

04;09;12

## **СВЧ колебания как показатель предельных режимов магнитоплазодинамического двигателя**

© В.И. Брухтий, К.П. Кирдяшев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 18 января 2000 г.

Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие об устойчивой связи предельных режимов магнитоплазодинамического (МПД) двигателя с возбуждением СВЧ колебаний и возрастанием тяговой эффективности двигательной установки.

Исследование предельных параметров МПД двигателей приобрело особое значение в связи с необходимостью повышения эффективности двигательных установок и созданием на их основе источников высокоскоростных плазменных потоков. Предельные режимы характеризуются ограничением разрядного тока с увеличением напряжения, локализацией электрического поля во внешней ускоряющей области разряда и развитием неустойчивости электронного компонента плазмы [1–4]. Представление о возбуждении СВЧ колебаний в качестве определяющего фактора ускорения плазмы в предельных режимах МПД двигателя требует экспериментального подтверждения связи интенсивности СВЧ колебаний с электрореактивными параметрами двигательной установки.

В связи с этим проведено исследование условий возбуждения СВЧ колебаний в процессе отработки конструкции и реализации предельных режимов МПД двигателя. В экспериментах использовалась двигательная установка на основе ускорителя литиевой плазмы с коаксиальной геометрией электродов и внешним магнитным полем [5]. При проведении экспериментов предусматривалась установка анода с различным профилем внешней (расходящейся) части и смещением его относительно магнитной системы, что обеспечивало формирование структур разряда с различной конфигурацией электрического и магнитного полей и выносом разрядного тока за срез двигателя. При этом обеспечивалась возможность перехода от режимов электротермического механизма

ускорения плазмы к режимам ускорения, обусловленным взаимодействием холловского тока с внешним магнитным полем. Структура разряда в значительной степени определялась положением нейтральной вставки между катодом и цилиндрической частью анода, позволяющим формировать продольные токовые конфигурации в области катода и структуры с поперечным током во внешней области разряда. Режимы ускорения плазмы и соответствующие им характеристики СВЧ колебаний исследованы при следующих значениях эксплуатационных параметров установки: разрядного напряжения 20–60 В, тока 200–900 А, магнитного поля  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Т и расхода рабочего вещества 0.001–0.01 г/с при давлении остаточного газа в вакуумной камере экспериментальной установки  $\sim 10^{-1}$  Н/м<sup>2</sup>.

Регистрация СВЧ колебаний производилась по электромагнитному излучению двигателя в спектре частот ленгмюровских колебаний анодной области разряда с концентрацией электронов  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Разработанная методика измерений [1], основанная на сравнении с излучением эталонного газоразрядного источников, позволила определить интенсивность возбуждаемых в вакуумной камере СВЧ полей независимо от условий эксперимента и оценить степень превышения интенсивностью плазменных колебаний теплового уровня. В качестве основного параметра возбуждаемых СВЧ колебаний рассматривалась спектральная плотность потока энергии электромагнитного излучения  $S_f$  в единицах  $W/(m^2 \cdot MHz)$ . Определение величин  $S_f$  производилось с учетом размеров источника излучения МПД двигателя, соответствующих конфигурации анода на выходе плазменного потока из ускоряющей области разряда.

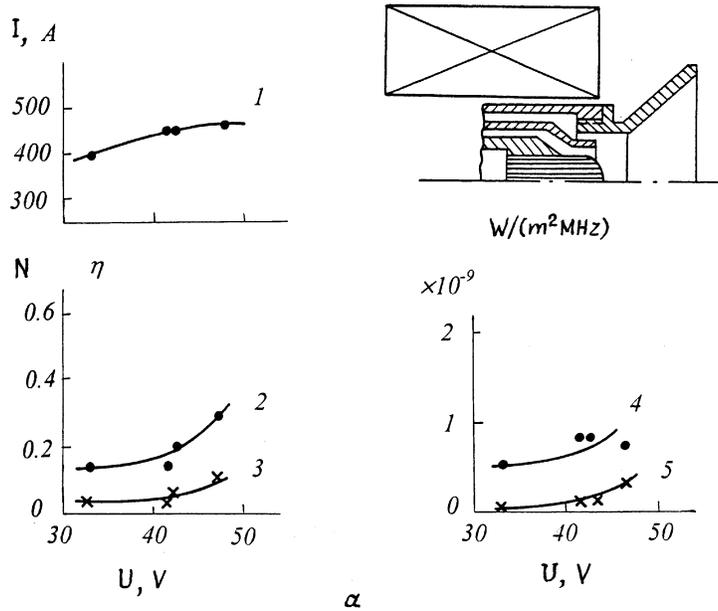
Одновременно с регистрацией СВЧ излучения проводились измерения прямым методом реактивной тяги двигательной установки  $R$ . При этом предусматривались меры, исключаящие влияние высокочастотных наводок из неравновесной области разряда и с излучающих элементов конструкции установки на датчик тягоизмерительного устройства. С этой целью производилось экранирование устройства и введение фильтров в измерительные цепи. Эти меры оказались достаточно эффективными, и в исследованных режимах при изменении напряжения в пределах вольт-амперной характеристики разряда относительное изменение сигнала с датчика составляло 1.5–2 при изменении интенсивности СВЧ полей, возбуждаемых двигателем, в пределах 1.5–2.5 порядков.

По измеренным значениям  $R$  производилось определение тяговой эффективности двигательной установки  $\eta = R^2 / (2\dot{m}I_0U_0)$  для заданных значений массового расхода рабочего вещества  $\dot{m}$ , разрядного тока  $I_0$  и приложенного напряжения  $U_0$ . Результаты измерений тяги использованы для определения средней скорости ионов в выходящем плазменном потоке  $v_i = R/\dot{m}$  и коэффициента преобразования  $\mu_i = v_i^2/v_{i0}^2$ , в котором  $v_{i0} = (2eU_0/m_i)^{1/2}$ ,  $m_i$  — масса ионов лития.

По совокупности характеристик СВЧ колебаний и электрореактивных параметров выделены конструкции двигательной установки с электротермическим режимом ускорения плазмы, соответствующие тепловому уровню интенсивности электромагнитного излучения. В этих режимах вольт-амперные характеристики разряда представляются в виде растущей зависимости тока от напряжения при значениях тяговой эффективности двигательной установки  $\leq 0.1-0.2$  и коэффициента преобразования  $\mu_i \sim 10^{-2}$ .

При формировании разряда в области расходящегося магнитного поля наблюдается переход в предельный режим по ограничению разрядного тока, при котором с превышением пороговых значений разрядного напряжения происходит генерация СВЧ колебаний с интенсивностью, на 2–4 порядка превышающей тепловой уровень. Возбуждение наиболее интенсивных СВЧ колебаний проявляется в высоковольтных областях вольт-амперных характеристик разряда, в которых наблюдается зависимость порогов возбуждения этих колебаний от напряжения, магнитного поля и расхода рабочего вещества.

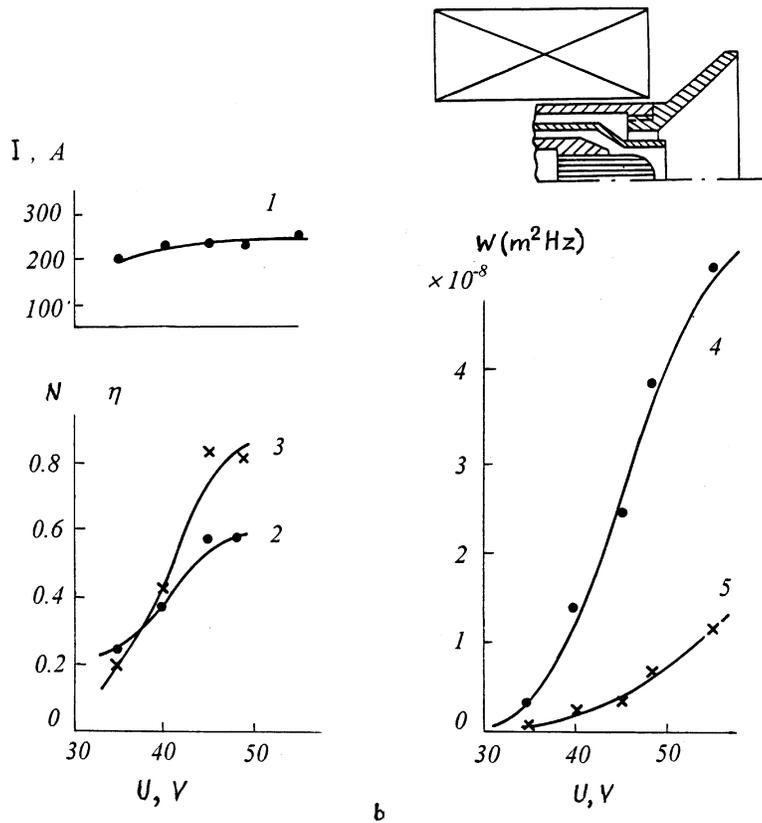
Результаты измерений электрореактивных параметров и интенсивности СВЧ колебаний представлены для двух моделей МПД двигателя, отличающихся длиной внутренней цилиндрической части анода, величиной разрядного тока и видом вольт-амперной характеристики. При растущей зависимости разрядного тока от напряжения (см. рисунок, *a*) тяговая эффективность двигателя не превышает 0.25 и возбуждаемые при этом СВЧ поля по порядку величины соответствуют тепловому уровню  $3 \cdot 10^{-11}$  W/(m<sup>2</sup>·MHz) на частоте 750 MHz и  $5 \cdot 10^{-10}$  W/(m<sup>2</sup>·MHz) на 3000 MHz при температуре электронов 5 eV. В предельном режиме при ограничении тока в значительной части вольт-амперной характеристики разряда интенсивность СВЧ полей, возбуждаемых во внешней области разряда, возрастает на 2–3 порядка (см. рисунок, *b*). В этих условиях при заданном расходе рабочего вещества в высоковольтной области разряда существенно возрастает тяга двигателя и его тяговая



Сопоставление интенсивности СВЧ излучения на частотах 750 и 3000 МГц с электрореактивными параметрами и конструкцией разрядной области МПД двигателя: 1 — разрядный ток  $I_0$ , 2 — тяга  $R$ , 3 — тяговая эффективность  $\eta$ , 4 — спектральная плотность СВЧ излучения  $S_f$  — 3000 МГц, 5 —  $S_f$  (a) и  $10S_f$  (b) — 750 МГц.

эффективность достигает 0.7. Оценки скорости ионов в выходящем плазменном потоке составляют  $(1-5) \cdot 10^4$  м/с при соответствующих значениях коэффициентов преобразования  $\mu_i \approx 0.2-0.3$ , что превышает значения, определяемые механизмами газодинамического и холловского ускорения плазмы. При этом эффективный потенциал электрического поля, ускоряющего ионы в плазменном потоке, составляет существенную часть от приложенного напряжения.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об определяющем вкладе СВЧ колебаний в формирование предельных режимов МПД двигателя; и возбуждением этих колебаний обусловлено увеличение тяговой эффективности двигательной установки. Следует отметить,



Продолжение рисунка.

ограничение на реализацию стационарного ускорения плазмы в предельных режимах, связанное с аномальным тепловыделением на аноде. В этих условиях температура анода достигает значений 2700–3000°C, что приводит к локальному плавлению материала анода (вольфрама), его последующему разрушению и прекращению функционирования двигателя. Это позволяет рассматривать механизм турбулентного нагрева плазмы в ускоряющем анодном слое, при котором проявляются эффекты турбулентного электронно-ионного трения и неизотермического уско-

рения плазмы во внешней области разряда. Помимо возрастания анодных потерь в предельных режимах, следует рассматривать возможный эффект разрушения ускоряющего анодного слоя вследствие рассеяния дрейфовых потоков электронов на СВЧ колебаниях. Таким образом, возбуждаемые в СВЧ диапазоне электромагнитные поля являются источником информации о динамике электронов в ускоряющей области плазмы, что расширяет возможности применения дистанционных средств диагностики процессов в плазменном двигателе [6].

## Список литературы

- [1] *Кирдяшев К.П.* Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [2] *Арефьев В.И., Кирдяшев К.П.* // ЖФТ. 1975. Т. 45. В. 3. С. 527–535.
- [3] *Глотова Н.Н., Кирдяшев К.П., Наумов Е.В., Острецов И.Н., Поротников А.А.* // Письма в ЖФТ. 1975. Т. 1. В. 10. С. 474–476.
- [4] *Глотова П.П., Кирдяшев К.П., Острецов И.П., Поротников А.А.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. В. 3. С. 506–513.
- [5] *Глотова Н.Н., Казанский В.И., Кирдяшев К.П., Острецов И.Н., Поротников А.А., Уткин Ю.А.* // ЖТФ. 1978. Т. 48. В. 7. С. 1381–1387.
- [6] *Кирдяшев К.П., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.