



О. А. Митрофанова, А. В. Румянцев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ТОПОЛОГИИ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ  
СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА**

44

Приведены результаты исследования влияния характеристик (параметров и топологии) магнитного поля СПД типа СПД-100 на эффективность работы катода-компенсатора при изменении его места расположения. Выявлено влияние на эффективность работы катода-компенсатора не только топологии магнитного поля, но и величины магнитной индукции в зоне его размещения. Отмечено наличие корреляции между изменением индукции магнитного поля в месте расположения катода и параметрами двигателя. Определена допустимая для обеспечения высоких интегральных характеристик и требуемого ресурса индукция магнитного поля в зоне его размещения, не превышающая 30 Гс.

*In this paper it is investigated an influence of magnetic field characteristics (parameters and topology) of SPT using SPT-100 thruster model on efficiency of cathode-compensator operation while the cathode is translated. During investigations the comparison results of experiments and calculations suggests influence on efficiency of cathode-compensator operation either magnetic field topology or magnetic field induction in cathode position. It is founded a correlation between magnetic field induction in cathode position and thruster performance. It is determined assumptive magnetic field induction less as 30 Gauss in cathode position for better performance and requisite lifetime of thruster.*

**Ключевые слова:** стационарный плазменный двигатель, катод-компенсатор, топология магнитного поля, индукция магнитного поля, напряжение «катод — земля» ( $U_{кз}$ ), трехмерный расчет магнитных полей.

**Key words:** stationary plasma thruster (SPT), cathode-compensator, topology of magnetic field, magnetic field, cathode coupling voltage ( $U_{кз}$ ), 3D-calculations of magnetic field.

Катод-компенсатор (К-К) и анодный блок являются основными элементами стационарного плазменного двигателя (СПД). От эффективности работы К-К, его надежности и ресурсных характеристик зависит надежность и ресурсные характеристики двигателя в целом [1; 2]. Эффективность и надежность работы К-К в составе электроракетного двигателя (ЭРД), в том числе СПД, определяется, в первую очередь, его месторасположением относительно анодного блока (АБ).

Эффективность работы К-К оценивается параметром, представляющим собой разность потенциалов между собственно катодом и «землей», обозначаемым термином «напряжение "катод — земля"» ( $U_{кз}$ ). Он характеризует энергетические потери на транспортировку электронов от катода в истекающую из двигателя струю плазмы. Чем меньше значение  $U_{кз}$ , тем выше эффективность работы катода и двигателя в целом.

Обычно месторасположение катода выбирают по результатам прямых огневых испытаний, при проведении которых измеряются основ-



ные параметры двигателя и  $U_{кз}$ . Критерием оптимальности является минимум  $U_{кз}$  при максимуме тягового к.п.д. двигателя. При выборе места расположения катода учитывается также требование обеспечения его ресурсных характеристик. В случае неоптимального его расположения в процессе длительной работы он может быть разрушен истекающей из двигателя струей плазмы [3; 4]. Имеется ряд работ по исследованию влияния месторасположения катода в СПД на эффективность его работы [5; 6]. В частности, показано, что для обеспечения высокой эффективности работы двигателя катод необходимо располагать в зоне среза разрядной камеры, где магнитные силовые линии замыкаются между магнитными полюсами, т. е. в рабочей зоне [7].

Считается, что основными факторами, определяющими место установки К-К, являются топология и индукция магнитного поля в этом месте, которые в значительной степени зависят от конфигурации наружного полюса. Так, например, Р. Хофер заметил, что у двигателя NASA-173 уменьшение магнитного поля приводит к уменьшению  $U_{кз}$  с темпом 0,1...0,2 В/Гс [8].

При расположении К-К в зоне полей рассеяния СПД эффективность работы двигателя снижается в связи с увеличением затрат на транспортировку электронов к аноду ( $U_{кз}$ ). При значительном же радикальном отдалении катода от анодного блока величина параметра  $U_{кз}$  уменьшается, а параметры, характеризующие эффективность двигателя, приближаются к оптимальным.

Показано также, что поток ксенона, истекающего из катода, изменяет параметры двигателя, в частности увеличивает его разрядный ток ( $I_p$ ) [8].

Целями статьи является уточнение степени влияния величины магнитной индукции на  $U_{кз}$ ; определение критериев, реализация которых еще на этапе проектирования двигателя позволит обеспечить эффективность работы К-К при условии обеспечения его ресурсных характеристик; выявление влияния места расположения катода на ток разряда двигателя.

Для определения влияния характеристик магнитного поля на эффективность работы К-К использовался расчетно-экспериментальный метод. Исследования были проведены на двигателе СПД-100, анодный блок которого включает одну внутреннюю и четыре наружные магнитные катушки. Наружный полюс имеет форму квадрата.

Эффективность работы катода и двигателя в целом определяли по результатам экспериментов на работающем двигателе, а параметры магнитного поля и его топология в месте расположения катода находили расчетным путем.

При проведении экспериментов работающий катод перемещался вдоль продольной оси двигателя при помощи координатного устройства, имеющего электрический привод перемещения и датчик контроля координат.

Схема расположения К-К относительно анодного блока показана на рисунке 1. Было рассмотрено два положения К-К. В первом ось катода была наклонена к оси двигателя под углом  $45^\circ$  (положение А), во втором (положение В) — под углом  $60^\circ$ . Все эксперименты проводились при напряжении разряда  $U_p = 300$  В. Расход в анод двигателя составлял 4,6 мг/с. Расход в катод поддерживался на уровне 0,4 мг/с.

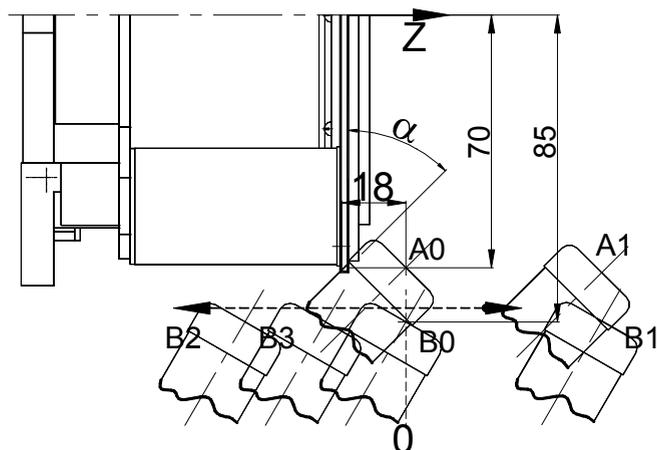


Рис. 1. Схема расположения и перемещений катода при исследовании

Электрическое питание катушек магнитной системы осуществлялось от автономных источников и устанавливалось оптимальным по критерию минимума разрядного тока. Кроме того, при проведении экспериментов в положении В оценивалось также влияние изменения величины тока в катушках намагничивания в диапазоне 4,9...5,5 А на параметры двигателя и работу катода. Измеряемыми параметрами являлись напряжение  $U_{кз}$  и разрядный ток  $I_p$ .

В обоих положениях выходное отверстие поджигного электрода катода находилось на расстоянии 18 мм от наружного полюса магнитной системы. В положении А катод двигался в осевом направлении на расстоянии 70 мм от продольной оси. Исходное положение катода на схеме обозначено как А0. Наибольшее расстояние от исходного положения вдоль оси двигателя по ходу струи (положение А1) – 57 мм. В положении В катод находился на расстоянии 85 мм от продольной оси. Исходное положение катода на схеме обозначено как В0. Наибольшее расстояние от исходного положения вдоль оси двигателя по ходу струи (положение В1) – 57 мм. В противоположном направлении от исходного положения катод перемещался до 60 мм (положение В2).

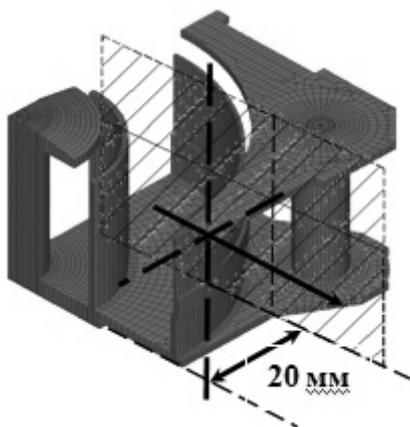


Рис. 2. Расчетная модель магнитной системы СПД-100

В связи с симметрией конструкции для определения параметров магнитного поля – индукции и топологии в месте расположения К-К – была разработана трехмерная расчетная модель  $\frac{1}{4}$  магнитной системы СПД-100, представленная на рисунке 2. На нем показана также плоскость, в которой перемещался катод при проведении исследований, расположенная на расстоянии 20 мм от оси магнитной системы.



Расчет параметров и топологии магнитного поля проводился с использованием модуля EMAG пакета прикладных программ NISA/DISPLAY Version 17.

Для верификации разработанной модели с точки зрения соответствия расчетной топологии реальной был использован метод качественного ее сравнения с топологией магнитного поля СПД-100, полученной экспериментально с применением классического метода железных опилок. Результаты сравнения показали идентичность двух видов топологий [9].

Верификация разработанной модели по параметрам была проведена путем сравнения расчетных значений магнитной индукции со значениями, полученными экспериментальным методом при проведении прямых измерений на двигателе. Сравнение результатов показало, что разница между расчетными и экспериментальными значениями магнитной индукции не превышает 3–6 %, т.е. имеется достаточно хорошее согласование результатов расчетов и прямых измерений [9].

С использованием расчетной модели в исследованной области перемещений катода были рассчитаны значения осевой ( $B_z$ ) и радиальной ( $B_r$ ) составляющих магнитного поля в области перемещений катода; результирующее значение магнитной индукции ( $B$ ); топология магнитного поля. При расчете значения токов в магнитных катушках задавались равными значениям, полученным при проведении экспериментов на работающем двигателе. По результатам расчета значений составляющих магнитного поля найдены абсолютные значения углов наклона силовых линий магнитного поля к продольной оси двигателя, характеризующие топологию магнитного поля. Кроме того, определена граница раздела рабочей и периферийной зон магнитного поля.

Результаты расчетов и экспериментов по перемещению катода в положении А показаны на рисунке 3. В этом положении катода область его перемещений не выходила за границы рабочей зоны магнитного поля.

Как можно видеть из представленных результатов, значения  $U_{кз}$  монотонно уменьшаются по мере удаления катода от наружного полюса двигателя с 20 В в исходном положении до ~ 12 В в его наиболее удаленном от полюса положении. Таким образом, хотя катод и находится в рабочей зоне магнитного поля, величина  $U_{кз}$  растет с ростом магнитной индукции, когда катод приближается к наружному полюсу двигателя. Аналогичным образом изменяются также и значения результирующей составляющей магнитного поля ( $B$ ), т.е. между этими двумя величинами возможна корреляционная связь. Разрядный ток по мере приближения к наружному полюсу сначала уменьшается, а затем увеличивается.

Результаты расчетов и экспериментов при перемещении катода в положении В показаны на рисунках 4 и 5. При экспериментах в этом положении катод находился как в рабочей, так и в периферийной зонах магнитного поля. По мере перемещения от точки с максимальным удалением в направлении, противоположном направлению истекающей из двигателя струи плазмы,  $U_{кз}$  сначала увеличивается, а затем уменьшается.

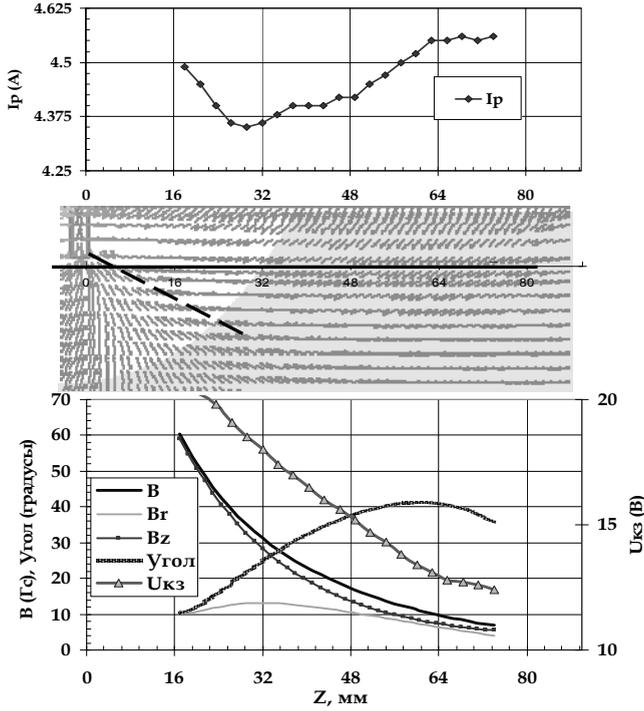


Рис. 3. Результаты исследований в положении А

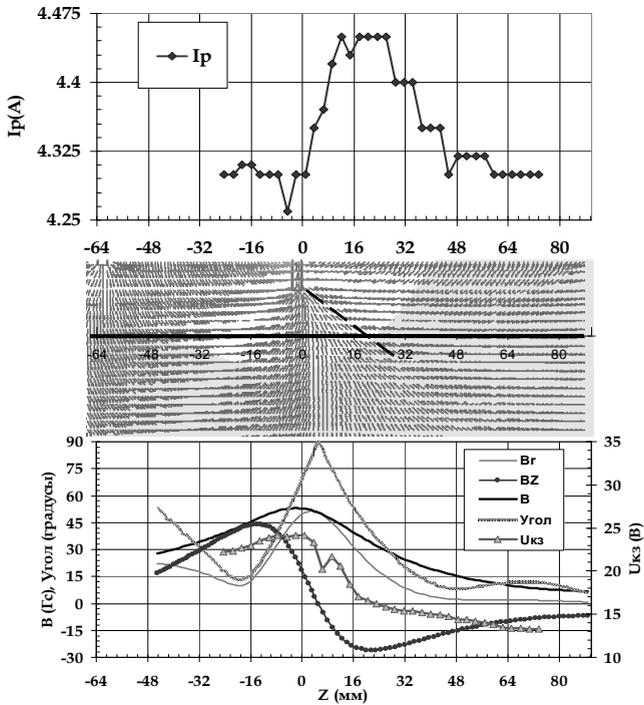


Рис. 4. Результаты исследований при перемещении катода в положении В при токе в катушках намагничивания 4,9 А

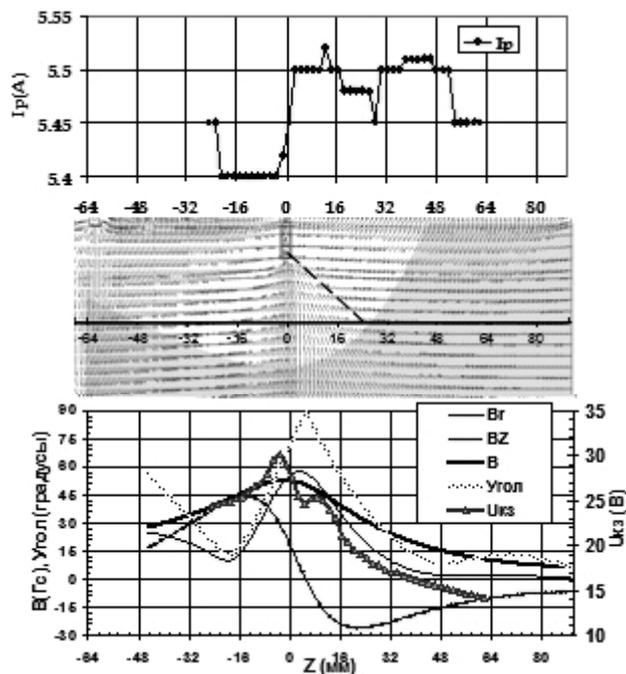


Рис. 5. Результаты исследований при перемещении катода в положении В при токе в катушках намагничивания 5,5 А

Максимум  $U_{k3}$  находится в плоскости расположения наружного полюса. В этой же области наблюдается и максимум индукции магнитного поля. При этом следует заметить, что в обоих случаях при перемещении катода в области в противоположном к выходной части двигателя направлении на монотонно возрастающей кривой  $U_{k3}$  наблюдается выброс, выражающийся в уменьшении  $U_{k3}$  на  $1 \div 2$  В.

Сопоставление места расположения этого выброса с характером изменения кривой, описывающей изменение угла наклона силовых линий, показывает, что координаты места регистрации выброса совпадают с координатами точки, в которой силовые линии магнитного поля перпендикулярны оси двигателя, т. е. природа выброса связана с топологией магнитного поля в этой точке, силовые линии имеют практически радиальное направление, в связи с чем создаются благоприятные условия для продвижения электронов к ускорительному каналу, что и отражается на уменьшении затрат на их транспортировку.

Изменения, наблюдаемые на зависимостях величины тока разряда от места расположения К-К, однозначно могут быть связаны с положением К-К относительно наружного полюса — момент начала нарастания тока разряда при движении вдоль струи совпадает с моментом выхода оси выходного отверстия катода за плоскость наружного полюса. Это положение катода обозначено на рисунке 1 как положение В3. В нем выходящий из него ксенон начинает попадать в рабочую зону двигателя. Часть этого ксенона может ионизоваться, что и приводит к



увеличению тока разряда. В осевом направлении область влияния катодного расхода не превышает 50 мм.

Следует отметить влияние на разрядный ток угла наклона оси катода к оси двигателя — в положении В (угол  $60^\circ$ ) оно больше, чем в положении А (угол  $45^\circ$ ). Это можно объяснить тем, что в положении В количество атомов ксенона, поступающего из катода в рабочую зону, имеет направление к оси двигателя.

Исходя из полученных зависимостей изменения  $U_{кз}$  от индукции магнитного поля В была сделана попытка обобщения результатов для нахождения количественной зависимости  $U_{кз}$  от величины индукции магнитного поля в периферийной зоне двигателя. С этой целью все результаты были сведены в один график, показанный на рисунке 6.

50

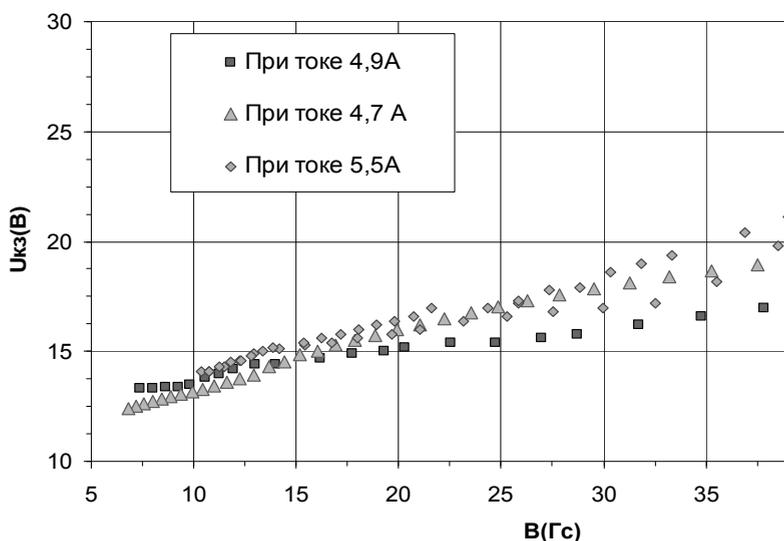


Рис. 6. Зависимость  $U_{кз}$  от индукции магнитного поля в месте расположения катода с учетом изменения тока в катушках намагничивания

Несмотря на то, что для построения этого графика использованы результаты экспериментов при различном расположении катода относительно оси анодного блока, а также при различных режимах работы двигателя и токах в магнитных катушках, все они имеют одну и ту же зависимость — при нарастании индукции магнитного поля растет и величина  $U_{кз}$ . В области значений магнитной индукции до 35–40 Гс зависимость между  $U_{кз}$  и магнитной индукцией  $B$  близка к линейной: при приращении магнитной индукции на 1 Гс напряжение  $U_{кз}$  возрастает на 0,18...0,20 В. При этом для всех исследованных случаев  $U_{кз}$  меньше 20 В при магнитной индукции  $B \leq 30$  Гс.

На приведенных ранее рисунках 3–5 области, в которых величина магнитной индукции не превышает 30 Гс, выделены отдельно.



Полученные результаты могут быть использованы для выбора места установки катодов при создании новых конструкций двигателей. Предварительно это место может быть определено после разработки расчетных моделей магнитных систем двигателей и выявления границ областей с магнитной индукцией  $B \geq 30$  Гс. Катод должен располагаться вне этих границ и его место расположения будет определяться уже критериями обеспечения его ресурсных характеристик при высокой эффективности его работы. Предварительно выбранное место расположения катода может быть уточнено в процессе огневых испытаний двигателей. Анализ результатов экспериментов и расчетов параметров магнитного поля позволил выявить не только влияние топологии магнитного поля на  $U_{кз}$ , но и количественные соотношения между величиной индукции магнитного поля и  $U_{кз}$  — при увеличении индукции на 1 Гс напряжение  $U_{кз}$  возрастает на 0,18...0,20 В.

### Список литературы

1. McDonald M. C., Gallimore A. D. Cathode position orientation effects on cathode coupling in a 6-kW hall thruster // IEPC-2009-113, 31st International Electric Propulsion Conference. 20–24 September 2009 / University of Michigan. Michigan, 2009.
2. Courtney D.G., Martinez-Sanchez M. Diverging cusped-field hall thruster (DCHT) // IEPC-2007-39. Presented at the 30th International Electric Propulsion Conference. September 17–20, 2007. Florence, 2007.
3. Приданников С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе : дис. ... канд. техн. наук. Калининград, 2004.
4. Hofer R. R. Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon hall thrusters : a dissertation ... of Doctor of Philosophy. Michigan, 2004.
9. Гниздор Р. Ю., Козубский К. Н., Митрофанова О. А. Компьютерное моделирование магнитных систем стационарных плазменных двигателей // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. Вып. 10. Калининград, 2010.

### Об авторах

Ольга Александровна Митрофанова — инженер, ОКБ «Факел», асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru

### About authors

Olga Mitrofanova — engineer, EDB «Fakel», PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: albert37@list.ru

Albert Rumyantsev — PhD, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: albert37@list.ru