

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ОЭССК И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СКОРОСТИ ЭРОЗИИ РК СПД

В работе приведены алгоритм и результаты испытаний СПД с целью определения режима с минимальной неравномерностью износа материала РК. Показаны результаты сравнительного анализа прямых и косвенных методов диагностики износа изоляторов РК СПД. Проведена оценка основных достоинств и недостатков косвенных методов диагностики. Приведены преимущества использования метода ОЭССК с целью определения износа кромок изоляторов РК СПД при различных режимах работы двигателя. Показано, что за счет применения метода диагностики ОЭССК удалось значительно снизить длительность испытаний СПД.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, ресурс, скорость эрозии, оптическая эмиссионная спектроскопия со сканированием плазмы двигателя через коллиматор.

Введение

Потребность в расширении модельного ряда стационарных плазменных двигателей (СПД) и в повышении их технических характеристик требует глубокого изучения процессов, происходящих в СПД [1, 2]. В связи с чем постоянно разрабатывается новая и совершенствуется уже существующая диагностическая база, которая позволяет не только повышать характеристики разрабатываемых и находящихся в процессе испытаний двигателей, а также сокращать затраты на их производство и исследования [3].

В лаборатории ЭРД ХАИ проводятся разработка, изготовление и испытания СПД различных мощностей и конструкций [4]. Большое внимание уделяется исследованию ресурсных характеристик [4], в частности, зависимости износа разрядной камеры (РК) от режимов работы двигателя [3], от состава керамических изоляторов [4] и т.д. Под данный круг задач был разработан метод диагностики, позволяющий исследовать скорости эрозии наружной и внутренней кромок РК СПД на основе бесконтактных экспресс измерений метода оптической эмиссионной спектроскопии для определения износа изоляторов РК при различных режимах работы СПД.

В рамках поставленной цели были получены следующие результаты:

- усовершенствован метод диагностики износа РК СПД (метод оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор (ОЭССК)) за счет измерений спектра излучения продуктов распыления с наружной и внутренней кера-

мических вставок, позволяющий исследовать эрозию изоляторов при различных режимах работы двигателя, для увеличения ресурса РК, снижения длительности испытаний и снижения себестоимости разработки СПД [3, 5].

- усовершенствован метод расчета скорости эрозии РК СПД при измерениях методом ОЭССК, в котором учтены зависимости величины регистрируемого излучения от размеров областей износа изоляторов, от угла расходимости приемника излучения и от расстояния от источника до приемника излучения, что позволило определять эрозию наружной и внутренней вставок анодного блока СПД непосредственно при проведении его испытаний [3].

Для проверки работоспособности разработанного метода диагностики проведены испытания ряда СПД мощностью 1,5 кВт [3].

1. Сравнение методов исследований износа РК СПД

Проведено сравнение различных методов диагностики износа изоляторов РК СПД. На сегодняшний день существует большое количество методов определения эрозии стенок анодного блока СПД. К ним относятся прямые методы диагностики (определение износа изоляторов производится по потере массы во время работы СПД, по уменьшению толщины торцов керамических вставок, а также по изменению формы профиля пояски эрозии стенок РК), а также косвенные: оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС); абсорбционная спектроскопия (АС), лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ), масс-спектрометрия.

Прямые методы обладают рядом недостатков. Как было указано выше, для измерения радиальной эрозии керамического материала двигателя мощности 1,5 кВт временные затраты на испытания составляют не менее 50 часов.

При необходимости выбора режима эксплуатации СПД временная база наработки двигателя будет составлять 450 часов, что по стоимости проведения испытаний становится сопоставимо со стоимостью изготовления одного двигателя. Присутствуют ограничения по числу измерений, которое равно количеству этапов, на которые разбиты ресурсные испытания. Основной недостаток прямой диагностики заключается в отсутствии возможности измерений износа РК непосредственно во время работы двигателя.

Ограничителями абсорбционной спектроскопии (АС) выступают следующие факторы. Недостаток справочных данных по сечениям поглощений, что накладывает значительные ограничения на число определяемых частиц. Низкая концентрация исследуемого сорта частиц требует использования спектрометров или монохроматоров высокой чувствительности, что налагает ограничения на разрешающую способность оборудования. Относительно сложная схема эксперимента, которая обуславливает необходимость в настройке и калибровке большого числа измерительной аппаратуры. Отсутствие возможности получения данных

о скорости эрозии наружного и внутреннего изоляторов.

ЛИФ считается высокочувствительным методом, так как скорость возбуждения спектра флуоресценции не зависит от параметров плазмы при стабильной работе двигателя, и существует возможность регулировки оборудования до получения максимальной чувствительности по каждому исследуемому компоненту. Однако, необходимость установки и отладки большого количества измерительного оборудования, необходимость перенастройки лазера для исследования различных компонентов спектра ограничивает область применения данного метода.

Несмотря на значительные преимущества современных масс-спектрометров: высокая чувствительность, по сравнению с другими оптическими методами, однозначность идентификации частиц, большой рабочий диапазон масс, — они обладают рядом недостатков. Во-первых, масс-спектрометры, являются сложными как в эксплуатации, так и в обслуживании приборами. Во-вторых, также отсутствует возможность получения данных о скорости эрозии отдельно наружного и внутреннего изоляторов.

Результаты сравнения различных методов представлены в таблице 1. Как видно из предоставленной информации, метод ОЭССК обладает всем рядом преимуществ косвенных методов диагностики.

Таблица 1

Сравнение возможностей методов диагностики износа РК СПД

Возможности метода	Наименование метода						
	Прямые	АС	МС	ЛИФ	МКК	ОЭС	ОЭССК
Бесконтактность							
Возможность измерений во время испытаний	-	+	+	+	+	+	+
Минимальная продолжительность испытаний СПД, ч	450	7	7	7	7	7	7
Техническая простота обеспечения измерений	+	-	-	-	-	+	+
Высокая продолжительность обработки экспериментальных данных	-	-	+	-	+	-	-
Возможность определения эрозии наружной и внутренней кромок РК СПД	-	-	-	-	-	-	+
Возможность определения неравномерности износа РК СПД	-	-	-	-	-	+	+

При использовании усовершенствованного метода ОЭССК удалось уточнить экспериментально-расчетный способ определения скорости эрозии РК. При измерениях спектра методом ОЭС для определения скорости эрозии не учитывается то, что излучение ксенона регистрируется со всего объема плазменного образования. На результат расчета влияет интенсивность частиц ксенона, находящихся не только в пристеночной области РК, а также тех, которые находятся в полости двигателя и в области струи. Метод диагностики ОЭССК позволил определять скорость эрозии с использованием спектра излучения частиц ксенона, находящихся непосредственно в пределах изнашиваемой поверхности РК.

2. Схема эксперимента

Двигатели испытывались согласно следующему алгоритму, (рис. 1). На первом этапе проводились измерения положения кромок изоляторов РК согласно методике, предло-

женной в [2]. Далее СПД работали на базе в 50 часов. Временная база испытаний была выбрана исходя из следующих соображений. Радиальная скорость эрозии кромок изоляторов СПД мощностью 1,5 кВт составляет порядка 0,001 мм/ч. Погрешность измерения инструментального микроскопа БМИ-1Ц на длине в 10 мм составляет 0,001 мм. При испытаниях в 50 часов радиальная эрозия равна 0,05 мм, следовательно, ее измерения на микроскопе БМИ-1Ц производятся с относительной погрешностью в 2%.

После наработки в 50 ч испытания приостанавливались и измерялась радиальная эрозия обеих стенок РК. По результатам проводилось сравнение износа внутренней и наружной кромок РК. В случае, когда один из торцов стенок РК эродировал быстрее чем другой, для снижения неравномерности износа подбирался режим работы двигателя, при котором износ керамических изоляторов минимально неравномерен при помощи метода диагностики ОЭССК [3, 5].

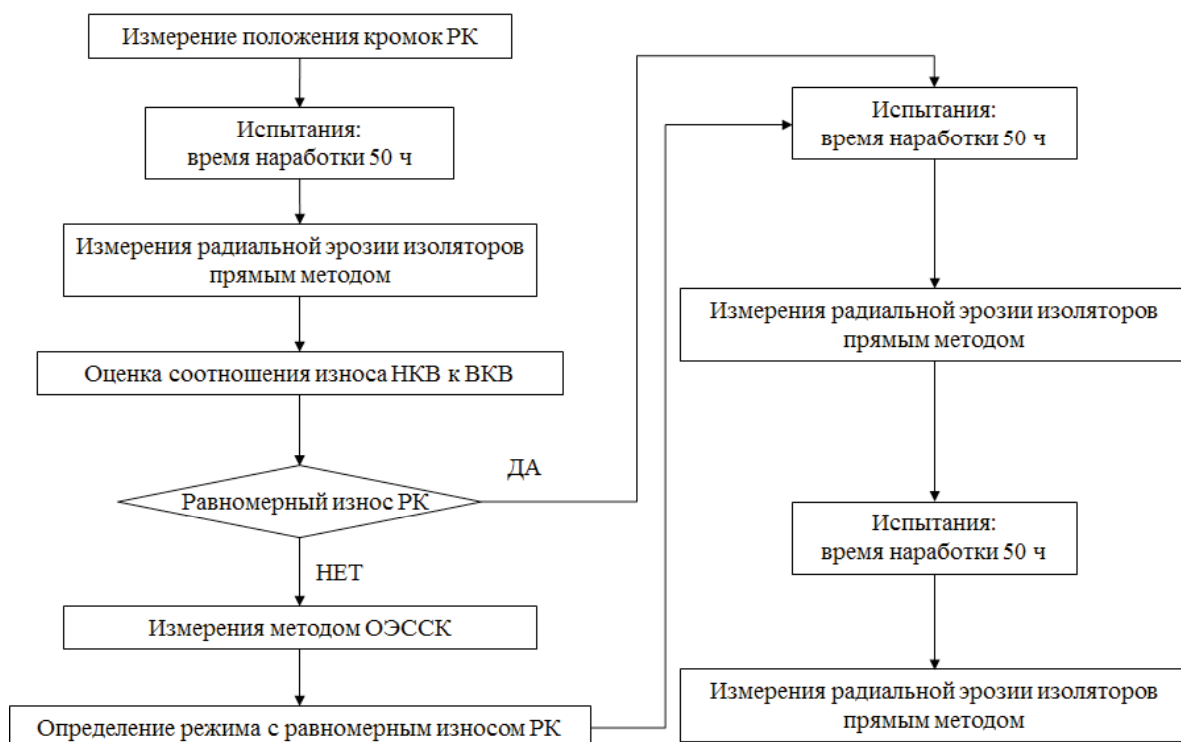


Рис. 1. Алгоритм испытаний двигателей СПД 1,5 кВт

После определения режима эксплуатации двигателя повторно испытывались на временной базе в 100 часов, с двумя прерываниями для измерений радиальной эрозии, для подтверждения результатов измерений метода ОЭССК.

Изначально, для снижения неравномерности износа стенок анодного блока СПД

скорость эрозии изоляторов РК определялась на 9 режимах работы СПД. Однако, для испытываемого СПД 1,5 кВт, результаты измерения скорости эрозии РК которого приведены в [3], дополнительно были проведены исследования на 25 режимах работы при помощи метода ОЭССК (рис. 2).

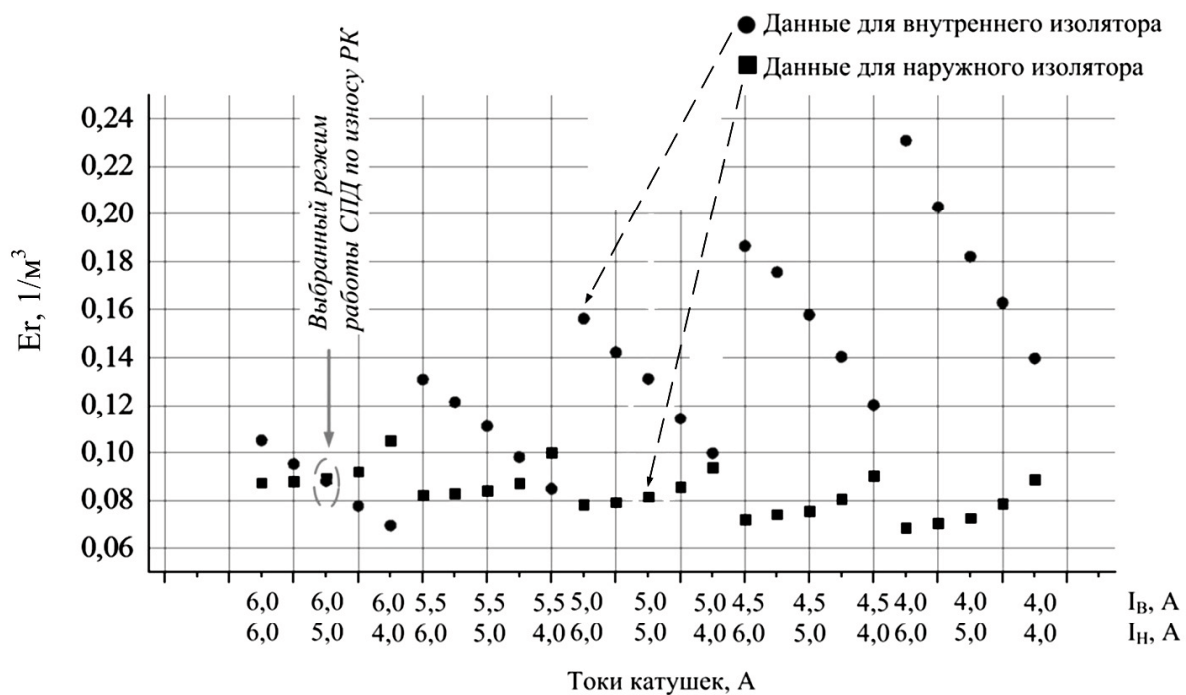


Рис. 2. Скорость эрозии наружной и внутренней керамических вставок в зависимости от токов катушек СПД 1,5 кВт при измерениях методом ОЭССК:
 E_r — скорость эрозии; I_B — ток внутренней катушки; I_H — ток наружной катушки.

Анализ проведенных расчетно-экспериментальных работ показал, что зависимости скорости эрозии наружного и внутреннего изоляторов имеют две точки пересечения, при токах 6,0 А и 5,0 А и при токах катушек 5,5 А и 5,25 А, для внутренней и наружной катушек, соответственно. Однако при втором режиме скорость эрозии на 4% больше.

Для эксплуатации был выбран следующий режим работы испытываемого СПД: напряженье разряда 300 В; анодный массовый расход 0,4 мг/с, токи катушек 6,0 А и 5,0 А внутренней и наружной, соответственно.

Заключение

В работе показано, что для усовершенствования диагностической базы исследований эрозионных характеристик РК СПД в лаборатории ЭРД ХАИ был разработан метод ОЭССК. Приведен алгоритм испытаний СПД с целью определения эксплуатационного режима с минимальной неравномерностью износа материала РК.

Обобщены результаты сравнительного анализа различных методов диагностики износа изоляторов РК СПД.

Показано, что при помощи метода ОЭССК существует возможность определять износ каждой из кромок изоляторов РК СПД при различных режимах работы СПД непосредственно при проведении его работы, за счет чего удалось значительно снизить длительность

испытаний двигателя, что влияет на стоимость производства СПД.

Литература

1. Горшков О. А. Холловские ионные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. — М. : Машиностроение, 2008. — 279 с.
2. Приданников С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе [Текст] / дис. канд. техн. наук : 05.07.05 / Приданников Сергей Юрьевич. — Калининград, 2003. — 203 с.
3. Khaustova A. N., Loyan A. V. Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators // Eastern-european journal of enterprise technologies, 2017. — № 3/5(87). — P. 11 — 17.
4. Максименко Т. А. Исследование влияния материала разрядной камеры МСПД на его характеристики [Текст] / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, В. А. Федотенко. // X.: Авиационно-космическая техника и технология, 2007. — №9 (45). — С. 144 — 146.
5. Хаустова А.Н. Измерительный комплекс метода ОЭССК и методика диагностики износа кромок изолятора стационарного плазменного двигателя / Хаустова А.Н., Рыбалов О.П. // Вестник двигателестроения. — 2016. — №2. — С. 212 — 220.

Поступила в редакцию 10.07.2017 г.

О.М. Хаустова. Удосконалений метод ОЕССК і методи діагностики швидкості ерозії РК СПД

В роботі наведено алгоритм і результати випробувань СПД з метою визначення режиму з мінімальною нерівномірністю зносу матеріалу РК. Показано результати порівняльного аналізу прямих і непрямих методів діагностики зносу ізоляторів РК СПД. Проведено оцінку основних достоїнств і недоліків непрямих методів діагностики. Наведено переваги використання методу ОЕССК з метою визначення зносу кромки ізоляторів РК СПД при різних режимах роботи двигуна. Показано, що за рахунок застосування методу діагностики ОЕССК вдалося значно знизити тривалість випробувань СПД.

Ключові слова: *стаціонарний плазмовий двигун, ресурс, швидкість ерозії, оптична емісійна спектроскопія зі скануванням плазми двигуна через коліматор.*

A.N. Khaustova. Improved method of OESSC and SPT DC erosion rate diagnostics methods

The algorithm and results of SPT tests are presented in the paper. Aim of tests was to determine the operational regime with the minimum uneven wear of the DC material. The results of a comparative analysis of direct and indirect methods for SPT DC insulators wear diagnosing are shown. The main advantages and disadvantages of indirect diagnostic methods were assessed. The advantages of using the OESSC method for the SPT DC insulators edges wear determination under various operating conditions are given. It is shown that due to the application of the OESSC diagnostic method, it was possible significantly to reduce the duration of the SPD tests.

Key words: *stationary plasma thruster, lifetime, erosion rate, the optical emission spectroscopy with the scanning of plasma through collimator.*