

УДК 629.7.087:538.4:001.2

С.Н. КУЛАГИН, А.В. ХИТЬКО, Л.Г. ДУБОВИК

Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХОЛЛОВСКОМ ДВИГАТЕЛЕ

Показано, что учет скорости потока атомов и потерь ионов в известной математической модели позволяет получить более точное количественное совпадение расчетных и экспериментальных характеристик холловского двигателя.

математическая модель, холловский двигатель, скорость потока атомов, потери ионов, зона ионизации, интегральные характеристики, точность расчетов

Введение

Численное моделирование является эффективным методом исследования рабочих процессов в плазменных двигателях и позволяет оптимизировать характеристики уже имеющихся двигателей, а также прогнозировать характеристики вновь разрабатываемых, что значительно сокращает материальные затраты на проведение экспериментальных исследований.

Формулирование проблемы. Известна одномерная модель процессов в холловском двигателе (ХД), основанная на предположении, что перенос электронов поперек магнитного поля происходит за счет столкновений с атомами ускоряемого вещества [1]. Однако анализ результатов расчета характеристик двигателя по данной модели показывает, что, несмотря на качественное совпадение расчетных и экспериментальных характеристик, количественно они отличаются.

Решение проблемы

Картина физических процессов в ХД весьма сложна, поэтому для построения даже одномерной математической модели приходится вводить некоторые допущения [2]:

– зона ионизации и ускорения (ЗИУ) локализуется в области максимальных значений индукции

магнитного поля в разрядной камере;

– поперечная подвижность электронов определяется лишь классическими механизмами переноса;

– обеспечение энергией всех «прикатодных» процессов, связанных с получением требуемого потока электронов с катода, осуществляется за счет разности потенциалов между эмиттером катода и струей плазмы из разрядной камеры;

– напряженность электрического поля в ЗИУ постоянна;

– величина «сквозного» электронного тока определяется параметрами плазмы на выходной границе ЗИУ;

– величина плотности продольного электронного тока в ЗИУ определяется только столкновениями электронов с атомами и стенками канала;

– ионизация атомов – электронным ударом из основного (невозбужденного) состояния однократная (ступенчатой ионизацией через метастабильные и резонансные уровни пренебрегаем);

– влияние магнитного поля на траектории ионов не учитываем (ионы считаем незамагниченными);

– плазма в ЗИУ квазинейтральна;

– функция распределения электронов по энергиям полагается Максвелловской с температурой T_e .

Постановка задачи исследований. Задачей проведенных исследований являлось повышение

точности расчетов основных характеристик холлового двигателя.

Результаты исследований. Для повышения точности расчетов в математической модели [1] вместо тепловой скорости атомов V_a используется скорость направленного движения потока атомов в направлении от анода к срезу двигателя $V_{n.a}$ [3]:

$$V_{n.a} = \frac{2}{3} \frac{h}{L} V_a, \quad (1)$$

где $V_a = \sqrt{\frac{8kT_a}{\pi M}}$;

L, h – длина и ширина РК;

T_a – температура анода;

M – масса атома.

Полученные расчетные и экспериментальные вольт-амперные и тяговые характеристики для двигателя с наружным диаметром разрядной камеры 38 мм (условное название Д-38) при работе на ксеноне с расходом $\dot{m} = 0,49$ мг/с приведены на рис. 1, 2.

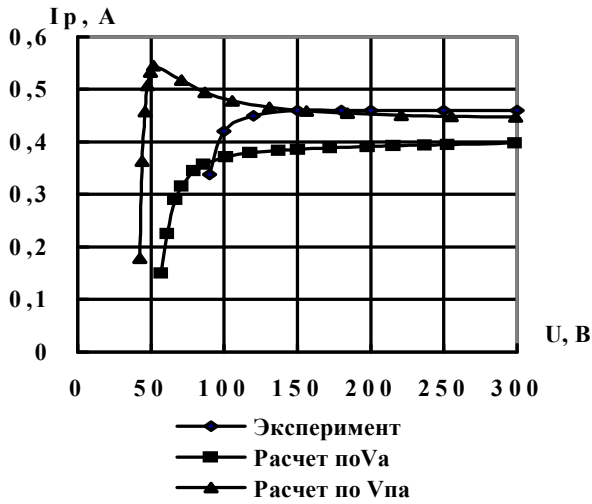


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики Д-38

Для дальнейшего улучшения количественного совпадения экспериментальных и расчетных характеристик необходимо учитывать потери ионов на стенках РК.

Как показано в работе [4], на стенках «гибнет» до 50 % первично ионизированных атомов, которые ионизируются затем вторично. Часть ионов, попав-

ших на стенку, вторично не ионизируется и дает вклад только в разрядный ток, не создавая тяги. Эти прямые потери, по оценкам, приведенным в [5], составляют ~3 % от суммарного расхода через анод для модели АТОН.

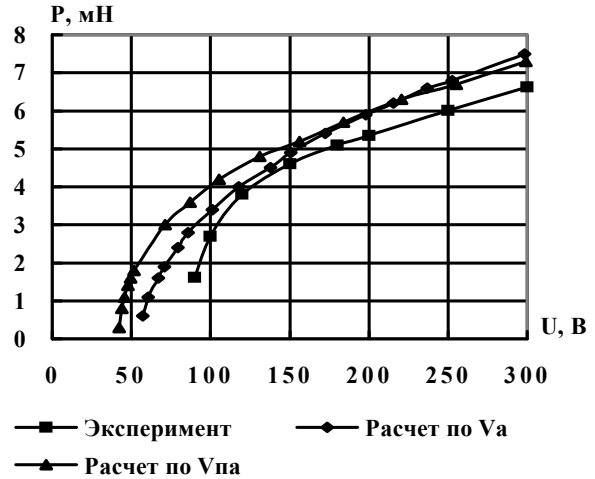


Рис. 2. Тяговые характеристики Д-38

Долю ионов α , выпадающих на стенки, от общего числа родившихся в канале можно определить по выражению [6]:

$$\alpha = 1 - \exp\left[-\frac{8L}{3h} \sqrt{\frac{\Phi_m}{U - \varphi_c}}\right]. \quad (2)$$

где φ_c – потенциал на срезе канала;

Φ_m – максимальное значение потенциала.

При вычислении α следует учитывать, что часть ионов, выпадающих на стенки, ионизируется вторично. Это эквивалентно уменьшению L . Поэтому при вычислении доли ионов, гибнущих без повторной ионизации, в выражение (2) вместо полной длины L необходимо подставить длину зоны потерь ионов L_2 . За L_2 можно принять расстояние от переднего среза разрядной камеры до сечения, в котором начинается заметное ускорение ионов [6].

В процессе исследований подбирались значения L_2 , при которых расчетные значения тяги максимально совпадали с экспериментальными при фиксированных значениях расхода рабочего тела и близких значениях разрядного напряжения.

С этой целью при расчете характеристик с использованием модели [1] из полученного полного ионного тока вычитался ток ионов, «гибнущих» на стенках РК без повторной ионизации.

Полученные характеристики и значения L_2 для моделей с различными диаметрами РК, разработанных в ДНУ, представлены в табл. 1. Там же приведены значения отношения $B_{rL_2} / B_{r \max}$, где B_{rL_2} – магнитная индукция в точке, соответствующей L_2 ; $B_{r \max}$ – максимальное значение B_r .

Таблица 1

Характеристики ХД с различными диаметрами РК

Двигатель	\dot{m} , мг/с	Эксперимент			Расчет				
		U_p , В	I_p , А	P , мН	U_p , В	I_p , А	P , мН	L_2 , мм	$B_{rL_2} / B_{r \max}$
Д-38	0,49	150	0,45	4,5	150,3	0,44	4,5	2,9	0,99
Д-29	0,90	150	1,30	10,0	172,0	1,29	10,0	0,1	0,87
Д-33	1,30	155	1,20	10,0	154,3	1,25	10,5	1,3	0,90
Д-50	1,50	152	1,54	14,0	149,7	1,54	14,0	0,9	1,00
Д-97	3,25	150	3,50	35,0	173,0	3,50	35,0	0,1	1,00

Из таблицы видно, что для исследованных двигателей значения L_2 отличаются довольно значительно (от 0,1 до 2,9 мм), что связано с отличиями в конструкциях, однако при этом значения отношения $B_{rL_2} / B_{r \max}$ весьма близки и лежат в пределах 0,87 – 1, при этом среднее значение $B_{rL_2} / B_{r \max} = 0,94$.

Таким образом, для проведения расчетов с приемлемой точностью L_2 следует определять из графика распределения магнитной индукции по положению точки, в которой $B_{rL_2} / B_{r \max} \approx 0,94$ (среднее значение из табл. 1). Распределение магнитного поля может быть получено расчетным путем на этапе проектирования либо прямыми измерениями в РК экспериментального образца.

На рис. 3 – 6 приведены экспериментальные и расчетные (с учетом влияния скорости потока атомов и потерь ионов на стенках РК) характеристики двигателя Д-38 при $L_2 = 2,9$ мм, полученном из распределения магнитного поля при $\dot{m} = 0,49$ мг/с, $B_{rL_2} / B_{r \max} = 0,94$.

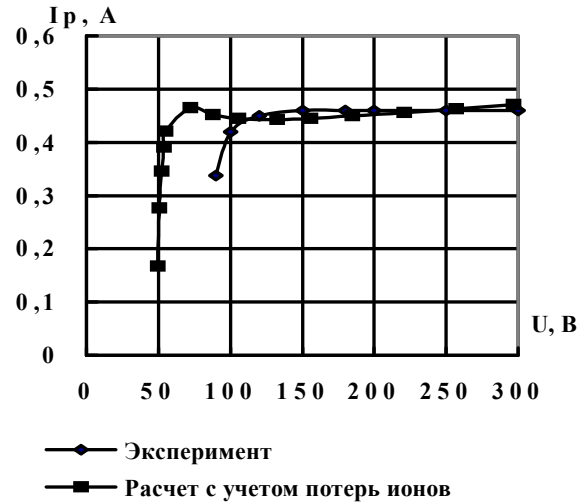


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики Д-38

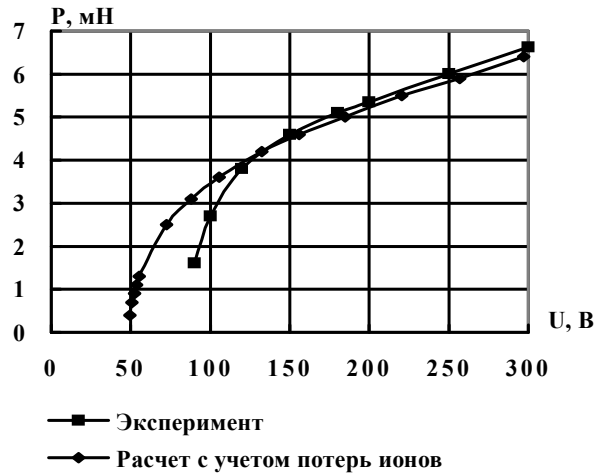


Рис. 4. Тяговые характеристики Д-38

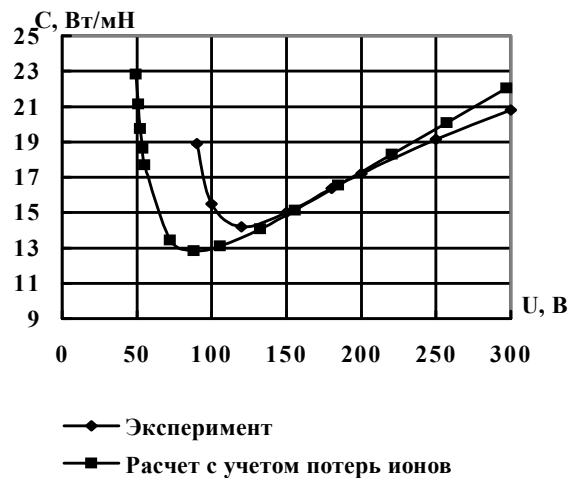


Рис. 5. Зависимость цены тяги Д-38 от разрядного напряжения

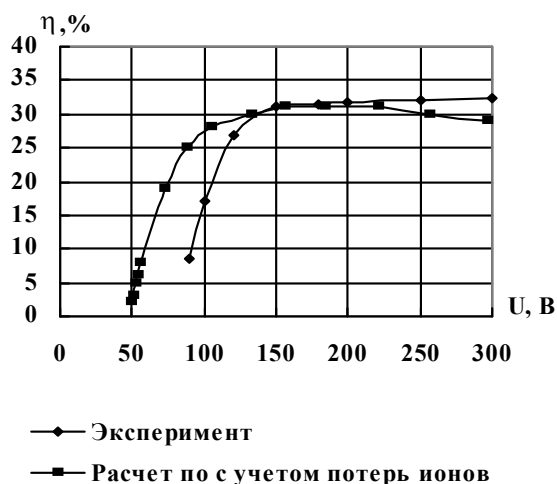


Рис. 6. Зависимость КПД Д-38 от разрядного напряжения

Из приведенных рисунков видно, что учет в математической модели скорости потока атомов и потери ионов на стенках РК позволяет получить более точное совпадение расчетных и экспериментальных характеристик.

Заключение

Проведенные исследования показали, что для увеличения точности расчета интегральных характеристик ХД с использованием математической модели, описанной в [1], необходимо учитывать скорость потока атомов и потери ионов на стенках РК. При этом необходимая для расчета длина зоны потери ионов без вторичной ионизации L_2 может быть определена из графика распределения магнитной индукции по положению точки, в которой $B_{rL_2} / B_{r\max} \approx 0,94$.

Литература

1. Белан Н.В. Физико-математическая модель процессов в плазменных двигателях с азимутальным дрейфом электронов: Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Н.В. Белан, В.Д. Олендарев, А.И. Оранский. – Х.: ХАИ, 2001. – 90 с.
2. Стационарные плазменные двигатели / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский и др. – Х., 1989. – 316 с.
3. Асхабов С.Н. Кинетика частиц многокомпонентной плазмы в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) // Физика плазмы. – М., 1983. – Т. 9, № 4. – С. 740-746.
4. Бишаев А.М., Ким В. Исследование локальных параметров плазмы в УЗДП // ЖТФ. – 1978. – Т. 48, № 9. – С. 1853-1857.
5. Стационарный плазменный ускоритель – двигатель АТОН / А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.В. Десятков и др. // Физика плазмы. – 1977. – Т. 23, № 17. – С. 635-645.
6. Рудиков А.И. Расчетно-теоретическое исследование динамики ионов в УЗДП // Источники и ускорители плазмы: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Х.: ХАИ, 1985. – № 9. – С. 3-8.

Поступила в редакцию 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.