

УДК 533.9.07

**А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО, Н.Н. КОШЕЛЕВ, В.А. ФЕДОТЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МСПД**

В работе рассмотрена проблема влияния положения катода-компенсатора на интегральные характеристики стационарного плазменного двигателя малой мощности. Приведены экспериментально полученные зависимости разрядного тока, тяги, КПД и эрозии двигателя от положения катода в заданной области вблизи среза двигателя при различном угловом позиционировании. Показано что положение катода относительно МСПД в значительной мере влияет на его разрядные, тяговые и эрозионные характеристики. Выдвинуто предположение, что влияние положения катода возможно за счет повышения концентрации РТ в районе среза двигателя.

**стационарный плазменный двигатель, катод-компенсатор, тяговый КПД, оптическая эмиссионная спектроскопия****Введение**

**Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** Для стационарных плазменных двигателей малой мощности (МСПД) остро стоит проблема повышения эффективности его работы, а также улучшение ресурсных характеристик. Немаловажную роль играет катод-компенсатор, который непосредственным образом влияет на кпд двигателя за счет прикатодного падения потенциала (эффективность использования приложенного напряжения для ускорения ионов), а также за счет энергии и расхода рабочего тела, затрачиваемых для обеспечения его функционирования. Опыт показывает, что наибольшими преимуществами в данном плане обладают безнакальные полые катоды [1]. Однако помимо указанных моментов открытым остается вопрос рационального расположения катода относительно МСПД, т.к. в данном случае свою роль начинают играть габариты катода и соотношения массовых расходов, имеющие значительные отличия от отработанных схем для СПД большого и среднего класса.

**Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем.** В процессе многолетнего опыта исследований СПД большого и среднего класса, а также практики

их применения на КЛА, были реализованы различные схемы размещения катода относительно двигателя. Здесь руководствовались как конструктивными соображениями, обеспечивая минимальное воздействие ионного потока на корпус катода, так и соображениями обеспечения эффективности двигателя. Однако и на сегодняшний день продолжают работы в данном направлении [2].

Для МСПД этот вопрос менее изучен, т.к. при размещении катодов руководствуются опытом полученным для больших двигателей. Также мало освещен вопрос влияния положения катода на эрозионные характеристики.

**Цель исследований.** Целью работы является исследование влияния положения катода-компенсатора на эффективность работы МСПД, а также на его эрозионные характеристики.

**Результаты исследований**

Исследования проводились на двигателе разработки «ХАИ» СПД-20М. Двигатель был установлен на тягоизмерительном устройстве, позволяющем измерять тягу порядка 5мН (0,5гс) с расчетной точностью 2-3%. Перемещение катода при этом обеспечивалось при помощи 2-х координат-

ного устройства вдоль оси двигателя и в радиальном направлении. Также изменялось угловое положение катода относительно оси двигателя. Ось поворота катода проходила через диафрагму. Область перемещения катода – 30x30мм, шаг перемещения – 5мм. Углы поворота катода относительно оси двигателя: 90°, 45°, 60°, 30°. В нулевом положении диафрагма катода отстоит от среза двигателя на 6,5 мм и на 43,5мм от оси двигателя. Схема эксперимента с обозначенной областью перемещения отображена на рис. 1.

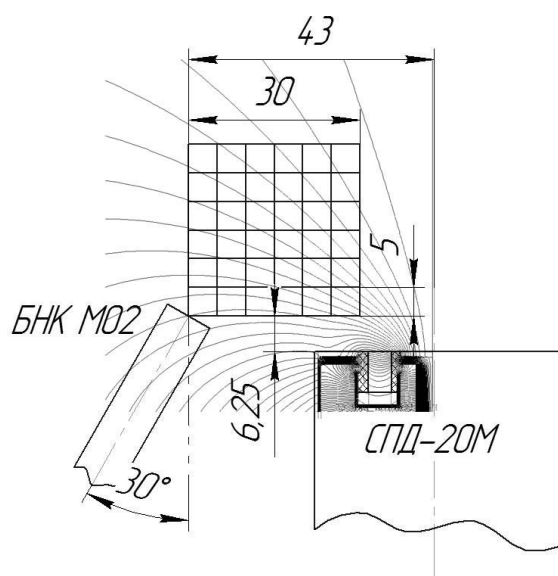


Рис. 1. Схема эксперимента

В каждой узловой точке измерялись следующие параметры: разрядный ток, тяга, а также проводились спектроскопические исследования струи плазмы двигателя для определения эрозионных характеристик. При этом были фиксированы массовый расход (0,25мг/с), разрядное напряжение (300В), ток в катушке намагничивания. По причине невозможности позиционирования катода, повернутого на угол отличный от 90°, в определенных точках измерения не производились. Эрозионные характеристики МСПД определялись при помощи метода основанного на оптической эмиссионной спектрометрии (ОЭС), который был разработан нашими французскими коллегами [3-5] и уже неоднократно опробован в совместных исследованиях [6]. Данный метод позволяет оценить мгновенную эрозию керамики разрядной камеры

(РК), а после калибровки получить и количественные значения эрозии. Результаты экспериментов сведены в табл. 1 в виде контурных графиков, для каждого из которых обозначены минимальные и максимальные значения параметров.

Из полученных результатов видно, что при расположении катода под 90° к оси двигателя по мере его приближения к струе, как по радиальному, так и по осевому направлениям, разрядный ток, тяга и эрозия увеличиваются. При этом область с максимальным КПД не совпадает с областью максимальной тяги (т.е. скорость роста разрядного тока больше, чем тяги).

Для 60° область с максимальным КПД и эрозией смещается вперед относительно среза двигателя на 15-20мм. Область минимума по току и тяге расположена ближе к струе на максимальном удалении от среза.

Для 45° разрядный ток, тяга, КПД и эрозия ведут себя практически одинаково. Явно выделяются две области, разделенные характерным «оврагом», отстоящим на 10мм от среза, вблизи среза наблюдается возрастание значений по мере приближения к оси двигателя; во второй области картина меняется на противоположную.

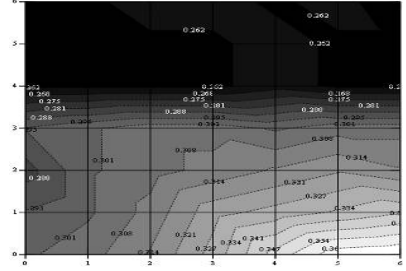
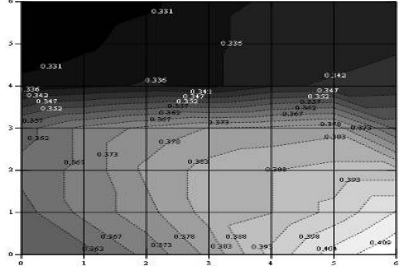
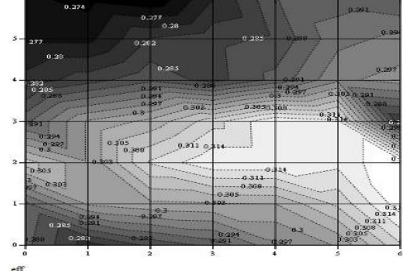
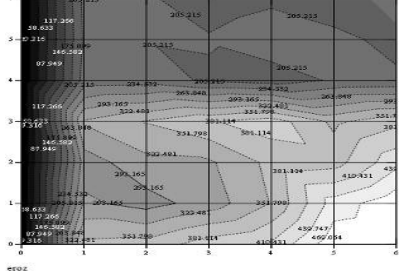
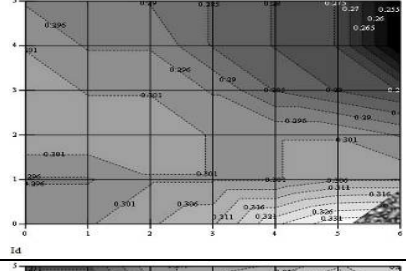
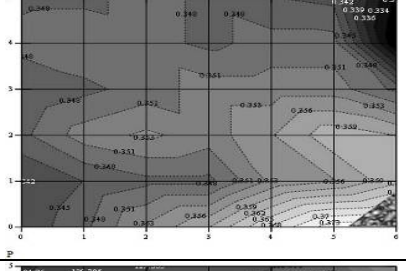
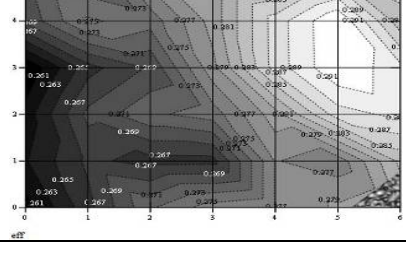
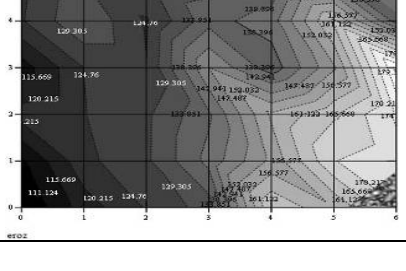
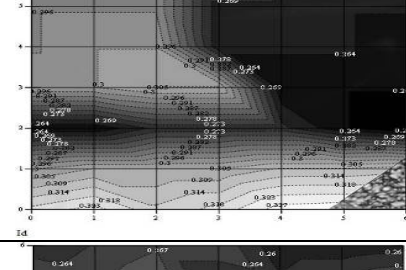
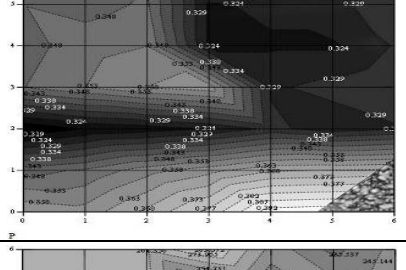
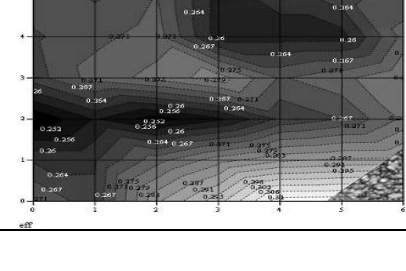
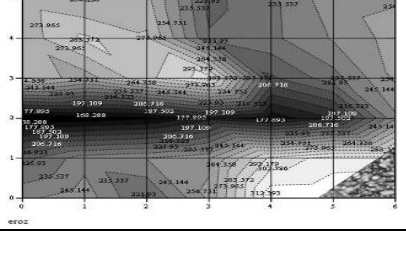
Для 30° наблюдается менее выраженное изменение разрядного тока, а также возрастание эрозии как по мере удаления катода от среза двигателя, так и по мере его приближения к струе.

При этом нужно отметить, что разброс по КПД двигателя в зависимости от угла поворота катода при его перемещении составляет для 90° – 4,9%; 45° – 6,6%; 60° – 3,4%; 30° – 2,8%.

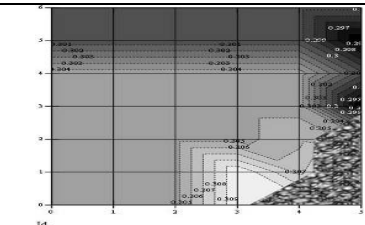
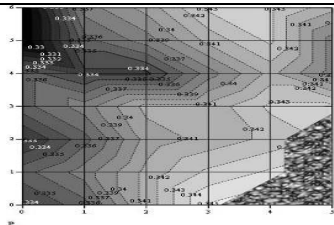
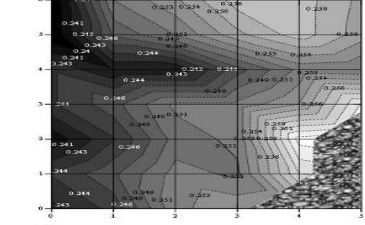
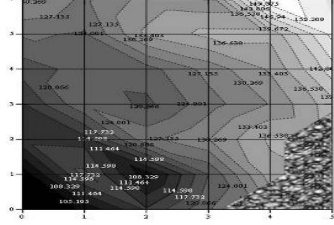
Максимальный КПД был получен при расположении катода под 90° в ближайшей точке к двигателю (катод при этом вне угла раскрытия струи двигателя) и составил 32%, однако в то же время эрозия составила максимальное значение. Для 45° максимальный КПД меньше на 0,5%, однако, эрозия при этом меньше в 2 раза.

Таблица 1

Результаты экспериментов

<b>90°</b>			
	<p>Разрядный ток min=0,262 А; max=0,367 А</p>		<p>Тяга min=0,326 гс max=0,414 гс</p>
	<p>Тяговый КПД min=0,271 max=0,320</p>		<p>Скорость эрозии min=191 max=607</p>
<b>60°</b>			
	<p>Разрядный ток min=0,250 А max=0,335 А</p>		<p>Тяга min=0,328 гс max=0,375 гс</p>
	<p>Тяговый КПД min=0,259 max=0,293</p>		<p>Скорость эрозии min=106 max=183</p>
<b>45°</b>			
	<p>Разрядный ток min=0,255 А max=0,332 А</p>		<p>Тяга min=0,314 гс max=0,397 гс</p>
	<p>Тяговый КПД min=0,248 max=0,314</p>		<p>Скорость эрозии min=159 max=322</p>

Окончание табл. 1

<b>30°</b>			
	Разрядный ток min=0,295 А max=0,311 А		Тяга min=0,329 гс max=0,347 гс
	Тяговый КПД min=0,238 max=0,266		Скорость эрозии min=102 max=155

### Перспективы дальнейших исследований

Для объяснения полученного эффекта необходимо более подробное исследование параметров плазмы. Так применение зондовой диагностики позволит исследовать изменение ионного тока и распределения потенциала за срезом двигателя (где по некоторым данным срабатывает до 20% разрядного напряжения) от положения катода, а также при помощи многосеточных зондов для исследования изменения энергетического спектра ионов и угла раскрытия струи.

### Заключение

Экспериментальным путем было показано, что положение катода относительно МСПД может в значительной мере влиять на его разрядные, тяговые и эрозийные характеристики. Исходя из поведения разрядного тока и тяги, выдвигается предположение, что влияние положения катода в основном происходит из-за повышения концентрации РТ в районе среза двигателя за счет катодного массового расхода, значения которого для МСПД могут составлять порядка 20% от общего.

Авторы работы приносят благодарность Кислицыну А.П. и французским коллегам D. Pagnon и M. Dudeck за ценные замечания и обсуждение результатов, а также за любезно предоставленный спектрометр HR2000.

### Литература

1. Koshelev N.N., Loyan A.V. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster // IEPC-2007-103, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
2. Jason D. Sommerville, Lyon B. King, Effect of Cathode Position on Hall-Effect Thruster Performance and Cathode Coupling Voltage // IEPC-2007-078, 30d IEPC, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
3. Control of the ceramic erosion by optical emission spectroscopy during performance measurements on the X000-ML 5 kW Hall effect thrusters // 29th IEPC, Princeton - USA, November 1-4, 2005.
4. 40th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, (July 11-14, 2004) // AIAA/ASME/SAE/ASEE, AIAA04-3773.
5. Control of the ceramic erosion by Optical Emission Spectroscopy: results of PPS1350-G measurements // 4th ISPC, Sardinia, Italia, June 2-4, 2004.
6. Ukrainian SPT-20 Hall Effect Thruster: Analysis of the Plume by Optical Emission Spectroscopy / D. Pagnon, S. Pellerin, M. Dudeck, A.V. Loyan, T.A. Maksymenko, N.N. Koshelev // EPC-2007-361, 30d IEPC, Florence, Italy, September 17-20, 2007.

Поступила в редакцию 1.06.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.