

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Ю. С. Бортников, В. А. Нестеров, И. Б. Рубашов

(Москва)

Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования электрогазодинамического движителя, предназначенного для создания тяги летательного аппарата. Получены расчетные соотношения, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Показано, что эффективность ЭГД — движителя может быть достаточно высока для целей практического применения.

Обозначения:

p — давление, V — скорость газа, ρ — плотность газа, ξ — коэффициент гидравлических потерь, E — напряженность электрического поля, ρ_i — плотность заряда, V_i — скорость носителей заряда, U — потенциал, j — плотность тока, ε — диэлектрическая постоянная, b — подвижность носителей заряда, F — площадь, R — тяга, η — коэффициент полезного действия.

При прохождении униполярных зарядов под действием электрического поля через диэлектрическую среду (жидкую или газообразную) возникает взаимодействие зарядов с нейтралами, благодаря которому энергия электрического поля может быть преобразована в кинетическую или потенциальную энергию всей среды.

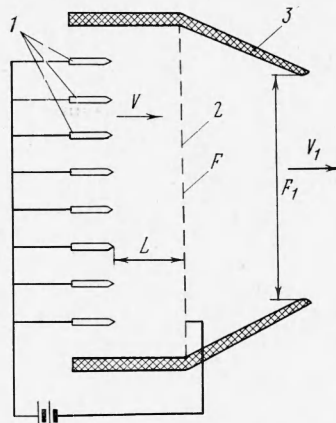
В настоящее время имеется ряд исследований по работающим на этом принципе ионно-конвекционным насосам, в которых при помощи коронного разряда осуществляется перекачка диэлектрических жидкостей [1, 2]. Использование «коронного ветра» в газах дает возможность создать особый движитель, способный работать в любой непроводящей атмосфере. Такой движитель можно назвать электрогазодинамическим. В отличие от ионного движителя в ЭГД-двигателе тяга создается за счет разгона при помощи ионов нейтральной рабочей среды (например, атмосферных газов), вследствие чего появляется возможность создания значительного импульса, достаточного для поддержания летательного аппарата в атмосфере.

Схема ЭГД-двигателя, составленного из параллельно установленных элементов, показана на фиг. 1. Отдельный элемент состоит из двух электродов 1 и 2, имеющих существенно различную кривизну (например, игла и сетка), и сопла 3. Заметим, что некороонирующий электрод и сопло конструктивно удобнее иметь общими на группу элементов, как это показано на фиг. 1. При наложении на электроды достаточной разности потенциалов между ними возникает коронный разряд. Образующиеся во внешней области короны униполярные ионы под действием имеющегося между электродами электрического поля двигаются в межэлектродном промежутке и вследствие их взаимодействия с нейтральными молекулами создают поток среды с некоторой скоростью V . Движение среды при помощи сопла 3 преобразуется в тягу.

Теоретический анализ работы ЭГД-двигателя заключается в расчете напор-расходных и вольт-амперных характеристик, определяемых из рассмотрения процессов во внешней области короны, и расчете тяговых характеристик, определяемых из рассмотрения течения газа в сопле.

Физические процессы во внешней области короны в условиях движущейся среды могут быть описаны при помощи общей системы электрогазодинамики [3]. Аналитическое решение такой системы затруднено. Однако ЭГД-двигатель — конкретное техническое устройство, и для его расчета и прогнозирования характеристик желательно иметь алгебраические соотношения, допускающие возможность широкого анализа. Подобный анализ с помощью численных решений весьма трудоемок и не всегда эффективен. По этой причине рассмотрим квазиодномерное приближение электрогазодинамической системы уравнений при дополнительном предположении о несжимаемости рабочей среды $\rho = \text{const}$. Такой подход оказался эффективным при решении аналогичной задачи о работе ионно-конвекционного насоса, квазиодномерная модель ЭГД-течения дала хорошее согласование с экспериментальными данными.

Использование электрогидродинамической системы уравнений для описания течения сжимаемой среды представляет собой некоторое допущение. Однако специально



Фиг. 1

проведенный анализ показал, что учет сжимаемости при числах $M \leq 0.7$ для реально реализующихся случаев изменяет характеристики ЭГД-течения не более чем на 10-15%. С учетом $\rho = \text{const}$ общая система уравнений в квазидномерном случае будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} - \frac{x}{x_1} \rho_i E + \frac{\xi}{x_1} \frac{\rho V^2}{2} &= 0, & \frac{dV}{dx} &= 0 \\ \frac{d(V_i \rho_i x)}{dx} &= 0, & V_i &= V + bE, & \frac{d(Ex)}{x dx} &= \frac{\rho_i}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (1)$$

Решая систему (1) способом, аналогичным приведенному в [2] при тех же граничных условиях, получаем выражения:

для вольт-амперной характеристики короны в движущейся среде

$$j = \frac{U}{L^2} \varepsilon b \left(\frac{U}{L} + \frac{V}{b} \right)$$

для напор-расходной характеристики ЭГД-двигателя

$$\Delta p = \varepsilon \frac{U^2}{L^2} - \xi \frac{\rho V^2}{2}$$

для затраченной электрической мощности

$$N_z = Uj = \frac{U^2}{L^2} \varepsilon b \left(\frac{U}{L} + \frac{V}{b} \right) \quad (2)$$

для полезной гидродинамической мощности

$$N_n = \Delta p V = \varepsilon V \frac{U^2}{L^2} - \xi \frac{\rho V^3}{2} \quad (3)$$

Здесь U — напряжение на коронирующем электроде, L — расстояние между электродами.

Коэффициент полезного действия ступени ЭГД-двигателя определяем как отношение полезной мощности к затраченной. Проведя оптимизацию величины N_n по скорости V , получим выражение для скорости потока V_* , при которой обеспечивается наибольшая гидравлическая мощность

$$V_* = \frac{U}{L} \left(\frac{2\varepsilon}{3\xi\rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

С учетом (4) из выражений (2), (3) получим величину оптимального к.п.д. ЭГД-двигателя

$$\eta_* = \frac{2}{3} \left[\left(\frac{3}{2} \xi \frac{\rho b^2}{\varepsilon} \right)^{1/2} + 1 \right]^{-1}$$

Из этого выражения видно, что оптимальное значение η_* зависит только от комплекса параметров рабочей среды $\rho b^2 / \varepsilon$ и коэффициента гидравлического сопротивления всего устройства ξ .

Для расчета тяговой характеристики рассмотрим силы (фиг. 1), действующие на сопло 3. Сила тяги R , которая направлена в сторону, противоположную направлению скорости, определяется из следующего баланса сил:

$$R = pF - p(F - F_1) + \rho V_1^2 F_1 - \rho V^2 F - p_1 F_1 \quad (5)$$

Приняв давление на срезе сопла равным давлению окружающей среды, т. е. $p_1 = p_0$, и обозначив $p - p_0 = \Delta p$, из соотношения (5) после преобразований получим

$$R = F_1 \Delta p + \rho V_1^2 F - \rho V^2 F \quad (6)$$

Отсюда, пользуясь уравнением Бернулли и уравнением неразрывности

$$\rho V_1^2 = 2\Delta p + \rho V^2, \quad F_1 V_1 = FV$$

можно получить зависимость силы тяги, отнесенной к единице площади активной зоны ЭГД-двигателя F , от скорости потока в активной зоне V и величины создаваемого напора Δp

$$r = \frac{R}{F} = (3\Delta p + \rho V^2) \left(\frac{\rho V^2}{2\Delta p + \rho V^2} \right)^{1/2} - \rho V^2 \quad (7)$$

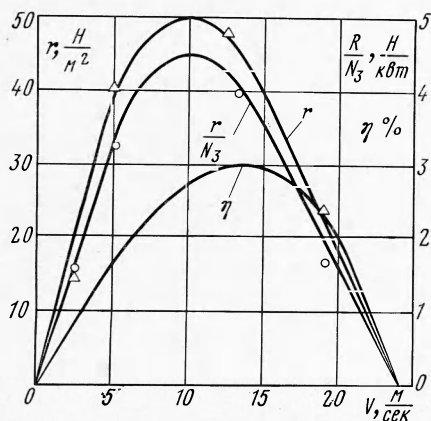
Соотношение (7) позволяет по известной напор-расходной характеристике (3) определять «миделеву» тягу двигателя r , при этом необходимое для осуществления данного режима работы двигателя соотношение площадей диффузора определяется из соотношения

$$\frac{F_1}{F} = \left(\frac{\rho V^2}{2\Delta p + \rho V^2} \right)^{1/2}$$

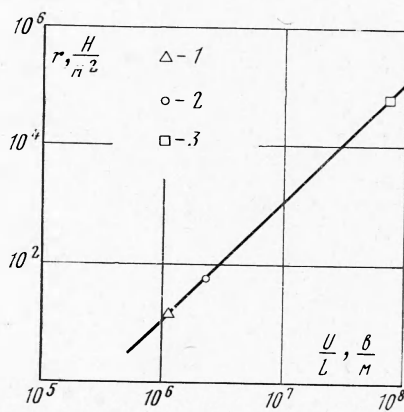
Подставляя в (7) выражение (4), получаем соотношение для оптимальной тяги

$$r_* = \frac{2}{3} \varepsilon \frac{U^2}{L^2} \frac{1}{\xi} \left[\frac{3\xi + 1}{(2\xi + 1)^{1/2}} - 1 \right]$$

Из этого выражения следует, что оптимальная миделева тяга ЭГД-двигателя определяется главным образом величиной U/L , т. е. отношением приложенного напряжения к межэлектродному расстоянию. Величина U/L ограничена областью существования короны по приложенному напряжению. Верхняя граница U/L соответствует переходу короны в искровой пробой, при котором работа ЭГД-двигателя невозможна. Ограничение U/L означает, что физически на единицу активной площади можно вложить мощность не более некоторой величины, определяемой пробойным напряжением. В связи с этим наиболее приемлемой атмосферой для работы ЭГД-двигателя будут газы с повышенной плотностью и среды, содержащие галогено-фтористые соединения, которые, как известно, отличаются повышенной пробойной напряженностью. Заметим, что повышение плотности приводит к уменьшению подвижности ионов и, соответственно, к увеличению η .



Фиг. 2



Фиг. 3

На фиг. 2 приведены расчетные зависимости тяги r , коэффициента полезного действия η и отношения тяги к прикладываемой мощности R/N_3 от скорости V для работы ЭГД-двигателя в воздухе при нормальных условиях. Как видно из фиг. 2, все величины имеют максимумы при определенной скорости и обращаются в нуль при $V = 0$ и при $V = V_{\max}$ соответствующих нулевому напору $\Delta p = 0$.

Уровень характеристик ЭГД-двигателя в воздухе при нормальных условиях невысок

$$\eta \approx 3\%, \quad r \approx 50 \text{ н/м}^2$$

В атмосфере Венеры, состоящей, по последним данным, из углекислого газа при давлении $\sim 100 \text{ бар}$, миделева тяга и η ЭГД-двигателя могут достигнуть соответственно

$$r \approx 10^5 \text{ н/м}^2, \quad \eta \approx 40\%$$

Это обуславливается значительно более высоким давлением рабочей среды ЭГД-двигателя.

На фиг. 3 представлена зависимость оптимальной миделевой тяги ступени ЭГД-двигателя от диэлектрических свойств среды, точнее от отношения пробойного напряжения к соответствующему межэлектродному расстоянию U/L . Фиг. 3 определяет конструктивную целесообразность применения ЭГД-двигателя в тех или иных условиях. В частности, точка 1 соответствует условиям атмосферы Земли, точка 2 — атмосферы Венеры, а точка 3 — условиям в диэлектрических жидкостях.

Для проверки теоретических выводов была изготовлена и испытана летающая модель ЭГД-двигателя. Модель представляет собой две параллельные, скрепленные между собой изолятором рамы (площадью 100 см^2), к которым подводилась регулируемая разность потенциалов порядка $10 \div 15 \text{ кв}$. На верхней раме перпендикулярно ее плоскости закреплены 50 игл на расстоянии 10 мм одна от другой. На нижнюю раму натянута металлическая сетка. Отверстия сетки служат соплом, так как ее «живое» сечение меньше общей площади рамы. Подбором сетки с различным живым сечением регулировался режим работы ЭГД-двигателя по скорости.

В экспериментах измерялись вольт-амперная и тяговая характеристики ЭГД-двигателя. Тяга определялась по весу модели в режимах, когда подъемная сила полностью уравновешивала силу земного притяжения и модель зависала в воздухе, не поднимаясь и не опускаясь.

На фиг. 2 на теоретические кривые нанесены экспериментальные точки. Удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных показывает пригодность квазиоднородной теории для целей расчета и прогнозирования характеристик ЭГД-двигателя.

ЭГД-двигатели обладают специфическими свойствами, которые определяют область их применения. В атмосфере Земли ЭГД-двигатель не может конкурировать с другими типами двигателей вследствие меньших значений η и развиваемых миделевых тяг. Однако в атмосферах планет с высоким давлением и составом газов, обладающих большой электрической прочностью, ЭГД-двигатели вполне конкурентноспособны, учитывая их простоту, отсутствие движущихся частей, отсутствие необходимости в запасе рабочего тела и т. д. Кроме того, ЭГД-двигатели могут быть использованы для передвижения деталей приборов, датчиков и т. п. в диэлектрических жидкостях.

Поступила 4 VII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Stuetzer O. M. Ion drag pumps. J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, No. 1.
2. Бортников Ю. С., Нестеров В. А., Рубашов И. Б. Исследование характеристик ступеней ионно-конвекционного насоса. ПМТФ, 1968, № 4.
3. Бортников Ю. С., Рубашов И. Б. Некоторые вопросы исследования системы уравнений электрогазодинамики. Магнитная гидродинамика, 1968, № 2.

УДК 537.525.1

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ДИОДЕ

А. С. Маргевич, А. В. Потапов

(Москва)

На основе систематических численных расчетов дугового разряда в коаксиальном межэлектродном зазоре получены зависимости падений потенциала, концентрации и температуры электронов от величины плотности тока, давления плазмы, азимутального магнитного поля и расстояния между электродами. Сделаны общие выводы по наблюдающимся закономерностям.

Разряд низкого давления исследовался во многих теоретических и экспериментальных работах, например [1-3].

В данной работе рассматривается изменение параметров плазмы в цилиндрическом диоде с азимутальным магнитным полем в зависимости от условий разряда. Внутрен-