

04

Модель ионного потока и методика расчета эрозии стенок разрядной камеры стационарного плазменного двигателя

© В.П. Ким, В.К. Абгарян

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (Национального исследовательского университета)
E-mail: riame4@sokol.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2017 г.

Стационарные плазменные двигатели (СПД) Морозова эффективно используются в системах управления движением отечественных и зарубежных космических аппаратов, и область их применения расширяется. В связи с этим возрастают требования к ним как по выходным параметрам, так и по ресурсу. При решении проблем увеличения ресурса СПД полезны методики прогнозирования износа стенок разрядной камеры — процесса, ограничивающего ресурс двигателя. Одна из таких методик разработана авторами ранее и эффективно использовалась при разработке современных СПД. Здесь приводятся дополнительное физическое обоснование и развитие основных положений, на которых базировалась разработка названной методики с учетом результатов исследований, полученных в последние годы. Такое обоснование позволяет расширить пределы применимости рассматриваемой методики.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.20.45153.16846

В [1,2] авторами настоящей работы были опубликованы результаты разработки одной из достаточно эффективных методик расчета эрозии стенок разрядной камеры (РК) стационарного плазменного двигателя (СПД) ускоренными ионами. Ее особенностями являлись ориентация на максимальное использование имеющихся экспериментальных данных по износу стенок разрядной камеры при ресурсных испытаниях и учет напыления распыленного со стенок разрядной камеры материала на остальные поверхности разрядной камеры. Эти разработки базировались на положениях, которые можно было сформулировать в момент выполнения указанных работ. Поэтому задачей данной публикации является рассмотрение названных положений с учетом новых результатов

исследований процессов в СПД, полученных к настоящему времени, с целью их более полного обоснования. Среди этих положений наиболее важными являются следующие:

— зона ускорения, в которой реализуется основное падение потенциала, располагается в области разряда с максимальными значениями индукции магнитного поля, а граница зоны ускорения со стороны анода находится в сечении канала, где отношение значения B_e индукции магнитного поля на срединной поверхности ускорительного канала к максимальному ее значению B_{\max} на этой поверхности составляет определенную величину;

— ионы, попадающие на стенки РК, движутся в плоскостях продольных сечений ускорительного канала вдоль лучей, исходящих из условных центров — фиктивных источников ионов, расположенных внутри канала, т. е. они не имеют азимутальных составляющих скорости, а продольные координаты границ зон эрозии на стенках со стороны анода совпадают с продольной координатой соответствующих центров;

— перемещение точек поверхности определяется балансом скоростей распыления материала поверхности и напыления на нее со всех остальных участков распыляемых стенок с учетом их затенения при кольцевой геометрии ускорительного канала.

Была разработана также методика ускоренной оценки износа стенок, при реализации которой можно было с использованием профилей стенок РК, полученных в результате относительно кратковременных испытаний, восстановить распределение распыляющей способности ионного потока на исходных поверхностях стенок и на основе этой информации достаточно точно прогнозировать дальнейший износ стенок. Так, например, при оптимизации параметров ионного потока на исходной границе по результатам определения профилей стенок после испытаний одного из двигателей СПД-100 в течение 310 h был получен удовлетворительный прогноз износа стенок до 3000–4000 h наработки этого двигателя (рис. 1, [3]). Таким образом, применение этой методики позволяет сократить длительность дорогостоящих ресурсных испытаний в 5–10 раз, т. е. разработан достаточно эффективный инструмент для анализа закономерностей и прогнозирования износа стенок РК СПД.

Рассмотренные положения были сформулированы на основе анализа небольшого объема экспериментальных данных, имевшихся на момент разработки модели и методики расчета. К настоящему времени появились новые данные, позволяющие осуществить более полное их обоснование, чтобы можно было строить модели и методики прогнозирования

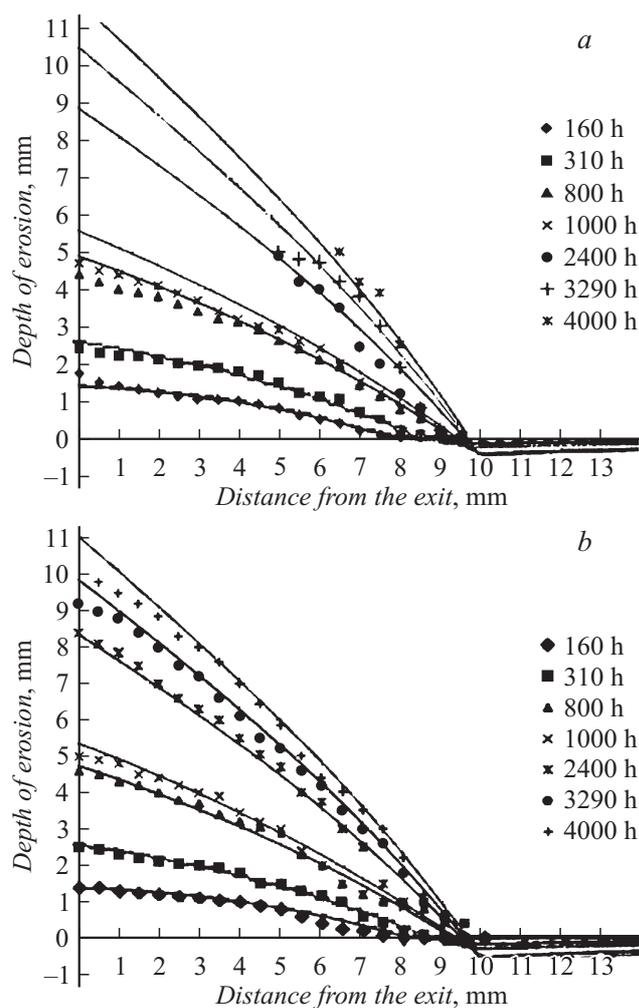


Рис. 1. Расчетные профили (линии), построенные с оптимизацией распределений плотности тока и энергии по данным, полученным при наработке 310 h, и экспериментальные точки на профилях наружной (*a*) и внутренней (*b*) стенок разрядной камеры одного из двигателей СПД-100 при различных наработках на ресурс.

износа стенок разрядной камеры новых моделей СПД. Они сводятся к следующему.

1. На основе анализа закономерностей формирования электрического поля в СПД подтверждено, что зона ускорения в его разряде располагается в области максимальных значений индукции магнитного поля [4]. Это определяется тем, что распределение электрического поля в значительной мере обусловлено электронной проводимостью плазмы поперек магнитного поля, и тем, что названная проводимость минимальна в областях с максимальной индукцией магнитного поля. Справедливость этого положения позволяет при проведении расчетов „привязывать“ зону ускорения и зоны эрозии стенок разрядной камеры к области с максимальными значениями индукции магнитного поля. При этом остается вопрос о продольном размере слоя ионизации и ускорения, определяющего границу зон эрозии стенок со стороны анода и расчетную зону для моделирования износа.

2. В работе [5] было проведено исследование влияния характеристик магнитного поля и режима работы на положение зон эрозии на стенках разрядной камеры для современных моделей СПД разного масштаба, работавших при разрядных напряжениях до 800 V и разрядных мощностях от 0.1 до 5 kW. Полученные данные показали, что границы зон эрозии на стенках располагаются в окрестности точек пересечения стенок РК одной магнитной силовой линией. При этом значения отношения $k = B_e/B_{\max}$ при разных плотностях расхода рабочего вещества (ксенона) через ускорительный канал укладываются на единую зависимость для всех исследованных моделей и режимов работы (рис. 2). Таким образом, установлено, что положение границ износа определяется не только распределением магнитного поля, но и плотностью расхода рабочего вещества (РВ) в ускорительном канале в двигателях разного масштаба, работающих на разных режимах.

То, что границы износа „привязываются“ к одной силовой линии магнитного поля, можно объяснить тем, что температура электронов вдоль силовой линии может быть принята постоянной и концентрации плазмы у поверхностей внутренней и наружной стенок в оптимизированных режимах работы современных СПД должны различаться незначительно. Дело в том, что упомянутые режимы подбираются таким образом, чтобы плотности тока на наружную и внутреннюю стенку были близки. Последнее обеспечивает примерно одинаковую скорость износа стенок РК и выработку запаса на износ на обеих стенках.

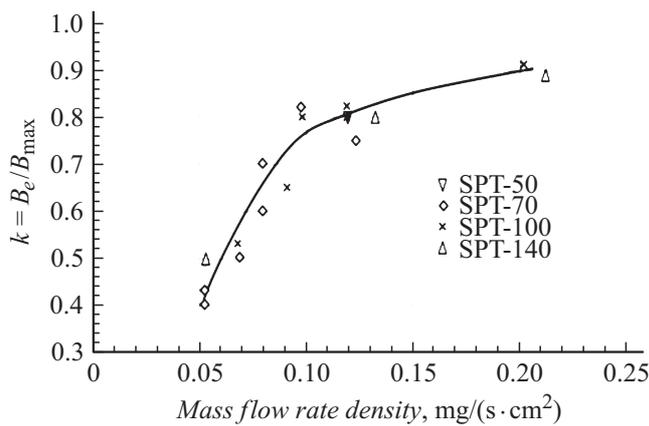


Рис. 2. Зависимость отношения $k = B_e/B_{\max}$ от плотности расхода РВ в ускорительном канале для СПД различных типоразмеров, работающих в различных режимах.

Соответственно получаются распределения концентрации в канале с достаточно близкими значениями у наружной и внутренней стенок. Следовательно, в соответствии с известной формулой Морозова для „термализованного“ потенциала [6] разности потенциалов, рассчитанные у разных стенок вдоль одной силовой линии, должны быть небольшими. Поэтому небольшой должна быть и разница энергий ионов, которые выпадают на стенки в местах пересечения их рассматриваемой линией. Последнее объясняет то, что границы износа располагаются в окрестности точек пересечения стенок одной и той же силовой линией.

Продольный размер слоя ионизации и ускорения (толщина слоя) L_c может быть оценен с использованием известной формулы Жаринова [4,7], согласно которой

$$L_c \approx R_{eL}(\Delta U) \sqrt{\frac{v_e}{v_i}}, \quad (1)$$

где $R_{eL}(\Delta U)$, v_e , $v_i = \langle \sigma_i V_e \rangle n_a$ — соответственно ларморовский радиус электронов, рассчитанный по падению напряжения ΔU на слое, эффективная частота столкновений электронов, приводящих к рассеянию дрейфовой составляющей их скорости и появлению продольной (вдоль

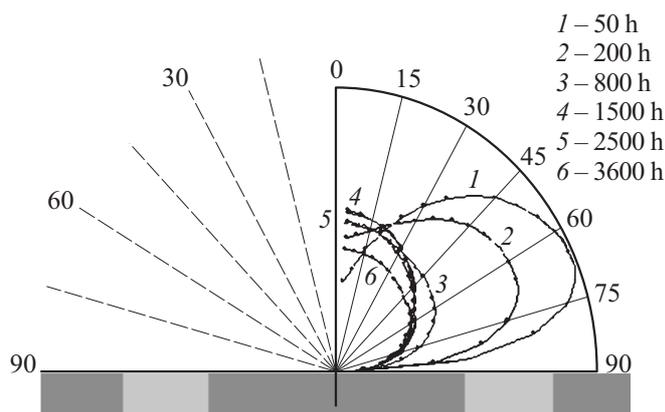


Рис. 3. Индикатрисы потоков распыленного вещества во внешнее пространство.

направления действия электрического поля и поперек магнитного поля) составляющей электронного тока, и частота ионизационных столкновений электронов.

Можно показать, что частота ν_e и коэффициент $\langle \sigma_i V_e \rangle$ зависят в основном от разрядного напряжения и индукции магнитного поля. Поэтому концентрация нейтральных атомов в ускорительном канале является одним из основных факторов, прямо влияющих на толщину слоя. Поскольку она в первом приближении пропорциональна плотности расхода РВ в канале, указанное объясняет существенное влияние плотности расхода на протяженность слоя. Таким образом, рассмотренную зависимость можно использовать для определения начального положения границ зон эрозии и точечных источников у каждой стенки РК и моделирования износа стенок в новых двигателях традиционной схемы, работающих на разных режимах.

Следует добавить, что результаты ресурсных испытаний свидетельствуют о том, что по мере расширения канала происходит расширение зон эрозии из-за износа выходных частей ограничивающих его стенок. Поэтому в рассмотренной выше методике расчета износа стенок была предусмотрена возможность постепенного смещения центров — источников ионов — при расширении ускорительного

6* Письма в ЖТФ, 2017, том 43, вып. 20

канала с использованием экспериментальных данных. Для физического обоснования указанного расширения зон эрозии можно использовать приведенную выше формулу Жаринова (1), если учесть, что входящая в нее концентрация атомов должна зависеть от площади поперечного сечения канала. Такой учет позволяет получить следующую формулу для изменения протяженности зон эрозии:

$$\frac{l_e}{l_{e0}} \sim \sqrt{\left(1 + 2 \frac{l_e}{b} \operatorname{tg} \alpha\right)}, \quad (2)$$

где l_e , l_{e0} , b , α — соответственно текущие и начальные значения протяженности зон эрозии, ширина канала и угол поворота профилей стенок из-за их износа.

Оценки изменения толщины зон эрозии по приведенной формуле показывают, что она правильно отражает тенденции изменения протяженности зон эрозии. Но при проведении расчетов необходимо ввести поправочный коэффициент, учитывающий снижение роли стенок в формировании концентрации нейтральных атомов при значительных расширениях канала.

К отмеченному выше следует добавить, что рассмотренная методика позволяет также рассчитывать потоки распыленного вещества из двигателя во внешнее пространство и диаграммы их направленности (индикатрисы) с учетом изменения геометрии стенок. Как видно из модельных расчетов, названные диаграммы существенно изменяются по мере наработки двигателя (рис. 3).

Работа подготовлена к печати при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0231 от 29.09.2016 г. между Московским авиационным институтом и министерством (уникальный идентификатор ПНИЭР–RFMEF157716X0231).

Список литературы

- [1] Ким В. // Источники и ускорители плазмы. Харьков: ХАИ, 1983. № 3. С. 3–12.
- [2] Kim V., Abgaryan V., Dumazert P., Kozlov V., Prioul M., Nadiradze A., Svotina V. Development of a software for numerical simulation of the discharge chamber wall erosion by the accelerated ions // The 3rd Int. Spacecraft Propulsion. Chia Laguna, Italy, 2004.

- [3] *Kim V., Abgaryan V., Kozlov V.* et al. // AIAA. Paper 2003-5003.
- [4] *Ким В.П.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 3. С. 45–59.
- [5] *Mitrofanova O.A., Gnizdor R.Yu.* Influence of SPT magnetic field on life time characteristics of the thruster // 33rd Int. Electric Propulsion Conf. Washington: The George Washington University, 2013. IEP-2013-51.
- [6] *Морозов А.И.* // ДАН. 1965. Т. 163. № 36. С. 1363.
- [7] *Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В.* Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. М: Машиностроение, 1973. С. 54–61.