



(51) МПК

G01M 15/00 (2006.01)

F03H 1/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(52) СПК

G01M 1/00 (2020.08); F03H 1/00 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020131907, 28.09.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.09.2020Дата регистрации:  
20.02.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.09.2020

(45) Опубликовано: 20.02.2021 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦИС, для НОЦ  
"Ионно-плазменные технологии" (Ивахненко  
С.Г.)

(72) Автор(ы):

Воробьев Евгений Валентинович (RU),  
Ивахненко Сергей Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана (национальный исследовательский  
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: Латышев Л.А., Соколовер А.П.,  
Хартов С.А., Чуян Р.К. Поэтапная методика  
испытаний ускорителей с замкнутым дрейфом  
электронов. В сб. Ракетно-космическая  
техника. Ракетные двигатели и энергетические  
установки. НИИТП, 1991, с. 71-78. RU 2251090  
C1, 27.04.2005. RU 2327132 C1, 20.06.2008. CA  
0002141605 A1, 05.01.1995.

(54) Способ ускоренного определения ресурса элементов двигателя с замкнутым дрейфом электронов

(57) Реферат:

Использование: в космической технике при наземной отработке новых моделей двигателей с замкнутым дрейфом электронов (ДЗДЭ) и при переводе их на альтернативные рабочие вещества. Способ ускоренного определения ресурса элементов ДЗДЭ, заключающийся в последовательном выполнении циклов работы двигателя, включающих нанесение на поверхность исследуемого элемента многослойного покрытия, состоящего из чередующихся пар оптически контрастных слоев, кратковременные испытание двигателя до полного распыления нанесенного покрытия, определение профиля эрозии многослойного покрытия по картине распыления, расчетное прогнозирование профиля эрозии за заданное время, механическая обработка исследуемого элемента с целью придания ему рассчитанной

формы. Отличие способа заключается в использовании многослойных покрытий для определения скорости эрозии исследуемой поверхности, что многократно снижает время эксперимента. Для определения коэффициентов пропорциональности между скоростью распыления материала элемента ДЗДЭ и многослойных покрытий на первом цикле производится короткое ресурсное испытание двигателя с последующим прямым измерением профиля эрозии. В остальных циклах скорость эрозии материала элементов ДЗДЭ определяется по картине распыления многослойных покрытий с использованием полученных коэффициентов пропорциональности. Технический результат: снижение времени экспериментального определения ресурса новых перспективных моделей ДЗДЭ при стендовой отработке.

R U 2 7 4 3 6 0 6 C 1

R U 2 7 4 3 6 0 6 C 1

R U 2 7 4 3 6 0 6 C 1

RUSSIAN FEDERATION



(19) RU (11)

2 743 606<sup>(13)</sup> C1

(51) Int. Cl.  
*G01M 15/00* (2006.01)  
*F03H 1/00* (2006.01)

FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC  
*G01M 1/00* (2020.08); *F03H 1/00* (2020.08)

(21)(22) Application: 2020131907, 28.09.2020

(24) Effective date for property rights:  
28.09.2020

Registration date:  
20.02.2021

Priority:

(22) Date of filing: 28.09.2020

(45) Date of publication: 20.02.2021 Bull. № 5

Mail address:  
105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
MGTU im. N.E. Baumana, TSIS, dlya NOTS  
"Ionno-plazmennye tekhnologii" (Ivakhnenko S.G.)

(72) Inventor(s):

Vorobev Evgenij Valentinovich (RU),  
Ivakhnenko Sergej Gennadevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe  
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego  
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj  
tekhnicheskij universitet imeni N.E. Baumana  
(natsionalnyj issledovatelskij universitet)"  
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)

(54) METHOD FOR ACCELERATED DETERMINATION OF LIFE OF ELEMENTS OF AN ENGINE WITH CLOSED ELECTRON DRIFT

(57) Abstract:

FIELD: aeronautics.

SUBSTANCE: invention can be used in space engineering during ground development of new models of closed electron drift engines (CEDE) and when transferring them to alternative working substances. Method for accelerated determination of life of CEDE elements, consisting in sequential execution of engine cycles, involving application on surface of analyzed element of multilayer coating consisting of alternating pairs of optically contrasting layers, short-term test of engine until complete spraying of applied coating, determining the erosion profile of the multilayer coating from the spray pattern, calculating prediction of the erosion profile for a given time, machining the analyzed element to give it a calculated shape. Method differs

from that in using multilayer coatings to determine the erosion rate of the analyzed surface, which reduces experiment time many times. To determine coefficients of proportionality between speed of spraying material of element CEDE and multilayer coatings at the first cycle, short resource test of engine is performed with subsequent direct measurement of erosion profile. In the remaining cycles, the rate of erosion of the material of the CEDE elements is determined from the pattern of spraying the multilayer coatings using the derived proportionality coefficients.

EFFECT: technical result: shorter time for experimental determination of life of new advanced CEDE models during bench development.

1 cl

R U 2 7 4 3 6 0 6 C 1

Изобретение относится к области космической техники и может быть использовано при проведении стендовых наземных испытаний двигателей с замкнутым дрейфом электронов.

Ресурс является одной из важнейших эксплуатационных характеристик электрических

<sup>5</sup> ракетных двигателей. Ресурс определяется, в основном, критическим уровнем эрозии элементов двигателя, таких как стенки ускорительного канала, под действием ионной бомбардировки. При разработке и подготовке к эксплуатации новых моделей ДЗДЭ ресурсные испытания являются одной из важнейших стадий стендовой отработки.

Важно отметить, что в последние годы с появлением крупных орбитальных группировок

<sup>10</sup> космических аппаратов, таких как Starlink, «Сфера» и др. количество производимых электрических ракетных двигателей значительно растет. Это приводит к необходимости смены рабочего вещества электроракетных двигателей с традиционного ксенона на более дешевые альтернативные вещества, такие как криптон. Такой переход требует проведения большого объема стендовых испытаний по оптимизации параметров

<sup>15</sup> двигателей и определению их влияния на ресурс. В то же время ресурс современных ДЗДЭ достигает 5000-10000 часов, поэтому ресурсные испытания являются наиболее длительным и дорогим этапом их стендовой отработки. Для сокращения времени ресурсных испытаний существует несколько методик.

Для ускорения ресурсных испытаний возможно форсировать режим работы двигателя

<sup>20</sup> [1]. При этом двигатель испытывают на таких режимах, при которых скорость распыления поверхностей элементов значительно увеличивается. Однако в случае ДЗДЭ форсирование режима работы требует оптимизации конфигурации магнитного поля в канале, что, в свою очередь, может изменить границы области эрозии. Ускорить ресурсные испытания ДЗДЭ возможно путем изготовления распыляемых элементов

<sup>25</sup> из материала с более высоким коэффициентом распыления [2]. При этом возрастет скорость распыления стенок без существенного изменения параметров работы.

Наиболее эффективным способом сокращения времени ресурсных испытаний является метод циклических испытаний [3, 4], взятый за прототип. Метод заключается в том, что скорости эрозии элементов ДЗДЭ измеряются после относительно короткой

<sup>30</sup> наработки. По полученным скоростям рассчитывается форма поверхности после некоторого времени работы,  $\tau_{цк}$ , составляющего часть полного ресурса двигателя.

Затем при помощи механической обработки поверхности исследуемого элемента придается рассчитанная форма и цикл повторяется.

Общим недостатком этих методов является тот факт, что для их применения

<sup>35</sup> необходимо обеспечить глубину эрозии достаточную для точных измерений профиля распыленной поверхности. Как правило, глубина эрозии должна составлять несколько сотен микрометров, при этом длительность стендовой наработки на каждом цикле может составлять десятки и сотни часов. В результате применения метода циклических испытаний время ресурсного испытания сокращается примерно в 5 раз, но при общем

<sup>40</sup> ресурсе двигателя в несколько тысяч часов, все равно остается достаточно большим, а сам эксперимент - сложным и дорогостоящим. Поэтому использование такого способа не всегда экономически выгодно, особенно при отработке перспективных конструкций и при оценке влияния рабочего вещества и режима работы двигателя на его ресурс.

При разработке настоящего изобретения решалась задача сокращения времени

<sup>45</sup> стендовой работы двигателя в каждом отдельном цикле путем использования новой методики измерения скорости эрозии поверхности, разрешающая способность которой превосходит существующие способы. Технический результат: снижение времени экспериментального определения ресурса новых перспективных моделей ДЗДЭ при

стендовой отработке.

Метод измерения скорости эрозии элементов ДЗДЭ, лежащий в основе изобретения, основан на нанесении на всю исследуемую поверхность многослойного покрытия, состоящего из чередующихся пар оптически контрастных металлических слоев [5].

- 5 Отдельные слои имеют толщину от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров. При распылении такого покрытия неоднородным потоком ионов из плазмы ускорительного канала на поверхности проявится контрастная картина, состоящая из чередующихся разноцветных полос, соответствующих соседним слоям из разных материалов. При этом границы между полосами являются линиями равной 10 глубины эрозии. По изображению картины распыления многослойного покрытия строится профиль скорости эрозии поверхности покрытия за время короткого эксперимента. Полученные значения скоростей эрозии используются для прогнозирования формы исследуемого элемента за время  $\tau$ , составляющее часть полного ресурса двигателя.

- 15 Способ ускоренного определения ресурса элементов двигателей с замкнутым дрейфом электронов, заключающийся в последовательном выполнении циклов состоит из кратковременной работы двигателя в течение времени  $t_{эл}$ , измерения профиля эрозии распыляющегося элемента конструкции двигателя, прогнозирования формы распыляющегося элемента за время  $t_{цк}$ , придания элементу конструкции 20 спрогнозированной формы, повторения циклов до достижения распыляющимся элементом предельной геометрии и определения ресурса двигателя как суммы времени по всем циклам  $t_{эл}+n \cdot t_{цк}$ . При этом проводят однократные кратковременные испытания двигателя и определяют скорость износа материала конструкции. На исследуемую 25 поверхность распыляемого элемента конструкции наносят многослойное покрытие, состоящее из чередующихся оптически контрастных металлических слоев. Проводят кратковременные испытания двигателя с нанесенным покрытием; выполняют фотoreгистрацию картины распыления. По изображению картины распыления определяют скорость эрозии распыляемого элемента с покрытием и соотношение 30 скорости распыления элемента с покрытием и без него. Прогнозируют профиль исследуемого элемента за время работы двигателя  $t_{цк}$  с использованием соотношения скорости распыления с покрытием и без него и придают элементу двигателя спрогнозированный профиль. Наносят на спрогнозированный профиль многослойное покрытие, состоящее из чередующихся оптически контрастных металлических слоев, 35 и повторяют кратковременные испытания двигателя с нанесенным покрытием.

- Для вычисления скоростей эрозии поверхности элементов ДЗДЭ из полученных по 40 картинам распыления скоростей эрозии многослойного покрытия необходимы данные о функции распределения ионов по энергиям, а также зависимости коэффициентов распыления материалов отдельных слоев покрытия и исследуемых элементов ДЗДЭ от энергий ионов. Функция распределения ионов по энергиям зависит от конкретного режима работы двигателя и оценивается с достаточно низкой точностью. Поэтому для определения зависимости между скоростью распыления материала элемента и многослойного покрытия на первом цикле испытаний после распыления покрытия и фиксации картины контрастных полос производится кратковременное ресурсное 45 испытание двигателя в течение времени, достаточного для прямого измерения профиля поверхности. Затем на границах полос производится вычисление коэффициентов пропорциональности, равных отношению скорости распыления материала исследуемого элемента к скорости распыления многослойного покрытия:

$$k(z, \varphi) = \frac{\dot{h}_{\text{эл}}}{\dot{h}_{\text{покр}}} = \frac{h_{\text{эл}}(z, \varphi)/t_{\text{эл}}}{(n_1(z, \varphi) \cdot \delta_1 + n_2(z, \varphi) \cdot \delta_2)/t_{\text{покр}}} \quad (1)$$

где z, φ - осевая и угловая координаты границы полосы;  $\dot{h}_{\text{эл}}$ ,  $\dot{h}_{\text{покр}}$  - скорости распыления материала исследуемого элемента и покрытия;  $h_{\text{эл}}(z, \varphi)$  - глубина эрозии исследуемого элемента за время  $t_{\text{эл}}$ ;  $n_1(z, \varphi)$ ,  $n_2(z, \varphi)$  - количество слоев 1-го и 2-го материала многослойного покрытия, полностью распыленных в данной точке;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  - толщины слоев первого и второго материалов;  $t_{\text{покр}}$  - время распыления многослойного покрытия.

В последующих циклах испытаний эквивалентная скорость распыления поверхности исследуемого элемента вычисляется по формуле:

$$\dot{h}_{\text{эл}}(z, \varphi) = k(z, \varphi) \cdot \dot{h}_{\text{покр}}(z, \varphi) \quad (2)$$

Определение ресурса элементов двигателя с замкнутым дрейфом электронов предлагаемым способом осуществляется в следующей последовательности:

1. Нанесение на исследуемые поверхности элементов ДЗДЭ многослойных покрытий, состоящих из чередующихся оптически контрастных металлических слоев.

2. Кратковременное испытание ДЗДЭ до сквозного распыления многослойного покрытия в одной точке.

3. Фоторегистрация картины распыления многослойного покрытия и построение профиля скорости его эрозии.

4. Испытание ДЗДЭ в течение времени  $t_{\text{эл}}$ , достаточного для прямого измерения профиля эрозии исследуемого элемента. Измерение профиля эрозии исследуемого элемента и определение коэффициентов пропорциональности (1).

5. Расчет формы поверхности исследуемого элемента после некоторого времени работы  $\tau_{\text{ЦК}}$ , составляющей часть полного ресурса ДАС.

6. Механическая обработка исследуемого элемента с целью придания их рабочей поверхности рассчитанной формы.

7. Нанесение на рабочие поверхности элементов ДЗДЭ многослойных покрытий, состоящих из чередующихся оптически контрастных металлических слоев.

8. Кратковременное испытание ДАС до сквозного распыления многослойного покрытия в одной единственной точке.

9. Фоторегистрация картины распыления многослойного покрытия и построение профиля скорости его эрозии. С использованием полученных на этапе 4 коэффициентов пропорциональности вычисление скоростей эрозии исследуемого элемента.

10. Повторение шагов 5-9 до достижения предельной геометрии исследуемого элемента ДЗДЭ.

11. Суммарный ресурс определяется как сумма  $t_{\text{эл}} + n \cdot \tau_{\text{ЦК}}$ , где n - количество циклов.

#### Источники информации

1. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Изд-во МАИ, 2012. 292 с.

2. Semenkin A.V. at all. RHETT-EPDM Flight Anode Layer Thruster Development. 25<sup>th</sup>

International Electric Propulsion Conference. Cleveland. 1997. P. 1-6.

3. Латышев Л.А., Соколоверов А.П., Хартов С.А., Чуян Р.К. Поэтапная методика испытаний ускорителей с замкнутым дрейфом электронов. В сб.: Ракетно-космическая техника. Ракетные двигатели и энергетические установки. НИИТП, 1991, с. 71-78

(прототип).

4. Kim V. at all. Development of the accelerated test procedure for the spt discharge chamber wall wearing during long thruster operation. 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville. 2003. P. 1-11. (прототип).

<sup>5</sup> 5. Vorobyev E.V. at all. Technique for the Visualization and Determination of the Surface Erosion Profile Caused by Ion Bombardment. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10, No.1. P. 10-14. (прототип).

### (57) Формула изобретения

- <sup>10</sup> Способ ускоренного определения ресурса элементов двигателей с замкнутым дрейфом электронов, заключающийся в последовательном выполнении циклов, состоящих из кратковременной работы двигателя в течение времени  $t_{ЭЛ}$ , измерения профиля эрозии распыляющегося элемента конструкции двигателя, прогнозирования формы распыляющегося элемента за время  $\tau_{ЦК}$ , придания элементу конструкции <sup>15</sup> спрогнозированной формы, повторения циклов до достижения распыляющимся элементом предельной геометрии и определения ресурса двигателя как суммы времени по всем циклам  $t_{ЭЛ} + n \cdot \tau_{ЦК}$ , отличающейся тем, что проводят однократные кратковременные испытания двигателя и определяют скорость износа материала <sup>20</sup> конструкции; на исследуемую поверхность распыляемого элемента конструкции наносят многослойное покрытие, состоящее из чередующихся оптически контрастных металлических слоев; проводят кратковременные испытания двигателя с нанесенным покрытием; выполняют фотoreгистрацию картины распыления; по изображению картины распыления определяют скорость эрозии распыляемого элемента с покрытием <sup>25</sup> и соотношение скорости распыления элемента с покрытием и без него; прогнозируют профиль исследуемого элемента за время работы двигателя  $\tau_{ЦК}$  с использованием соотношения скорости распыления с покрытием и без него и придают элементу двигателя спрогнозированный профиль; наносят на спрогнозированный профиль многослойное покрытие, состоящее из чередующихся оптически контрастных <sup>30</sup> металлических слоев, и повторяют кратковременные испытания двигателя с нанесенным покрытием.

35

40

45