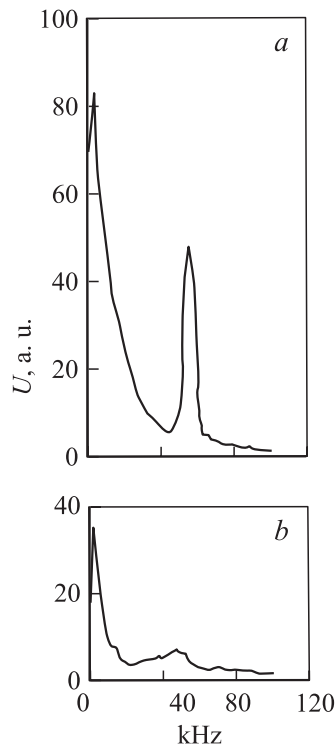


Рис. 2. Спектры колебаний потенциала зонда в плазменном потоке без стабилизации электрического разряда (*a*) и при воздействии внешнего высокочастотного поля (*b*).

В проведенных экспериментах наблюдается эффективное (до 15–20 dB) подавление дискретных составляющих спектра низкочастотных колебаний (рис. 2, *b*), связанных с возбуждением дрейфовой неустойчивости ускоряющей области плазменного потока. Пороговые значения мощности стабилизирующего высокочастотного генератора (рис. 3), при превышении которых проявляется эффект подавления низкочастотной турбулентности плазменного потока, составляют 10–20 W при общей мощности двигательной установки в пределах 400–800 W. Частоты дискретных составляющих в спектре колебаний при воздей-

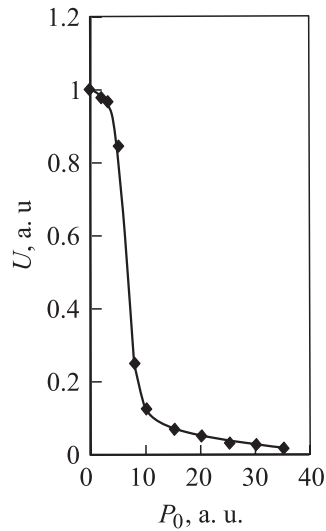


Рис. 3. Зависимость интенсивности дрейфовой составляющей низкочастотных колебаний в плазменном потоке от мощности стабилизирующего генератора (максимальное значение мощности генератора составляет 80 W).

стии высокочастотного поля не зависят от мощности генератора, что позволяет исключить стабилизирующее действие на плазму электрической составляющей высокочастотного поля, экспериментально установленное в работе [10]. Вычисленные по мощности стабилизирующего генератора пороговые значения напряженности магнитного поля согласуются с критерием стабилизации [5–7]:

$$\tilde{H} \geq (\Omega/k_{\perp} v_{Te}) H_0, \quad (1)$$

в котором \tilde{H} — амплитудное значение напряженности магнитного поля, создаваемого контуром с высокочастотным током, H_0 — напряженность постоянного магнитного поля двигательной установки, обеспечивающего режим электромагнитного ускорения плазмы, k_{\perp} — поперечная относительно магнитного поля составляющая волнового числа низкочастотных возмущений в плазме, $k_{\perp} \approx m/R_{pl}$, m — мода колебаний, R_{pl} — радиус плазменного потока, v_{Te} — тепловая скорость электронов.

В зависимости от условий формирования электрического разряда в МПД двигателе воздействие высокочастотного поля приводило как к подавлению турбулентности потока, так и к дополнительному возбуждению низкочастотных возмущений в плазменном потоке. Переход от режима стабилизации к режиму возбуждения низкочастотной турбулентности проявлялся при увеличении расхода рабочего газа и давления газа в вакуумной камере экспериментальной установки. В этих условиях следует рассматривать возбуждение дрейфово-диссипативной неустойчивости ускоряющей области плазмы [5], для которой возрастает порог стабилизации неустойчивости по магнитному полю при $v_e \geq \Omega$:

$$\tilde{H} \geq (\Omega/k_{\perp} v_{Te})(v_e/\Omega)^{1/2} H_0. \quad (2)$$

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие эффективность стабилизирующего действия на плазму высокочастотного магнитного поля. Прежде всего это дополнительная ионизация рабочего газа и увеличение температуры электронов под действием электрической составляющей высокочастотного поля, создаваемой стабилизирующим контуром. О наличии электрической составляющей высокочастотного поля свидетельствуют результаты измерений колебаний потенциала электрического зонда на частоте стабилизирующего генератора и гармониках этой частоты. Переход плазменной установки в режим дестабилизирующего действия высокочастотного поля в наибольшей степени проявляется при резонансной раскачке колебаний плазмы [11] на частоте стабилизирующего генератора, соответствующей условию $\Omega = \omega_{-}(\theta)$:

$$\omega_{-}^2 = \omega_{pe}^2 \cos^2 \theta / (1 + \omega_{pe}^2 / \omega_{He}^2), \quad (3)$$

здесь $\omega_{-}(\theta)$ — собственная частота электронных колебаний, θ — угол между волновым вектором колебаний и магнитным полем. Как показывают оценки, полученные с учетом значений ω_{pe} и ω_{He} , в эксперименте выполняется условие резонанса внешнего высокочастотного поля с частотой собственных колебаний плазмы при $\cos \vartheta \ll 1$ (величину $\cos \vartheta = k_z/k$ можно оценить исходя из соотношения продольного ΔL_{pl} и поперечного ΔR_{pl} размеров неоднородности выходящего плазменного потока, при этом $k_z \approx 1/\Delta L_{pl}$, $k_{\perp} \approx 1/\Delta R_{pl}$ и $k_z/k \approx 4 \cdot 10^{-2}$). В области частот стабилизирующего генератора проявляется параметрическая неустойчивость [11] ускоряющей области плазмы, приводящей к возрастанию электрической составляющей поля,

что экспериментально наблюдается при зондовых измерениях высокочастотных колебаний потенциала в плазме. Максимальная скорость осциллирующих электронов в высокочастотном электрическом поле с величиной напряженности \tilde{E} , соответствующей условиям эксперимента, составляет $v_E = e\tilde{E}/m_e\Omega \approx 2 \cdot 10^8$ см/с. Тепловая скорость электронов в неоднородной области плазменного потока оценивается значениями $v_{Te} = (6-9) \cdot 10^7$ см/с. В этих условиях дестабилизирующее действие электрической составляющей высокочастотного поля согласуется с представлением о нелинейном поглощении энергии поля и возбуждении в ускоряющей области плазмы экспериментально наблюдаемого широкого спектра ионно-звуковых колебаний.

Таким образом, воздействие высокочастотного поля на плазму МПД двигателя сводится к конкуренции двух процессов — стабилизации дрейфовой неустойчивости магнитной составляющей поля и перекачки энергии возбуждаемых в плазме внешним полем собственных колебаний в энергию ионно-звуковых волн. Заметим, что эффект подавления дрейфовой неустойчивости плазменного потока реализуется при относительной небольшой мощности высокочастотного генератора, не превышающей 5–10% от мощности плазменной установки. Оптимальным выбором частоты стабилизирующего генератора может быть увеличена эффективность подавления низкочастотной турбулентности плазменного потока, создаваемого МПД двигателем. При этом следует ожидать соответствующего улучшения электрореактивных характеристик двигательной установки и условий прохождения радиосигналов через создаваемые вблизи космических аппаратов плазменные образования.

Список литературы

- [1] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [2] Глотова Н.Н., Кирдяшев К.П., Острецов И.Н., Поротников А.А. // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 3. С. 506–513.
- [3] Кирдяшев К.П., Брухтий В.И. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 11. С. 36–42.
- [4] Файнберг Я.Б., Шапиро В.Д. // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. С. 293–308.
- [5] Иванов А.А. Физика сильнонеравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. С. 352.
- [6] Иванов А.А., Рудаков Л.И. и др. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. В. 5. С. 1380–1391.
- [7] Крашенинников С.И., Соболева Т.К. // Тез. докл. III Всесоюзн. конф. по плазменным ускорителям. Минск, 1976. С. 214–215.

- [8] *Божко И.Д., Кирдяшев К.П., Потапов А.В.* // Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М., 1978. С. 235–236.
- [9] *Кирдяшев К.П., Потапов А.В., Цветкова Л.Е.* и др. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 4. С. 542–548.
- [10] *Демирханов Р.А., Хорасанов Г.Л., Сидорова И.К.* // Proceedings of the 3rd Intern. Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency. 1969. V. II. P. 449–459.
- [11] *Силин В.П.* Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. М.: Наука, 1973. С. 288.