

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследований влияния способов подачи газа в полость разрядной камеры на основные параметры и характеристики электрореактивных двигателей (ЭРД). Повышение эффективности работы ЭРД достигается за счет, во-первых, дополнительного распределения газа по глубине разрядной камеры путем приближения каналов впрыска газа непосредственно к входу в зону ионизации, и, во-вторых, ориентации каналов впрыска газа таким образом, чтобы подаваемый газ преимущественно подавался вдоль входа в зону ионизации. Испытания проводились на моделях различного типоразмера в диапазоне рабочих мощностей от 100 Вт до 2,3 кВт, включая режимы работы при высоких разрядных напряжениях.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, стационарный плазменный двигатель, гибридный плазменный двигатель, разрядная камера, анод-газораспределитель, коэффициент ионизации.

Плазменные двигатели на основе ускорителя плазмы с замкнутым дрейфом электронов, такие как стационарный плазменный двигатель (СПД), двигатель с анодным слоем (ДАС), а также появившийся в последние годы гибридный плазменный двигатель (ГПД) [1], имеют достаточно высокие интегральные характеристики. В СПД стабильность основных параметров и характеристик, особенно обеспечение ресурса работы, существенно зависит от организации процесса подачи рабочего тела (РТ) в разрядную камеру (РК). Организация процесса подачи РТ осуществляется, как правило, через каналы подвода РТ, выполненные в необходимом количестве в виде калиброванных отверстий, обеспечивающих азимутальную равномерность распределения РТ в коаксиальном ускорительном канале (УК) как необходимого условия обеспечения однородности разряда плазмы [2, с. 143–145].

Жесткие требования к обеспечению высокой азимутальной равномерности распределения разряда плазмы в УК, существенно влияющей на КПД и ресурс работы таких ЭРД, требуют разработки дополнительных мероприятий, направленных на дальнейшее повышение однородности распределения РТ как в азимутальном направлении, так и в продольном направлении УК, путем размещения каналов впрыска РТ по всему окружающему объему вблизи входа зоны ионизации [2, с. 151].

Учитывая вышесказанное, целью данной работы являлось исследование влияния организации процесса подачи РТ в РК ЭРД, а также проведение анализа конструкций анодов-газораспределителей различных моделей СПД и ГПД с целью определения дополнительных путей повышения азимутальной равномерности распределения рабочего газа в УК для стабилизации основных удельных параметров и характеристик ЭРД.

Повышение эффективности управления концентрацией плазмы в пристеночных участках может быть достигнуто за счет новой геометрии комбинированной металлокерамической РК, в которой появляется возможность осуществления дополнительного впрыска части рабочего газа непосредственно в пристеночных областях, когда глубина зоны ионизации

по мере приближения к её стенкам становится меньше ширины УК.

При такой организации подачи РТ в РК решалась также задача по обеспечению однородности распределения газа в коаксиальном УК в азимутальном направлении при условии подвода РТ к ЭРД по одной газовой магистрали подвода РТ.

Кроме того, оптимизация процессов ионизации внутри УК является важным и для снижения энергетических затрат, обусловленных вторичной ионизацией ионов.

Как известно, концентрация нейтральных атомов в РК зависит в основном от подаваемого расхода РТ, а также от геометрических размеров и объема РК [3, с. 187].

Исследование проводилось по изучению влияния дополнительного объемного распределения РТ по глубине УК в комбинации с обеспечением азимутальной равномерности распределения РТ.

Основным критерием для оценки использования РТ являлся коэффициент переработки нейтральных атомов подаваемого РТ в ускоряемые ионы (часто называемый также коэффициентом использования РТ) [4]:

$$K_i = I_i / I_m, \quad (1)$$

где I_i – ток ионов, выходящих из канала; I_m – расход, выраженный в токовых единицах:

$$I_m = \frac{\dot{m}}{M} e, \quad (2)$$

где \dot{m} – расход РТ; M – масса атомов РТ (для ксенона $M = 2,18 \cdot 10^{-25}$ кг); e – заряд электрона.

Как известно, наиболее оптимальным считается режим функционирования ЭРД, когда все нейтральные атомы РТ тела однократно ионизируются, и впоследствии все образовавшиеся ионы ускоряются. При этом желательно, чтобы число попадающих на стенки ионов, приводящих к их нейтрализации с последующей повторной ионизацией образовавшихся атомов было минимально или, чтобы они отсутствовали полностью ($K_i \approx 1$).

Рассмотрим более подробно конструкцию специального газораспределителя, изготовленного для та-

кого рода исследований, функции которого из конструктивных соображений лучшей компактности рациональней совмещать с анодом.

Для исследования влияния равномерности распределения РТ по азимуту и глубине УК, а также определения наиболее оптимальных мест расположения впрыска газа непосредственно в РК при одних и тех же условиях испытаний на эффективность процессов ионизации и ускорения был разработан и изготовлен специальный многополостной полый анод с несколькими независимыми газораспределительными полостями и трактами подачи РТ в различные области УК (рис. 1). Такой анод был применен в составе двигателя SPT-1 и прошел исследовательские испытания при различных комбинациях подачи рабочего газа в диапазоне расходов от 2,2 до 5,8 мг/с.

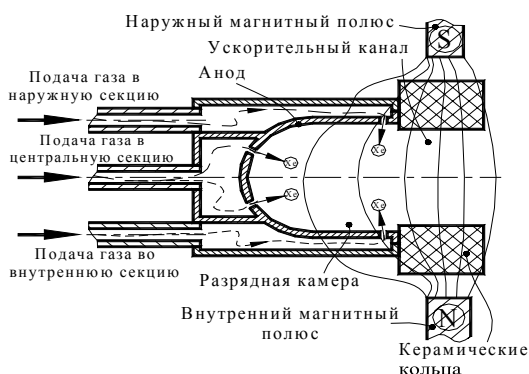


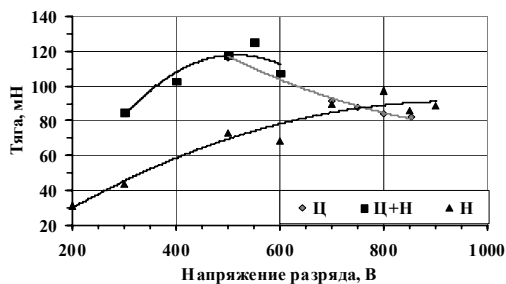
Рис. 1. Многополостной анод-газораспределитель

Испытанный многополостной анод-газораспределитель снабжен дополнительными каналами подачи РТ,

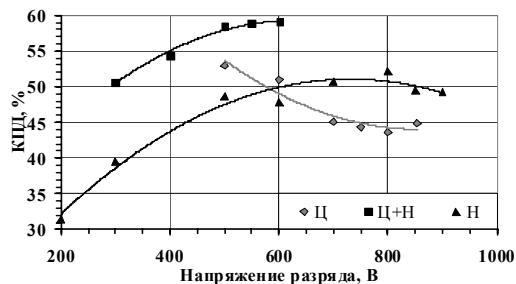
которые расположены на выходе из анодной полости – вблизи наружной и внутренней стенок РК. Представлялось, что, задавая и управляя в газораспределителе соотношением расходов между подачей рабочего газа в глубину анодной полости и в различных пристеночных областях, можно улучшить фокусировку ионного потока [5]. Для обеспечения возможности управления независимой подачей РТ в центральную и периферийную части анодной полости, имеющие собственные каналы впрыска рабочего газа в РК, были снабжены независимыми друг от друга трактами подвода рабочего газа.

Результаты проведенных исследовательских испытаний в ОКБ «Факел» при различных способах подачи РТ в полость РК в составе двигателя SPT-1 и полученные при этом зависимости основных параметров и характеристик, таких как тяга, удельный импульс и КПД, представлены на рис. 2.

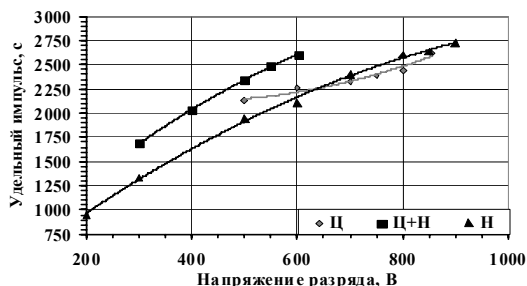
Во время испытаний при подаче анодного расхода через центральный тракт подачи РТ газ подавался через два концентрических ряда расходных отверстий $\varnothing 0,5$ мм (по 24 отверстия в каждом ряду), и впрыск РТ осуществлялся только из центральной секции газового распределителя, что воспроизводило типовую для известных СПД и ДАС прямоточную подачу РТ из глубины РК, которая реализуется в результате того, что в большинстве случаев анод-газораспределитель размещается в донной части РК, т. е. на максимальном удалении от среза РК. В данной модели удаленность мест впрыска РТ от входа в зону ионизации (внутренняя граница магнитной линзы $\sim 0,8V_{max}$ [6]) составляла 20...21 мм. Такая прямоточная схема подачи РТ обозначена буквой «Ц».



а



б



в

Рис. 2. Зависимость от напряжения разряда при различных схемах подачи РТ при постоянной мощности 2,3 кВт: а – тяги; б – КПД; в – удельного импульса двигателя SPT-1

При осуществлении подачи анодного расхода только по наружному тракту подачи РТ газ проходил через 16 расходных отверстий $\varnothing 0,7$ мм, а впрыск газа в РК осуществлялся в радиальном направлении только из наружной секции газового распределителя. При этом оценивалась эффективность такой радиальной подачи и использования РТ при предельно максимальном приближении мест впрыска РТ к входной части УК (4,0...4,5 мм), что существенно ближе относительно среза РК в сравнении с типовой подачей, применяемой в СПД. Данная радиальная схема подачи РТ обозначена буквой «Н».

В том же случае, когда подача анодного расхода выполнялась только по внутреннему тракту подачи РТ газ проходил также через 16 расходных отверстий $\varnothing 0,7$ мм, и впрыск газа происходил также в радиальном направлении, но только из внутренней секции газового распределителя. При этом также осуществлялась оценка эффективности такой радиальной подачи и использования РТ при максимальном приближении мест впрыска РТ к входной части УК (4,0...4,5 мм), что также существенно ближе к срезу РК в сравнении с типовой подачей РТ, используемой в СПД и ДАС. Такая радиальная схема подачи РТ была обозначена «В». Каналы впрыска из внутренней части анода были расположены на том же уровне, что и каналы радиального впрыска из наружной секции, но с чередованием между ними за счет сдвига по азимуту.

В случаях комбинированной схемы подачи РТ через различные секции газового распределителя соотношение анодных расходов, идущих через различные полости, обеспечивалось соотношением гидравлических сопротивлений соответствующих трактов. Обозначение комбинированной схемы подачи РТ на рисунках имеет соответствующую комбинацию букв, например, при одновременной радиальной подаче РТ в наружную и центральную секции оно имеет вид «Н+Ц», при этом соотношение анодных расходов составляло ~40–60 %.

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что наилучшая эффективность работы двигателя достигается при комбинированной одновременной прямоточной подаче РТ через центральную и внешнюю радиальную области подачи РТ. В этом случае обеспечивается равномерность распределения подачи газа не только в азимутальном направлении, но и за счет дополнительного распределения газа по глубине УК, т. е. при дополнительном распределении газа по всему рабочему объему прианодной полости. Такое повышение эффективности работы при дополнительном распределении РТ по глубине РК, вероятно, обусловлено избыточной протяженностью УК, что типично для ускорителей плазмы на базе протяженного УК.

Зафиксировано также, что при прямоточной подаче РТ только через центральную секцию газораспределителя, когда нейтральный газ появляется в УК на максимальном удалении от среза РК, зависимости тяги и КПД двигателя от разрядного напряжения имеют спадающий характер при повышении напря-

жений, что принципиально отличается от поведения зависимостей, полученных при других вариантах подачи газа, и является типичным для СПД.

Кроме того, при любых комбинациях подачи газа с использованием внутренней секции газораспределителя («В»), были зафиксированы относительно низкие результаты по основным параметрам и характеристикам двигателя, даже в сравнении с подобной радиальной подачей РТ, но только через наружную секцию. Проведенный детальный анализ конструкции разрядной и магнитной систем данной модели и их взаимное расположение выявил лишь существование различий локальных структур магнитных полей в зонах расположения наружных и внутренних каналов впрыска РТ в РК (рис. 3).

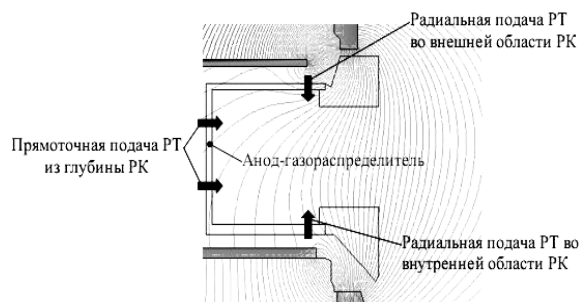


Рис. 3. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке двигателя SPT-1

Если в зоне наружных каналов радиальной подачи РТ силовые линии магнитного поля расположены поперек относительно направления впрыска и данная область является областью относительно больших магнитных полей (т. е. подобие магнитной линзы), то в зоне внутренних каналов впрыска РТ присутствуют преимущественно продольные силовые линии магнитного поля, а сама область является областью действия относительно слабых магнитных полей. Кроме того, выявлена незначительная разница в удаленности наружных и внутренних каналов радиального впрыска РТ относительно области максимальных значений радиальной составляющей индукции магнитного поля, вследствие значительной кривизны ориентации магнитной линзы относительно среза УК (направления потока газа).

Оценка эффективности организации процессов ионизации и ускорения, а также использования РТ, при различных вариантах комбинаций подачи РТ в РК проводилась по коэффициенту ионизации K_i , зависимость которого от разрядного напряжения представлена на рис. 4.

Как видно из полученных результатов, наилучшие показатели коэффициента использования РТ достигаются при комбинированной подаче РТ, сочетающей одновременно радиальный и прямоточный впрыск через наружную и центральную секции газораспределителя, который может быть квалифицирован как наилучший вариант распределения РТ. Как видно, значения этого коэффициента лежат в узко ограниченном диапазоне значений от 0,95 до 1,15, и его рост

стабилизируется на уровне значений $K_i \sim 1,18$ при последующем повышении разрядных напряжений.

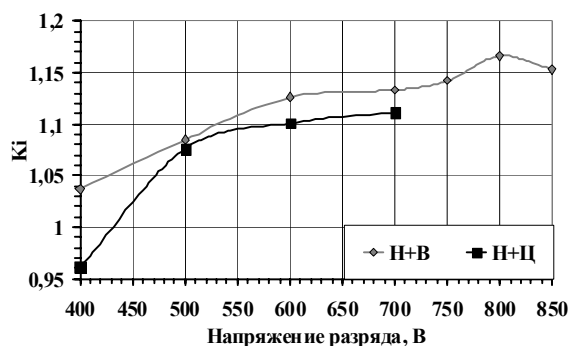


Рис. 4. Зависимость коэффициента ионизации K_i от напряжения разряда при различных схемах подачи РТ в двигателе SPT-1

С целью подтверждения зафиксированного положительного эффекта, выявленного при проведении исследовательских испытаний модели с размером по срединному диаметру канала $\varnothing 85$ мм, выражающемуся в повышении эффективности работы ЭРД, и изучения возможности минимизации линейных размеров РК путем обеспечения дополнительного объемного распределения РТ в РК, была разработана и изготовлена малоразмерная модель с размером по срединному диаметру канала $\varnothing 40$ мм под условным наименованием прототип двигателя ПлаС-40. В такой модели полый анод также был выполнен магнитопроводящим, а в его газовом распределителе специально были выполнены различно направленные и расположенные только с наружной стороны РК каналы впрыска РТ, с чередованием расходных отверстий (всего 24 отверстия), обеспечивающих суммарную подачу РТ в радиальном (12 отверстий) и «обратном» к направлению ускорения (12 отверстий) направлениях в пропорции $\sim 50-50$ %. Расходные отверстия в данной модели были выполнены диаметром $\varnothing 0,35$ мм и максимально приближены к входу в УК [7] на расстоянии $6,5 \dots 7,0$ мм. При этом осуществлялась 100%-ная подача суммарного анодного расхода. Конструктивная схема такого магнитного полого анода, обеспечивающего распределенную подачу РТ как по азимуту, так и по глубине УК, представлена на рис. 5.

Магнитный полый анод-газораспределитель, в конструкции которого была организована подача РТ только с наружной стороны РК, проходил испытания в составе прототипа двигателя ПлаС-40 в диапазоне расходов от 1,25 до 2,50 мг/с (рис. 5).

На первом этапе были проведены параметрические испытания по программе, предусматривающей выполнение и проверку следующих характеристик:

- снятие вольтамперных характеристик (ВАХ) при фиксированных анодных расходах, обеспечивающих токи разряда в диапазоне значений от 1,00 до 2,25 А с шаговым переходом через 0,25 А при токах в катушках намагничивания, оптимизированных при напряжении разряда 150 В;

- определение верхней границы работоспособности модели по мощности;
- проверку эффективности работы катодов-компенсаторов в области малых катодных расходов;
- проверку стабильности характеристик на мощности разряда 200 и 300 Вт.

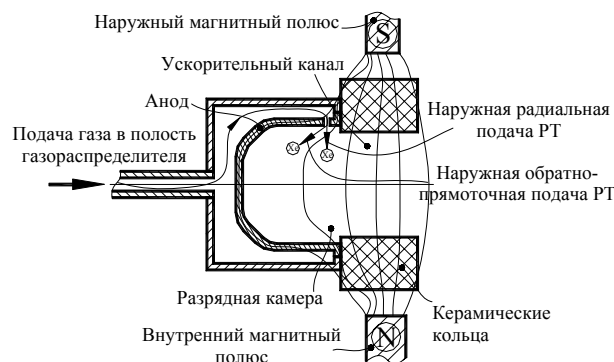


Рис. 5. Магнитный анод-газораспределитель прототипа двигателя ПлаС-40

Отдельно были проведены исследования влияния длины керамических колец (вдоль оси двигателя), формирующих УК, при переходе на высоковольтную работу на режимах повышенной мощности. В результате проведенных испытаний было зафиксировано, что для варианта модели при неизменной ширине ее УК 9 мм, но при укорочении длины керамических колец с 7 до 6 мм, а также одновременном выносе максимума индукции магнитного поля посередине УК за срез канала на ~ 1 мм, оптимальные режимы (по критерию минимальности разрядного тока) реализуются при более сильных магнитных полях. Это повышает вероятность перехода режимов работы двигателя с оптимальных на менее стабильные, причем с неопределенной произвольной периодичностью и, соответственно, к снижению уровня интегральных параметров и характеристик в среднем на 2–3 %. Однако при этом прототип двигателя ПлаС-40 работал более устойчиво по сравнению с модулем СПД-50 стандартной схемы сопоставимого размера, так как исчезли появлявшиеся в этой модели перегревы выходных участков стенок РК (изготовленные из диэлектрического материала) на высоковольтном режиме $U_p = 500$ В. Измеренные на керамических кольцах пояски эрозии имели четкие границы и составляли: ширина наружного пояска 3,0 мм, а внутреннего от 4,0 до 4,5 мм.

Проверка стабильности параметров выполнялась на мощности 200, 300 и 400 Вт. Также была проведена наработка длительностью 1 ч, при этом ширина поясков проявившегося износа керамических колец составила: для наружного 3,0 мм, а внутреннего 3,2 мм, относительно среза разрядной камеры.

Общие результаты проведенных параметрических испытаний следующие (рис. 6):

- была подтверждена работоспособность конструкции при мощностях разряда в диапазоне от 100

до 580 Вт, причем в указанном диапазоне интегральные характеристики сопоставимы, а на отдельных режимах даже превосходят параметры и характеристики модуля СПД-50, работающего в диапазоне расходов от 1,31 до 2,36 мг/с;

– разработанная гибридная конструктивная схема ЭРД с магнитным полым анодом менее чувствительна к изменениям магнитного поля, т. е. более устойчива при изменении токов намагничивания в широких пределах: его параметры остаются практически постоянными. Выявленная стабильность параметров и характеристик, являющаяся нетипичной для СПД, снижает риски срыва на режимы с интенсивным развитием колебаний и существенным снижением эффективности рабочего процесса;

– зафиксированные высокие интегральные характеристики могут достигаться при различных комбинациях токов намагничивания, что позволяет выбирать наиболее оптимальные сочетания ампер-витков, исходя из разнообразных критериев, например, при решении задач по минимизации массы магнитной системы или возможностей включения в разрядную цепь катушек намагничивания.

Анализ полученных данных показывает, что зависимость интегральных параметров и характеристик от напряжения разряда при постоянной мощности имеет характер, аналогичный характеру зависимостей, полученных при работе на переменной мощности. Кроме того, подтверждена эффективность работы

анода малых размеров, в котором радиальные каналы впрыска РТ максимально приближены (вынесены по потоку ускорения плазмы) к входу в зону ионизации без потерь в использовании РТ. Результаты анализа по коэффициенту ионизации РТ, полученные при различных режимах по току разряда, а, следовательно, и при различных анодных расходах, представлены в виде зависимостей от разрядного напряжения на рис. 7.

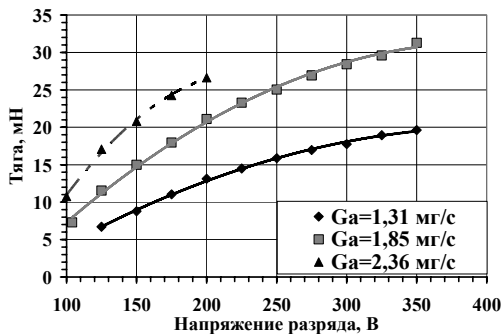
Приведенные результаты получены при ширине УК в зоне ионизации между керамическими кольцами 9 мм.

Как видно, при такой ширине УК в области малых разрядных напряжений и, соответственно, мощности разряда, удельный расход явно недостаточен, особенно для режима с разрядным током 1 А, и его предпочтительней в дальнейшем увеличить путем сужения ширины канала до 8 мм.

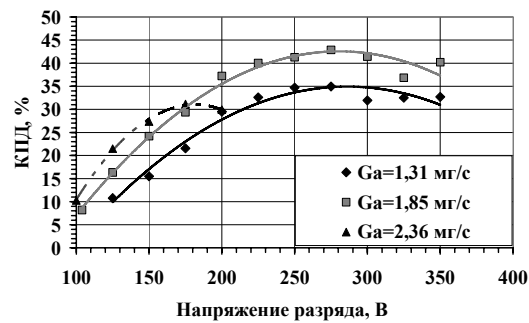
На втором этапе были проведены 200-часовые ресурсные испытания, по результатам которых спрогнозирован предельно достижимый ресурс.

По оценкам толщины изолятора в поперечном направлении РК 3 мм достаточно для обеспечения ресурса не менее 3 000 ч на режиме $U_p = 200$ В и $I_p = 1,0$ А.

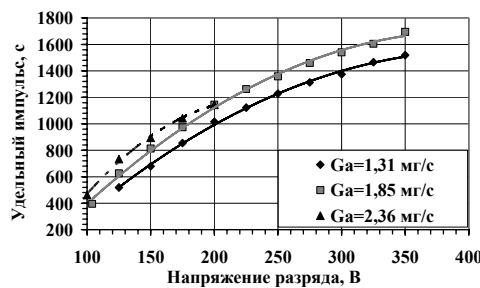
При мощности же 400 Вт (на режиме $U_p = 280$ В и $I_p = 1,4$ А) для обеспечения ресурса 1 500 ч требуется увеличение толщины наружной стенки изолятора РК как минимум до 3,5 мм.



а



б



в

Рис. 6. Зависимость от напряжения разряда при переменной мощности от 100 до 580 Вт: а – тяги; б – КПД; в – удельного импульса ПлаС-40

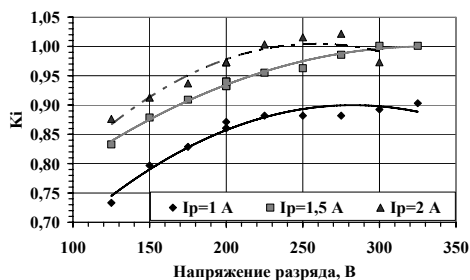


Рис. 7. Зависимость коэффициента ионизации от напряжения разряда для прототипа ПлаС-40

В результате проведенных работ по исследованию влияния газораспределения как в азимутальном направлении УК, так и по всему объему РК, за счет выбора мест размещения каналов и различных способов подачи РТ в разных по типоразмеру и мощности ЭРД, выполненных при одних и тех же условиях испытаний, определено, что есть возможность повысить эффективность работы двигателя за счет предельного приближения каналов подачи РТ непосредственно к входу УК с ориентацией направления впрыска части РТ вдоль границы названного входа. Такой результат получен при комбинированной одновременной прямой подаче части РТ из глубины РК – через центральную секцию и радиальной боковой подаче оставшейся части РТ – через наружную секцию, т. е. когда дополнительно обеспечивается объемное распределение рабочего газа. Сравнительный анализ различных способов подачи РТ в модели SPT-1 продемонстрировал, что лучшая эффективность работы ЭРД достигается при дополнительном использовании боковых подач РТ. При этом зафиксированы прямо противоположные тенденции поведения основных параметров и характеристик при повышении разрядных напряжений для гибридных двигателей в сравнении с СПД. На малоразмерной модели проверена и подтверждена возможность повышения эффективной работы ЭРД при организации только радиальной боковой подачи РТ, максимально приближенной к входу в зону ионизации с внешней стороны полого анода-газораспределителя. Полученные результаты свиде-

тельствуют о возможности уменьшения глубины РК. Наилучшие показатели по критерию коэффициента ионизации достигаются в узко ограниченном диапазоне значений от 0,95 до 1,15, при этом стабилизация коэффициента ионизации при повышении разрядных напряжений наблюдается при значении $\sim 1,18$. При уменьшении протяженности УК и объема анодной полости непосредственная подача части РТ у границы зоны ионизации в радиальном и обратно-прямоточном направлениях также позволяет реализовать объемное распределение подаваемого в РК ЭРД рабочего газа, что способствует повышению стабильности и уровня удельных параметров и характеристик ЭРД на 15–25 %.

Библиографические ссылки

1. Гопанчук В. В., Потапенко М. Ю. Анализ современных ЭРД с высоким удельным импульсом тяги // *Авиация и космонавтика* – 2010 : 9-я Междунар. конф. СПб. : Мастерская печати, 2010. С. 177–178.
2. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. М. : Машиностроение, 1989.
3. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. 2-е изд., испр. и доп. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.
4. Бугрова А. И., Ким В. П. Современные состояния физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения // *Плазменные ускорители и ионные инжекторы*. М. : Наука, 1984.
5. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов : пат. Рос. Федерации № 2191487, кл. H05H1/54, F03H 1/00 / В. В. Гопанчук ; опубл. 30.10.00, Бюл. № 29.
6. Hofer Richard R., Peterson Peter Y., Gallimore Alec D. A High Specific Impulse Two-Stage Hall Thruster with Plasma Lens Focusing // *IEPC-01-036, 27th International Electric Propulsion Conference*. Pasadena, CA, 2001.
7. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов : пат. Рос. Федерации № 2371605, кл. F03H 1/00 / В. В. Гопанчук, В. С. Жасан, Н. А. Семенова ; опубл. 16.06.2008, Бюл. № 30.

V. V. Gopanchuk, V. S. Zhasan, M. Yu. Potapenko

INCREASE OF EFFICIENCY OF GAS DISTRIBUTION IN THE ACCELERATING CHANNEL OF AN ELECTROJET ENGINE

The article presents results of researches of the influence of modes of gas feeding to a cavity of a discharge chamber on the basis critical parameters and characteristics of electrojet engines. Increase of operating effect of electrojet engines is reached at the expense of, first, additional distribution of gas on depth of the discharge chamber by placing ports of injection of gas directly to an input in an ionization zone, and, secondly, by orientation of ports of injection of gas so that submitted gas mainly moved along an input in an ionization zone. Tests were spent on models of a various standard size in a range of working capacities from 100 Vt to 2,3 kw, including modes of operation at high discharge voltage.

Keywords: electrojet engine, stationary plasma engine, hybrid plasma engine, discharge chamber, anode-gas-distributor, ionization factor.

© Гопанчук В. В., Жасан В. С., Потапенко М. Ю., 2011