

УДК 533.9.07

Н.Н. КОШЕЛЕВ, А.В. ЛОЯН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГЕКСАБОРИДНЫХ
И БАРИЕВЫХ КАТОДОВ В СОСТАВЕ СПД-70**

Проведены экспериментальные исследования прикатодной области плазмы двух типов катодов в двигательном режиме с помощью зондовой диагностики. Представлены пространственные распределения параметров плазмы.

стационарный плазменный двигатель, полый катод, зондовая диагностика, параметры плазмы, термоэмиссия

Введение

Условие работы стационарного плазменного двигателя (СПД) предполагают наличие в его составе источника электронов, геометрически с центральным, или более используемым, внешним расположением относительно двигателя. Наиболее используемыми, по ряду причин, являются газовые полые катоды. Вместе с тем этот тип катодов представлен многообразием, как по конструкции, так и по материалам эмиссионных вставок, способу запуска, методам нагрева до рабочей температуры, количеством массового расхода и др., что приводит к тем или иным режимам их работы. Наиболее заметные различия в работе катодов в диодном режиме проявляются в характере внешнего столба плазмы примыкающей к диафрагме. Известные накаливаемые катоды на основе LaB_6 работают с распределенным факелом (plume mode), их электрические параметры характеризуются высоким разрядным напряжением. Однако известны катоды с более низким разрядным напряжением и с «темным» внешним столбом (spot mode) разряда, использование которых может повысить КПД двигателя до 20%. [1]

Качество работы в составе СПД и тех и других катодов сложно определить по выходным характеристикам двигателя, однако по изменениям параметров плазмы во внешнем столбе прикатодной области разряда можно показать отличия.

**Испытательная база
и методика измерений**

Аппаратура для исследования прикатодной плазмы включала в себя измерительно-управляющее устройство, ПК, систему перемещения зонда, а также алгоритмы управления координатным устройством, процессом измерения, статистической обработкой данных, расчету и хранению параметров, что позволило получить пространственные распределения данных о среднестатистических характеристиках плазмы (температуре электронов, концентрации и потенциале плазмы) в реальном масштабе времени.

Измерения проводились цилиндрическим зондом, как наименее возмущающим плазму, направленным параллельно потоку движущейся плазмы (в испытаниях с СПД) при допущениях: что функция распределения электронов по энергиям близка к Максвелловской; зонд работает в молекулярном режиме, т.е. радиус Дебая много меньше, а ларморовский радиус много больше размеров зонда. Все эти предположения проверены измерениями и расчетами. Размер Дебая составил не больше 10 мкм, при радиусе зонда 100 мкм, а максимальная магнитная индукция не превышала 3,2 мТл, что соответствует Ларморовскому радиусу более чем 100 мкм.

Методическая погрешность измерения температуры электронов (T_e) не превышает 15%, потенциа-

ла плазмы – 20%, концентрации электронов – 40%. Случайная погрешность измерений зависела от режима работы катодов, проявлениями зашумленности сигналов и флуктуации плазмы, которые могли приводить к большой величине разброса параметров (до 100%). Для повышения достоверности полученных результатов в процессе измерений проводилась статистическая обработка.

Оборудование для проведения работ состояло из вакуумной камеры объемом 1,5 м³ с откачкой двумя турбомолекулярными насосами до предельного давления 5·10⁻⁶ тор и давления с номинальным рабочим расходом 8·10⁻⁵ тор по ксенону. Камера укомплектована измерительными средствами: расхода – двухканальным задатчиком с точностью измерения 1%; параметров электрических цепей с точностью 2%, и регулируемые блоками питания разряда, соленоида, накала и поджига с коэффициентами пульсаций не более 0,5.

Программа и результаты эксперимента

Испытания катодов проводились в диодном (на плоский анод) и двигательном режимах, которые располагались в 15 мм от среза струи СПД, при этом, измерения распределений параметров плазмы охватывали область выходного отверстия катода размерами 10x10мм с шагом 1мм.

На рис. 1, 2 представлены распределения параметров плазмы прикатоной области разряда двух типов катодов, работающих в диодном режиме при различных массовых расходах. По результатам видно, что накаливаемый гексаборидный катод слабо изменяет свои параметры с изменением расхода из-за постоянной тепловой поддержки 20 ватт. Такие условия работы катода позволяют сохранять термоэмиссию вплоть до расхода 0,1 мг/с, однако при этом вид внешнего столба соответствует распределенному режиму с высоким разрядным напряжением. Напротив, безнакальный бариевый катод переходит в распределенный режим только при нижнем пределе рас-

хода, оставаясь при более высоких расходах в режиме «потухшего» столба. Объяснение этому является увеличение проводимости плазменного столба более высокой концентрацией электронов.

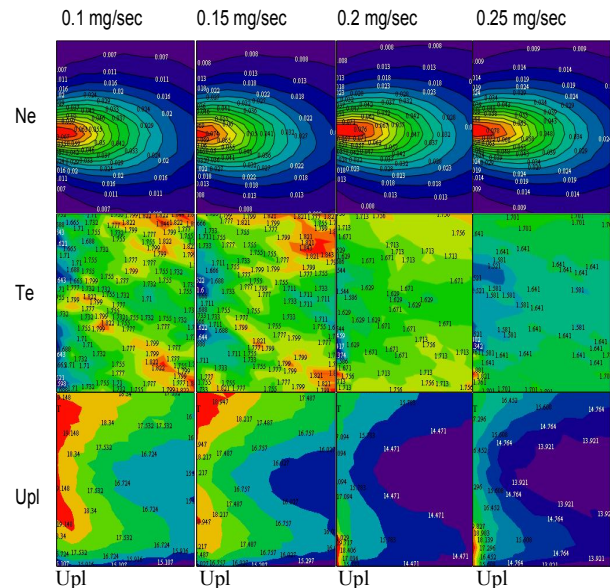


Рис. 1. Накаливаемый катод (НК)

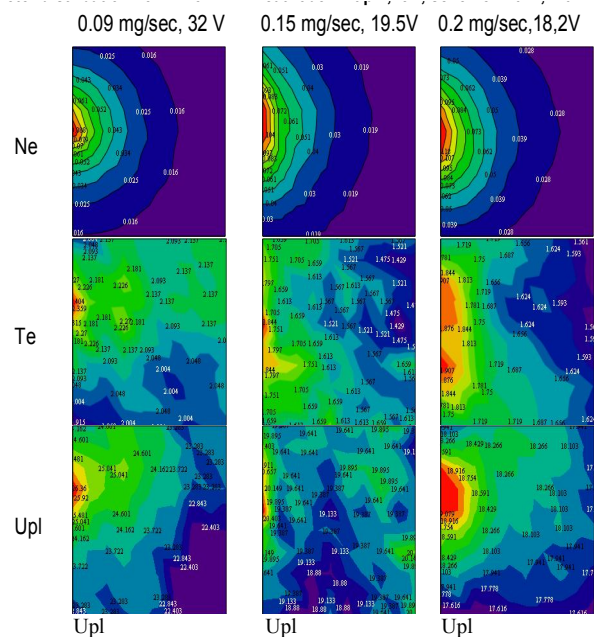


Рис. 2. Безнакальный катод (БНК)

Рис. 3 – 6 отображают распределение параметров той же области при работе катодов в составе СПД 70, из которых видно, что для того, чтобы поддерживать режим работы накаливаемого катода (соответствующему потенциалу струи $U_{kz}=12-13$ в), необхо-

димо повысить мощность его нагревателя до 40 ватт. В режиме нагрева ограниченной 25 ватт (рис. 3) потенциал струи превышал 15,5 вольта, температура электронов возрастала вдвое, что увеличивало колебания в плазме двигателя, при этом зондовая вольтамперная характеристика была сильно зашумлена. При увеличении нагрева эмиттера (рис. 4) картина распределений приближалась к работе безнакального катода (рис. 6) при расходе 0,15 мг/с, однако колебания в плазме оставались, хоть и на меньшем уровне.

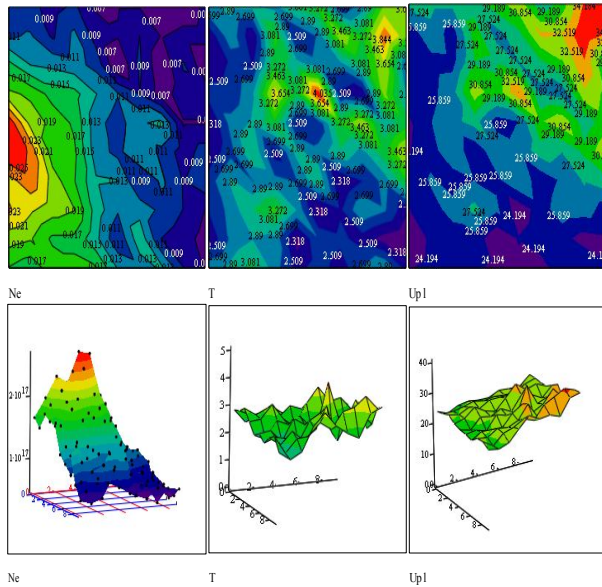


Рис. 3. М70-НК, $m_k = 2 \text{ mg/c}$, $U_r = 290 \text{ v}$, $U_{kz} = 15,5 \text{ v}$, $P_{нагр} = 25 \text{ w}$

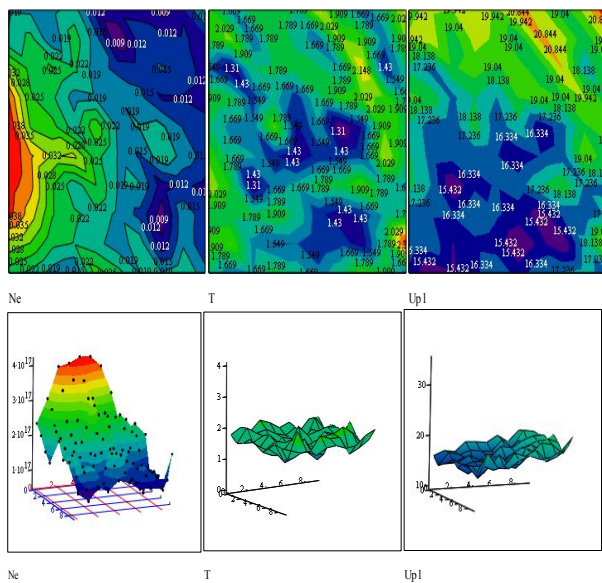


Рис. 4. М70-НК, $m_k = 2 \text{ mg/c}$, $U_r = 290 \text{ v}$, $U_{kz} = 14 \text{ v}$, $P_{нагр} = 40 \text{ w}$

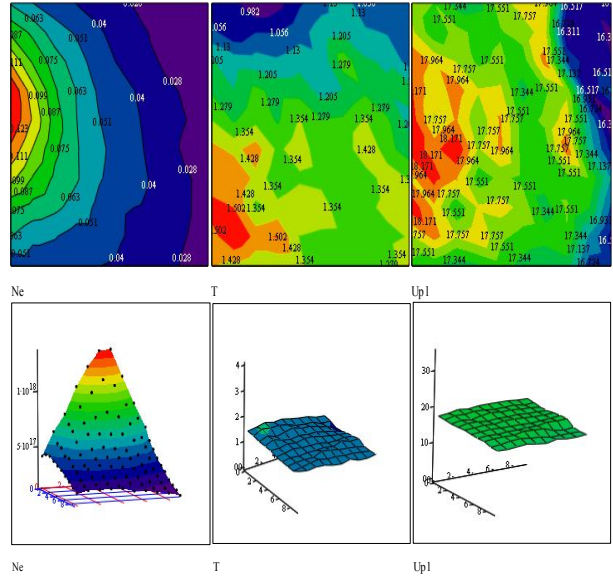


Рис. 5. М70-БНК, $m_k = 2 \text{ mg/c}$, $U_r = 290 \text{ v}$, $U_{kz} = 11,6 \text{ v}$

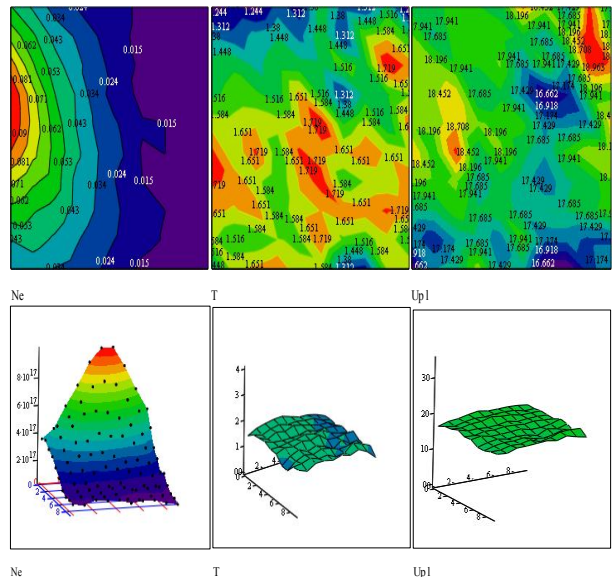


Рис. 6. М70-БНК, $m_k = 15 \text{ mg/c}$, $U_r = 290 \text{ v}$, $U_{kz} = 13,3 \text{ v}$

Исследование ограниченного пространства прикатодной области не позволило выявить тенденции перехода плазмы от катода к струе. Для этого проведены измерения параметров плазмы пространства захватывающего поток до половины радиуса канала СПД-70.

При этом цилиндрический зонд был ориентирован параллельно потоку струи, что позволило использовать алгоритмы диагностики соответствующей безконвективной плазме.

В данных испытаниях использовался бариевый катод с расходом 0,2 мг/с, что позволило установить малощумящий режим работы СПД.

Результаты измерений пространственных распределений представлены на рис. 7.

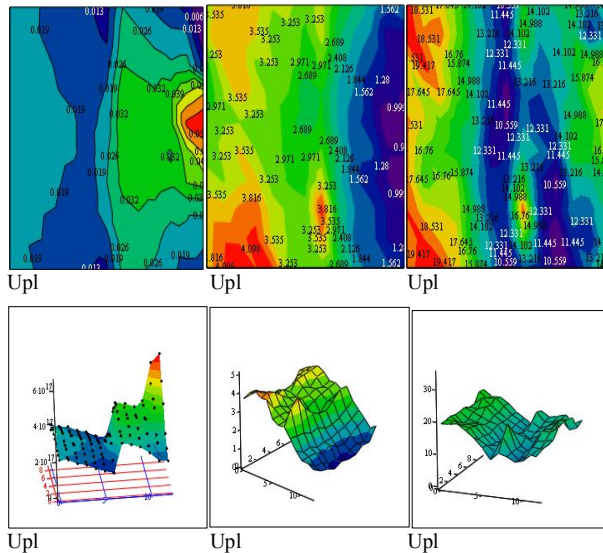


Рис. 7. М70-БНК, $m_k = 0.2$ мг/с,
 $U_r = 290$ в, $U_{kz} = 12$ в

На рисунке явно просматривается граница струи, отмеченная высокими градиентами плотности, температуры и потенциала плазмы, а так же проникновения катодной плазмы в поток двигателя.

Падение концентрации электронов в струе можно объяснить откачкой электронов быстрыми ионами и нечувствительностью зонда к направленному потоку частиц. Нужно также отметить повышение температуры электронов в струе свыше 4 эВ.

Заключение

Исследования прикатодной плазмы, представленные здесь необходимы для определения влияния

работы катодов на стационарный плазменный двигатель.

Испытания различных типов и конструкций источников электронов с применением методики зондовых измерений показали различия в распределениях параметров плазмы, которые коррелировали с разрядными характеристиками и колебаниями плазмы.

В частности, нагревный катод с эмиссионной вставкой из LaB6 с большим отверстием при недостатке термоэмиссии повышает температуру электронов, разрядное напряжение и колебания плазмы внешнего столба разряда восполняя там недостаток ионов актами ионизации Хе.

Напротив, у катода с оптимальной конструкцией, процессы возбуждения и ионизации Хе ограничиваются минимальной зоной вблизи диафрагмы.

Однако, и в том и другом случае, проведение более детальных исследований функции распределения электронов по энергиям во внешнем столбе катодной плазмы и переходе ее в струю двигателя ответили бы на вопросы энергетике электронов отвечающих за токоперенос.

Литература

1. Patterson M. J., Oleson S.R., Low-Power Ion Propulsion for Small Spacecraft // Paper No 97-3060, 33 AIAA Joint Propulsion Conference, July 1997, Seattle, WA.

Поступила в редакцию 24.05.2006

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