

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАМЕРЫ ИОНИЗАЦИИ И УСКОРЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© В. Н. Балашов

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Виконано аналіз впливу геометрії і матеріалу камери іонізації і прискорення (КИУ) на працездатність стаціонарного плазмового двигуна. Показано процеси формування зон в КИУ і проаналізовано їхній вплив на працездатність двигуна.

Введение. Основы зарождения плазменных двигателей уходит далеко в прошлое, когда Фарадей открыл, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, появляется электрический ток. Процесс этот обратим, т.е. если через проводник, находящийся в магнитном поле, пропускать ток, проводник получает поступательное движение и будет ускоряться. Описанный принцип используется в электромагнитных двигателях, когда плазму помещают в магнитное поле и пропускают через нее электрический ток.

В середине 1963 г. возникла необходимость создания плазменного ускорителя небольшой мощности с внешним магнитным полем. К числу таких ускорителей в первую очередь относятся стационарные плазменные двигатели (СПД), известные в литературе как ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и фокусировкой ионного потока в протяженном ускоряющем слое с помощью магнитного поля (УЗДП), или двигатель с магнитным слоем (ДМС), или линейный холловский двигатель (ЛХД). Эти названия свидетельствуют о сложности процессов происходящих в двигателе. Стационарные плазменные двигатели — это одно из возможных технических реализаций ускорителей плазмы со скрещенными электрическим и магнитным полями. Развитие этой идеи предшествовало изучение воздействия магнитного поля на плазму и получение электростатических полей в квазинейтральной плазме.

При разработке конструкций СПД используют метод геометрического подобия и опыт экспериментальных отработок. Метод геометрического подобия заключается в определении характерных оптимальных соотношений взаимозависимых размеров элементов двигателя. На базе ранее определенных экспериментальным путем геометрических пропорций базируются вновь разрабатываемые конструк-

ции двигателей. Подбираются расчетно-экспериментальным путем конфигурация магнитного поля, напряженность электрического и магнитного полей, разрядное напряжение и расход рабочего тела (РТ). Тратятся значительные усилия, время и деньги на доводку конструкции двигателя под требуемые параметры.

Известные к настоящему времени результаты основывались на экспериментальных данных, полученных несколько десятилетий назад с использованием низкоэффективных моделей СПД и требуют пересмотра с учетом достигнутого современного уровня эффективности двигателя.

Работа стационарных плазменных двигателей. На рис. 1, а представлена традиционная схема СПД. Часть электронов, источником которых является катод-компенсатор (К-К) 1, поступает через камеру ионизации и ускорения (КИУ) 2 к аноду 3. Вблизи среза КИУ, ограниченной диэлектрическими стенками, с помощью магнитной системы, состоящей из центральной 4 и наружных 5 катушек, магнитопровода 6, центрального и наружного полюсов 7, 8, создается преимущественно радиальное магнитное поле. В современных двигателях неперенным атрибутом магнитных систем являются магнитные экраны 9 и 10, которые ограничивают магнитное поле в КИУ и создают резкий максимум индукции магнитного поля около среза камеры. Электроны, попадающие в магнитное поле, замагничиваются, и происходит их замкнутый дрейф в кольцевой КИУ с резким уменьшением их поперечной подвижности. Из кольцевого анода, являющегося, как правило, газораспределителем, подается рабочее тело (РТ). Атомы РТ движутся по каналу камеры и, сталкиваясь с электронами, ионизируются. Под действием разности потенциалов между анодом и катодом происходит ускорение

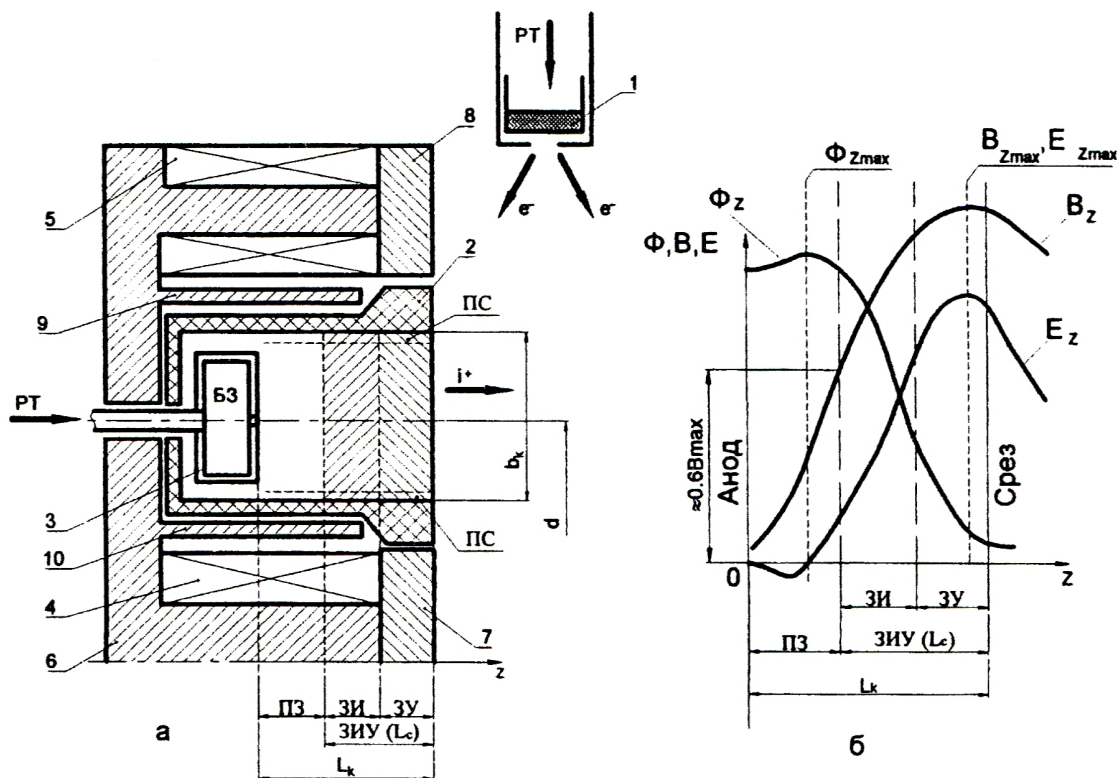


Рис. 1. Схема СПД (а): 1 — К-К, 2 — КИУ, 3 — анод, 4 — центральная катушка, 5 — наружная катушка, 6 — магнитопривод, 7 — центральный полюс, 8 — наружный полюс, 9, 10 — магнитные экраны и распределение по каналу (б): B_z — магнитной индукции, E_z — напряжения электрического поля, Φ_z — электрического потенциала)

ионной компоненты. Ускоренный ионный поток захватывает остальную часть электронов с К-К и нейтрализуется.

Камера ионизации и ускорения. В СПД мы имеем дело с потоками частиц, энергия которых достигает 1 кэВ, поэтому процессы, происходящие в КИУ, организуют таким образом, чтобы исключить попадание частиц на стенки камеры. С учетом процессов, происходящих в камере, пристеночных процессов и столкновений частиц со стенками КИУ формируются требования по термостойкости, теплопроводности, износостойкости и шероховатости стенок камеры. На рис. 2 представлены варианты конструктивного исполнения КИУ в СПД.

Для СПД очень важно, является ли КИУ диэлектрической или электропроводящей. Традиционно стенки КИУ изготавливают из диэлектрического (керамического) материала. К КИУ, изготовленной из керамики, также предъявляются особые требования, материал должен обладать низкой пористостью, высокой термостойкостью, высокой механической прочностью и высокими электроизоляцион-

ными свойствами. Применение керамической или металлической камеры определяет не только количественные характеристики взаимодействия частиц со стенками, но и при использовании даже изолированной электропроводящей камеры, КИУ становится элементом разрядной цепи (пассивным электродом), а при принудительном задании ее потенциала — активным управляющим электродом. Кроме того, для электронов и ионов значительно отличаются характеристики взаимодействия с поверхностью электропроводящей и диэлектрической стенок.

К числу основных геометрических размеров анодного блока в СПД, можно отнести:

- ширину b_k канала камеры ионизации и ускорения (КИУ);
- длину L_k КИУ;
- средний диаметр d КИУ;
- толщину стенок камеры;
- толщину полюсов магнитной системы;
- габаритные размеры двигателя.

Размеры КИУ определяются процессами, происходящими в ней. В зависимости от процессов камеру принято разделять на зоны [1] (рис. 1, а): буферную зону (БЗ), прианодную зону (ПЗ), зону ионизации (ЗИ), зону ускорения (ЗУ), пристеночный слой (ПС).

На сегодняшний день при отработке и эксплуатации СПД получены характерные соотношения размеров и параметров, для которых характерна фокусирующая геометрия силовых линий магнитного поля и наиболее полная ионизация:

$$\frac{L_k}{b_k} > 1, \quad \frac{L_k}{L_B} \geq 1, \quad \frac{\lambda_n}{L_c} \leq 1, \quad \frac{L_c}{L_B} \leq 1,$$

где L_B — длина участка в КИУ где $B \geq 0.6B_{\max}$, λ_n — длина свободного пробега нейтральных атомов до ионизации, L_c — длина ЗИУ, B — магнитная индукция.

Опишем назначение зон, определяющих размеры КИУ.

БЗ предназначена для равномерного распределения РТ по каналу КИУ. В классических СПД БЗ совмещена с анодом, но существуют конструкции где БЗ отделена от анода. БЗ характеризуется плотностью РТ $n_a \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и слабой ионизацией.

В ПЗ осуществляется примерно 10 % ионизация РТ. Как правило, в этой зоне напряжение электрического поля $E_z \leq 0$ (рис. 1, б). ПЗ отчетливо выражена в двигателях с высокой степенью нарастания B . Наличие этой зоны обусловлено оторван-

ностью ЗИУ от анода, что способствует снижению точности установки и изготовления анода. Эта область характеризуется высокими значениями подвижности и коэффициентов диффузии электронов. Ионы, возникшие в этой области, движутся в направлении анода и к стенкам КИУ, т.к. потенциал плазмы в этой зоне выше потенциала анода.

Размеры и положение ЗИУ определяет конфигурация магнитной системы, степень нарастания магнитной индукции по длине канала и геометрия магнитных полюсов. Формирование направленного пучка ионов происходит в ЗИУ. В созданных на сегодняшний день СПД экспериментально определено, что ЗИУ сосредоточена в области, где $B \geq 0.6B_{\max}$. Конечно, ионизация атомов происходит во всей области КИУ (и в аноде с буферной зоной), но определяющие параметры двигателя процессы происходят в ЗИУ, где сосредоточена основная концентрация электронов, обеспечивающая ионизацию атомов и ускорение ионов. Все остальные процессы ионизации и столкновения, происходящие вне ЗИУ, являются потерями и снижают эффективность СПД.

В ЗИ преобладают процессы столкновения электронов с атомами РТ. При этом электроны смещаются в сторону анода. В ЗУ должен осуществляться бездиссипативный (без потерь энергии ионов) режим ускорения. Это может осуществляться, когда плазма в этой зоне разреженная, т. е. потери ионов на столкновение минимальны.

Получение нужной скорости истечения и бездиссипативный режим ускорения ионов преимущест-

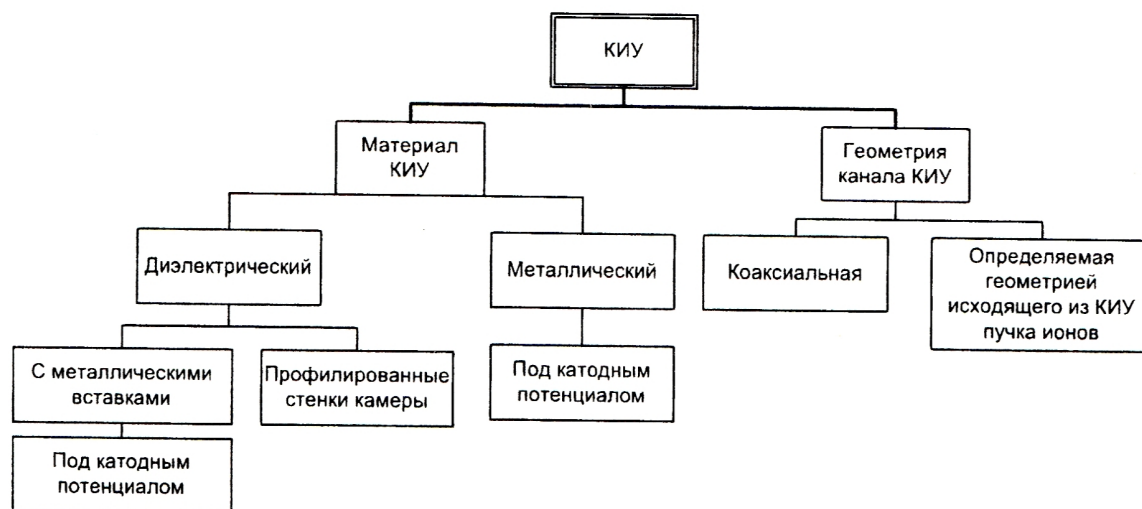


Рис. 2. Варианты конструктивного исполнения КИУ в СПД

венно определяют размеры ЗУ. Разность потенциалов по длине ЗУ, создаваемая концентрацией и распределением электронов в ЗУ, определяет скорость истечения ионов. Границу ЗУ, со стороны среза камеры, определяет максимальная концентрация электронов, создаваемая преимущественно магнитной системой, которая в этом сечении образует максимум магнитной индукции B_{\max} . Сложность создания в нужном сечении камеры B_{\max} , обусловлена влиянием собственной составляющей магнитного поля зарядов, расположенных в камере. Поэтому при работе СПД распределение магнитного поля по длине камеры $B(z)$, создаваемое магнитной системой, меняется. Изменение размеров ЗУ влияет не только на процессы в этой зоне, но также изменяет параметры двигателя, в частности, при уменьшении ЗУ с помощью магнитной системы, снижается расходимость ионного пучка и уменьшается пристеночный поток, тем самым способствует увеличению выходных параметров СПД.

Важную роль в работе СПД выполняет ПС и происходящие в нем процессы. На пристеночные процессы влияет материал КИУ. В настоящее время используются КИУ, выполненные из АВН, ВНС и боросила. Шероховатость керамических стенок КИУ влияет на величину дебаевского слоя около стенок, который не дает сталкиваться низкоэнергетичным электронам со стенками, тем самым уменьшая пристеночную проводимость. В свою очередь, это позволяет увеличить тяговый КПД, который пропорционален отношению ионного тока на выходе камеры к разрядному току I_i/I_p . Для увеличения вероятности направленного отражения частиц от стенок канала, применяют профилированные стенки.

Так как расчет и оптимизация геометрии и параметров КИУ и в целом СПД довольно трудная задача, учитывающая процессы, происходящие в двигателе, которые до конца не изучены, то изначально средний диаметр КИУ, один из основных размеров, определяющий габаритные размеры СПД, приходится выбирать, учитывая выбранную конструкцию магнитной системы и мощность, подводимую к двигателю, и потом по существующим методикам [1, 3, 4] оптимизировать его по выходным параметрам двигателя.

Выбор среднего диаметра КИУ определяют из условия надежного охлаждения двигателя. Учиты-

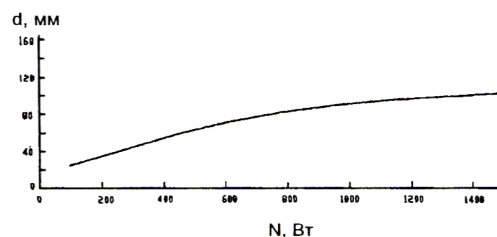


Рис. 3. Характерная зависимость наружного диаметра КИУ от номинальной мощности к двигателю

вая, что КПД двигателя составляет 60 %, то 40 % подводимой к двигателю мощности необходимо сбросить путем излучения.

Характерная зависимость наружного диаметра КИУ d от номинальной мощности двигателя N представлена на рис. 3 (по результатам обработки рабочих характеристик существующих двигателей).

Также особое внимание уделяется обеспечению ресурса работы двигателя, который зависит от размеров КИУ (а именно от ширины канала и расположения ЗИУ [2]), материала КИУ и входных параметров СПД. В основном процесс разрушения камеры и ограничивает ресурс СПД. Зона износа стенок локализована вблизи магнитных полюсов. Сам износ стенок не приводит к существенным изменениям параметров двигателя, пока не произойдет существенный износ полюсов магнитной системы.

1. Белан Н. В., Ким В. П. и др. Стационарные плазменные двигатели. — Харьков, 1989.—316 с.
2. Ким В. П. Анализ закономерностей износа изолятора, ограничивающего ускорительный канал // Источники и ускорители плазмы.—1982.—6.—С. 7—17.
3. Рудников А. И., Тихонов В. Б. Методика оценки интегральных параметров УЗДП // Физика плазмы.—1983.—9, № 4.
4. Белан Н. В. Олендарев В. Д. Оранский А. И. Физико-математическая модель процессов в плазменных двигателях с азимутальным дрейфом электронов. — Харьков.: ХАИ, 2001.

Presented in this paper are results of estimation of effects of the ionization/acceleration chamber geometry and material upon the operability of plasma thrusters. The processes developing in the ionization/acceleration chamber are considered. Shown also the processes of formation of zones in the ionization/acceleration chamber, and the results of analyzing the effects of these processes on the thruster operability.