



8. *Севастьянов А. И.* Метод дистанционного измерения профиля керамических колец холлового двигателя // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2014. Вып. 38. С. 36–42.

9. *Блинов Н. В., Головин Ю. М., Горшков О. А., Дышлок Е. Н.* Спектроскопические исследования струи холлового двигателя с целью определения скорости эрозии ускорительного канала в ходе длительных ресурсных испытаний // *Авиационно-космическая техника и технология*. Вып. 9. 2005. С. 56–71.

10. *Хаустова А. Н., Лоян А. В., Рыбалов О. П.* Разработка оптического приемника для измерения скорости эрозии отдельно наружной и внутренней керамических вставок газоразрядной камеры стационарного плазменного двигателя // *Вестник двигателестроения*. 2015. Вып. 2. С. 92–101.

11. *Лоян А. В., Максименко Т. А., Рыбалов О. П., Подгорный В. А.* Исследование эрозии разрядной камеры МСПД в ходе продолжительных ресурсных испытаний // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. Вып. 8. С. 41–54.

12. *Козлов О. В.* Электрический зонд в плазме. М., 1969.

13. *Sigmund P.* Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*. 1987. С. 22–39.

Об авторах

Антон Анагольевич Комаров – инженер-конструктор, ОКБ «Факел»; асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: komarovfc.anton@yandex.ru

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

E-mail: albert37@list.ru

About the authors

Anton Komarov – design engineer, EDB Fakel; PhD student, I. Kant Baltic federal university, Kaliningrad.

E-mail: tdrifter@yandex.ru

Dr Albert Rumyantsev – Prof., I. Kant Baltic federal university, Kaliningrad.

E-mail: vayt37@gmail.com

УДК 629.7.036.74

Д. А. Семенов, А. В. Румянцев

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

На сегодня в построении математических моделей стационарных плазменных двигателей (СПД) используются главным образом эмпирические законы с возможностью применения к конкретному типу двигателя. Рассматривается возможность построения математической модели, учитывающей различные физические процессы, протекающие в двигателе, и опирающейся на статистические методы.



Today in creation of mathematical models of the stationary plasma thruster (SPT) a certain advance is noticeable, but all these models are based on empirical laws with a possibility of application to concrete type of the engine. The paper considers the possibility of constructing a mathematical model that takes into account the various physical processes taking place in the engine and based on statistical methods.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, математическая модель, эрозия.

Key words: stationary plasma thruster, mathematical model, erosion.

Для построения удовлетворительной модели нужно рассматривать работу двигателя с учетом всех нюансов, оказывающих влияние на его работу. На начальном этапе следует описать явления, встречающиеся практически во всех стационарных плазменных двигателях (СПД), но не имеющих своего описания в большинстве созданных моделей. Без понимания всех процессов, происходящих в двигателе, невозможно построить полноценную модель, учитывающую, в частности, процессы эрозии стенок разрядной камеры.

Опыт показывает, что СПД имеет определенную область эффективной работы, если рассматривать удельные характеристики двигателя в зависимости от плотности расхода в канале. Учитывая данный факт, можно сделать вывод о том, как плотность расхода характеризует двигатель с точки зрения ионизации рабочего тела. Причем данная характеристика определена геометрическими размерами разрядной камеры и не связана с изменениями ее размеров в выходной части. Опубликовано много работ, подтверждающих, что рабочее тело полностью ионизируется к началу ускоряющего слоя (зона с максимальным магнитным полем, находящаяся в выходной части разрядной камеры) [2]. Необходимо решить задачу, насколько длинной должна быть эта область и какой должна быть в ней индукция магнитного поля. Возможно, ее решение позволит продвинуться дальше в конструировании СПД.

Следует также уделить большее внимание двигателям с анодными катушками, поскольку в случае удачной конфигурации они дают вклад в тяговые характеристики на уровне пяти процентов. Надо заметить, что не во всех случаях виден описанный эффект, что, возможно, связано с плотностью расхода. Можно утверждать, что на сегодня нет убедительного объяснения и полного понимания эффекта, связанного с увеличением тяговых характеристик двигателя при использовании анодной катушки.

Практика показывает, что для каждого режима есть определенная величина магнитной индукции, которая изменяется в процессе ресурса. Отметим, что характер этого изменения имеет тенденцию к снижению напряженности магнитного поля с течением времени.

Особое внимание необходимо уделить взаимодействию плазмы со стенками разрядной камеры. Имеется много фактов, показывающих большое влияние материала разрядной камеры на параметры двигателя, во многих работах оно достаточно подробно рассмотрено и предложены гипотезы, описывающие процессы взаимодействия плазмы со



стенками разрядной камеры. Во время отработки двигателей наблюдаются характерные явления, такие как снижение тяговых характеристик за время ресурса двигателя, относительно высокие импульсные характеристики во время первых минут работы двигателя после запуска. Однако описание явлений, связанных с влиянием стенок разрядной камеры в отрыве от конфигурации магнитного поля, будет не полным. Вероятно, их можно объяснить взаимодействием со стенкой: электроны, которые формируют электрическое поле в канале, в первые минуты работы двигателя, взаимодействуя со стенкой, отдают тепловую энергию, при этом эффективность двигателя растет. Таким образом, можно объяснить увеличение тяговых и удельных характеристик двигателя с увеличением ширины канала.

Еще одно явление, на которое необходимо обратить внимание, — это снижение расходных характеристик двигателя с увеличением его типоразмера. Ряд авторов рассматривают влияние вакуума на характеристики двигателя [4–6]. В связи с этим нужно уделить особое внимание параметрам двигателя, измеренным во время наземной отработки. Существуют теории об однократно и многократно заряженных ионах рабочего тела в зависимости от разрядного напряжения [6]. Возможно, с увеличением размера двигателя происходит то же самое явление. Не исключено и то, что при этом не учитывается влияние окружающей среды при наземной отработке и, возможно, параметры расхода в условиях реальной эксплуатации будут несколько выше. Отметим, что и сами тяговые параметры не соответствуют измерениям, выполненным при наземных испытаниях. Это необходимо учитывать при расчете запаса рабочего тела, особенно для двигателей больших типоразмеров.

С целью построения модели рабочих процессов следует рассмотреть природу формирования электрического поля в канале с точки зрения статистического анализа и энергетического баланса. Необходимо более тщательно с точки зрения теории вероятности рассмотреть все возможные виды взаимодействия. Понимая все процессы, происходящие в двигателе, оценивая их количественно, можно будет показать, насколько эффективен двигатель и наметить пути для дальнейшего развития, а возможно, и отказа от этого ввиду выявившегося относительно малого преимущества.

Далее нужно рассмотреть движение электронов и ионов с учетом тепловых статистических движений, а не только с точки зрения электрических и магнитных взаимодействий. Например, при работе начинаются процессы эрозии, которые невозможно объяснить воздействием основного потока ионов плазмы двигателя на стенки разрядной камеры. Желательно посмотреть на процесс эрозии стенок разрядной камеры с другой точки зрения. Опыт показывает, что существует два процесса эрозии стенок: один из них связан с процессом, вызванным основным потоком, а другой — с пристеночными процессами. Следует отметить характерное поведение скорости эрозии стенок разрядной камеры, так как в определенный момент времени наблюдается значительное, свойственное всем двигателям, снижение скорости эрозии. Очевидно, что это замедление связано с первым механизмом эрозии,



определяющую роль в котором играет бомбардировка стенок разрядной камеры основным потоком ионов. Но второй механизм эрозии продолжает работать практически в течение ресурса двигателя. Особенно заметно явление, связанное со вторым механизмом процесса эрозии на двигателях с вынесенным магнитным полем, характерной проблемой для которых служит эрозия магнитных полюсов. Необходимо обратить внимание и на то, что эрозия имеет место там, куда основной поток ионов попадать не может. Процессы, связанные с эрозией полюсов, возможно, объяснимы с точки зрения транспортировки рабочего тела к местам эрозии, но и сейчас понятно, что такие явления связаны с градиентом магнитной индукции в этих местах. Не исключено, что процесс транспортировки связан с частичной рекомбинацией и тепловым дрейфом нейтральных атомов. Однако с уверенностью можно сказать, что, как и в канале двигателя, и там происходят подобные процессы, только в меньших масштабах.

Немало интересного наблюдается во время ресурса, связанного с эрозией стенок разрядной камеры. Существуют такие процессы, как аномальная эрозия, характерная для двигателя СПД-100, образование волнистого периодического рельефа на разрядной камере [3]. Еще одно явление, которое необходимо объяснить, — это процесс образования неравномерностей в разрядной камере, при появлении неравномерности на одной из стенок разрядной камеры наблюдается зеркальное отражение неравномерности на другой.

Наконец, особое внимание следует уделить параметрам разрядного тока, колебания которого имеют определенную частоту и определенную форму. Очевидно, что колебательные процессы играют немаловажную роль в работе двигателя. В некоторых случаях за время ресурса двигателя колебания разрядного тока достигают более половины самого разрядного тока. На некоторых современных моделях возможно установление таких режимов, при которых разрядный ток не будет иметь колебаний вообще при одновременном повышении параметров двигателя.

С учетом высказанных предложений возможно создание математической модели со следующими входными параметрами:

- геометрия канала;
- материал разрядной камеры (зависимость эрозии от температуры, энергии падающего на поверхность ионного потока, угла падения);
- конфигурация магнитного поля в канале, его величина;
- напряжение разряда;
- расход рабочего тела;
- вид рабочего тела;
- окружающая среда, в которой работает двигатель.

Это позволит определять следующие интегральные характеристики двигателя:

- сила тяги;
- удельный импульс силы тяги;
- колебания разряда;
- ресурсные характеристики двигателя.



Применение новых подходов при проектировании СПД позволит реализовать модель, позволяющую с достаточной точностью предсказывать параметры двигателя в процессе его ресурса; описывать тяговые и ресурсные характеристики двигателя. Это позволит перераспределить ресурсы, затрачиваемые на разработку двигателя. На данный момент внедрение новых идей тормозится необходимостью подтверждения новой конструкции длительными ресурсными испытаниями.

Внедрение новых математических моделей, позволяющих адекватно описывать процессы, происходящие в СПД, позволит проявлять гибкость при выборе двигателя для определенной задачи, и затрачивать намного меньшие ресурсы для доведения новых перспективных идей до летной стадии.

Список литературы

1. *Morozov A. I.* Fundamental Physics of Electric Propulsion. M. : Atomizdat, 1978. Vol. 1. In Russian.
2. *Belikov M. B., Gorshkov O. A., Lovtsov A. S., Shagayda A. A.* Probe Measurements in the Channel of 1.5 kW Hall Thruster with Discharge Voltage up to 1000 V // IEPC-2007-131 Presented at the 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy September 17–20, 2007.
3. *Приданников С. Ю.* Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе : дис. ... канд. техн. наук. Калининград, 2003.
4. *Hofer R. R. et al.* Characterizing Vacuum Facility Backpressure Effects on the Performance of a Hall Thruster // 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-01-045, Pasadena, CA, 2001.
5. *Diamant K. D., Spektor R., Beiting E. J. et al.* The Effects of Background Pressure on Hall Thruster Operation // 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA-2012-3735, Atlanta, GA, 29 Jul.-1 Aug., 2012.
6. *Huang W., Kamhawi H., Haag T.* Effect of Background Pressure on the Performance and Plume of the HiVHAc Hall Thruster // IEPC-2013-058 Presented at the 33rd International Electric Propulsion Conference, The George Washington University Washington, D. C. USA, October 6–10, 2013.

Об авторах

Денис Александрович Семенов — инженер-конструктор, ОКБ «Факел»; асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: waldau.denis@mail.ru

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: albert37@list.ru

About the authors

Denis Semenenko — design engineer, EDB Fakel; PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: waldau.denis@mail.ru

Dr Albert Rumyantsev — Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vayt37@gmail.com