

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ РД0310

© 2021

- А. А. Казбанов** инженер-конструктор;
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж;
аспирант кафедры ракетных двигателей;
Воронежский государственный технический университет;
abel-cadb@yandex.ru
- П. А. Дронов** заместитель главного конструктора по электроракетным двигателям
и перспективным энергоустановкам;
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж;
кандидат технических наук, доцент кафедры ракетных двигателей;
Воронежский государственный технический университет;
abel-cadb@yandex.ru
- О. О. Спивак** главный специалист;
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж;
abel-cadb@yandex.ru
- А. Б. Деркачев** инженер-конструктор;
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж;
аспирант кафедры ракетных двигателей;
Воронежский государственный технический университет;
abel-cadb@yandex.ru

Испытания опытных образцов техники являются важнейшим этапом их разработки. В статье рассмотрен высокочастотный ионный двигатель малой мощности РД0310, который был изготовлен и испытан на производственной базе АО «Конструкторское бюро химавтоматики». Испытания проводились в вакуумной камере объёмом 5,66 м³, вакуум-откачная система которой позволяет обеспечить давление внутри камеры не более $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при расходе ксенона до 0,7 мг/с, что является максимально приближенным к космическим условиям. В ходе испытаний была отработана циклограмма запуска и останова двигателя, а также получены зависимости тяги от расхода рабочего тела, мощности высокочастотного генератора и напряжения на эмиссионном электроде. По результатам испытаний была достигнута стабильная работа двигателя и получены следующие значения: тяга 9,1 мН при удельном импульсе 3740 с.

Высокочастотный ионный двигатель; вакуумная камера; вакуумно-откачная система; испытания ионного двигателя

Цитирование: Казбанов А.А., Дронов П.А., Спивак О.О., Деркачев А.Б. Экспериментальные исследования составных частей высокочастотного ионного двигателя РД0310 // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 49-56. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-49-56

Введение

Наземная отработка является одним из ключевых этапов разработки электроракетных двигателей. Экспериментальное подтверждение основных параметров и характеристик, отработка циклограммы запуска и останова, устойчивая работа на стационарном режиме и многое другое обеспечивается в процессе наземной отработки. Проведение данных мероприятий позволяет минимизировать риски, связанные с нештатной работой и отказами изделия в процессе эксплуатации.

В АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО КБХА) совместно с Научно-исследовательским институтом прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института и при участии Государственного научного центра «Центр

Келдыша» по договору с Министерством Образования Российской Федерации от 23.05.2013 г. № 02.G25.31.0072 был реализован проект по созданию производственно-испытательной базы для стендовой отработки и промышленного производства электро-ракетных двигателей (ЭРД). В результате был создан и прошёл цикл наземной отработки высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД) РД0310 (рис. 1) мощностью 300 Вт. Данный двигатель разрабатывался как однорежимный, позволяющий развивать тягу в 8 мН при удельном импульсе тяги 3500 с [1]. В статье представлены результаты экспериментальных исследований ВЧИД РД0310 в АО КБХА, приведено описание стенда АО КБХА для испытаний двигателя.

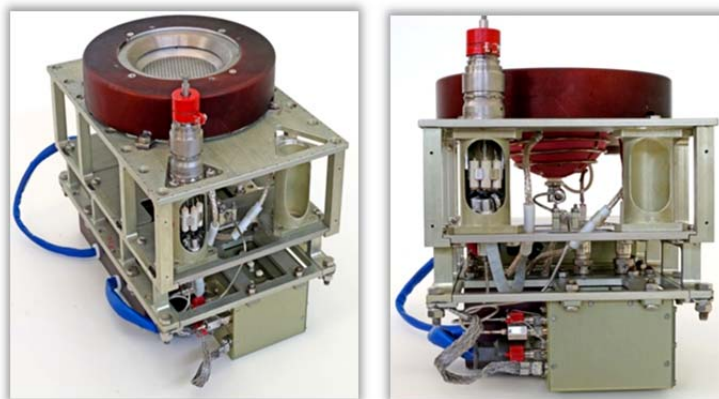


Рис. 1. Внешний вид высокочастотного ионного двигателя РД0310

Вакуумный стенд АО КБХА

Вакуумный стенд АО КБХА (далее – стенд) предназначен для проведения экспериментальных работ с ЭРД с максимальной имитацией натуральных эксплуатационных условий (с глубиной вакуума до $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. без напуска газа) и обеспечением требований по экологии и безопасности. Внешний вид стенда представлен на рис. 2. В состав стенда входят вакуумная камера (ВК), система подачи ксенона и вакуумно-откачная система (ВОС).



Рис. 2. Внешний вид вакуумного стенда АО КБХА

Характеристики вакуумной камеры:

- внутренний диаметр 1,6 м;
- длина 3,34 м;
- объём 5,66 м³.

Для удобства эксплуатации ВК включает в себя:

- откидную крышку для монтажа изделия в камере;
- съёмную крышку с фланцевым соединением, позволяющую при необходимости подстыковывать дополнительный рабочий объём;
- корпус камеры и всё внутрикамерное оборудование выполнено из стали 12Х18Н10Т, внутренние поверхности камеры и поверхности внутрикамерного оборудования отполированы;
- иллюминаторы для визуального контроля испытаний;
- выдвигной стапель и подвесная рама для транспортировки и крепления двигателя;
- два люка с разъёмами для подвода и отвода рабочих сред, питания электроагрегатов, кабелей системы управления и регистрации параметров;
- на корпусе ВК и трубопроводах предусмотрены патрубки для запорной арматуры, вакуумных датчиков и вакуумный клапан для напуска атмосферы.

Система подачи ксенона включает в себя:

- баллон для хранения ксенона объёмом 5 л, давление заправленного ксеноном баллона 150 ± 10 кгс/см² ;
 - два регулятора расхода газа, обеспечивающие расход 0...1 мг/с ;
 - редуктор газовый (входное давление 150 ± 20 кгс/см² , выходное давление 1...3 кгс/см²);
 - в магистрали подачи ксенона установлен фильтр с тонкостью фильтрации 5 мкм.
- На рис. 3 представлена 3D-модель вакуумного стенда.

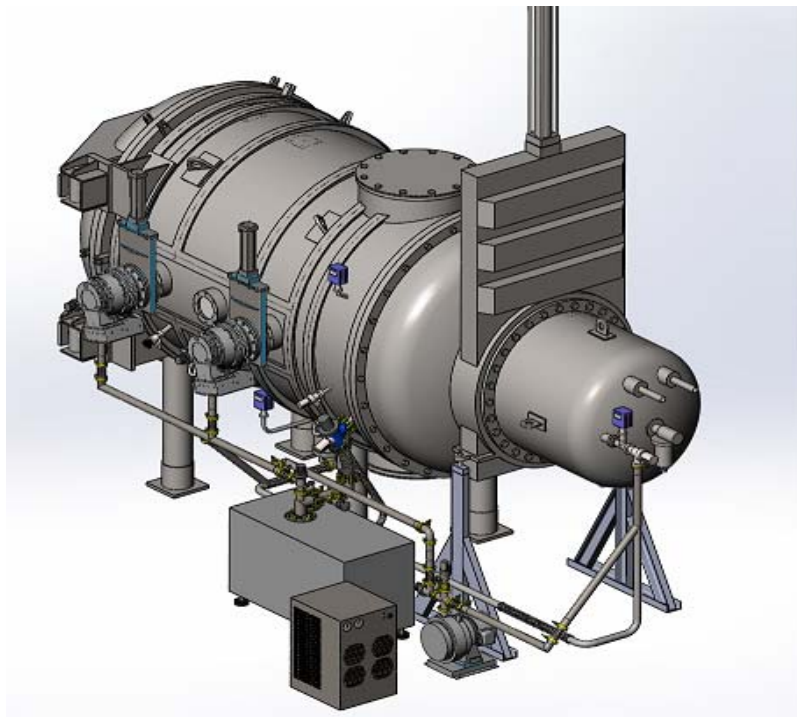


Рис. 3. 3D-модель вакуумного стенда

ВОС имеет скорость откачки по ксенону не менее 32 000 л/с и обеспечивает рабочее давление в ВК $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при расходе ксенона до 0,7 мг/с. Давление в ВК контролируется широкодиапазонными модулями:

- датчик давления (1 шт.) – диапазон измерений $5 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^3$ мм рт. ст.;
- датчик давления (1 шт.) – диапазон измерений $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^3$ мм рт. ст.;
- конвекционный вакуумметр (3 шт.) – диапазон измерений $1 \cdot 10^{-4} \dots 760$ мм рт. ст.;
- вакуумметр (2 шт.) с одним высоковакуумным и двумя низковакуумными измерительными каналами – диапазон измерений $1 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^3$ мм рт. ст., $1 \cdot 10^{-9} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.;
- конвекционный датчик (2 шт.) – диапазон измерений $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^3$ мм рт. ст.;
- натекание в ВК при закрытых затворах и давлении $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. не более 2,5 л·мкм рт. ст./с;
- насос сухой форвакуумный (скорость откачки 1365 м³/ч);
- насос сухой форвакуумный (скорость откачки 30 м³/ч);
- два турбомолекулярных насоса со скоростью откачки 1100 л/с (по азоту), 1130 л/с (по гелию);
- турбомолекулярный насос производительностью 320 л/с (по азоту);
- криогенный насос (скорость откачки по ксенону не менее 12000 л/с) с компрессором и вакуумным затвором;
- криогенная панель – скорость откачки не менее 20 000 л/с по ксенону;
- электропневматические затворы и клапаны.

Вся запорная арматура изготовлена в вакуумном исполнении и имеет дистанционное управление. Приведённые параметры вакуумного стенда АО КБХА позволяют проводить испытания ЭРД максимальной мощностью до 1,5 кВт.

Испытания высокочастотного ионного двигателя РД0310

Испытания проводились с целью проверки работоспособности двигателя, отработки запуска, определения температуры составных частей и определения влияния входных параметров на тягу (рис. 4). В ходе испытаний проведена отработка различных режимов при изменениях расхода рабочего тела (РТ), мощности высокочастотного генератора (ВЧГ) и потенциала эмиссионного электрода (ЭЭ). Потенциал ускоряющего электрода (УЭ) на всех режимах работы поддерживался на уровне минус 200 В.

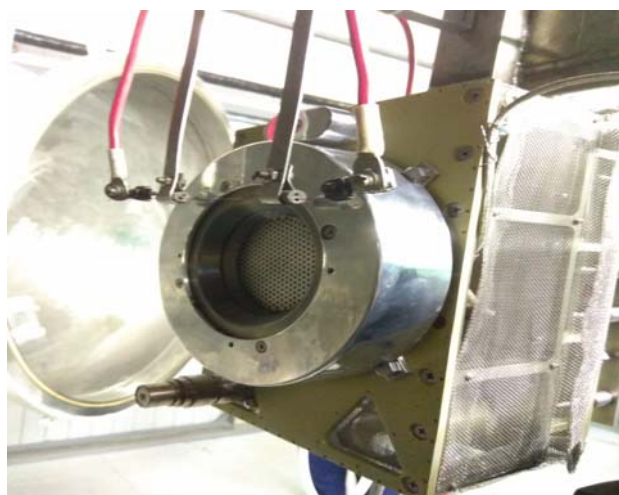


Рис. 4. Высокочастотный ионный двигатель РД0310 в вакуумной камере АО КБХА

Для зажигания плазменного разряда после подачи РТ в газоразрядную камеру (ГРК) и подвода мощности от ВЧГ требуется начальная инжекция электронов. Источником электронов являлась вольфрамовая нить накала, т.к. двигатель работал без катода нейтрализатора. Чтобы электроны попали внутрь ГРК и инициировали поджиг плазмы, на ЭЭ и УЭ выставлялись положительные значения напряжения (переполусовка) +2000 и +200 В соответственно. После зажигания плазменного разряда на УЭ устанавливалось отрицательное значение напряжения -200 В, двигатель работал в штатном режиме.

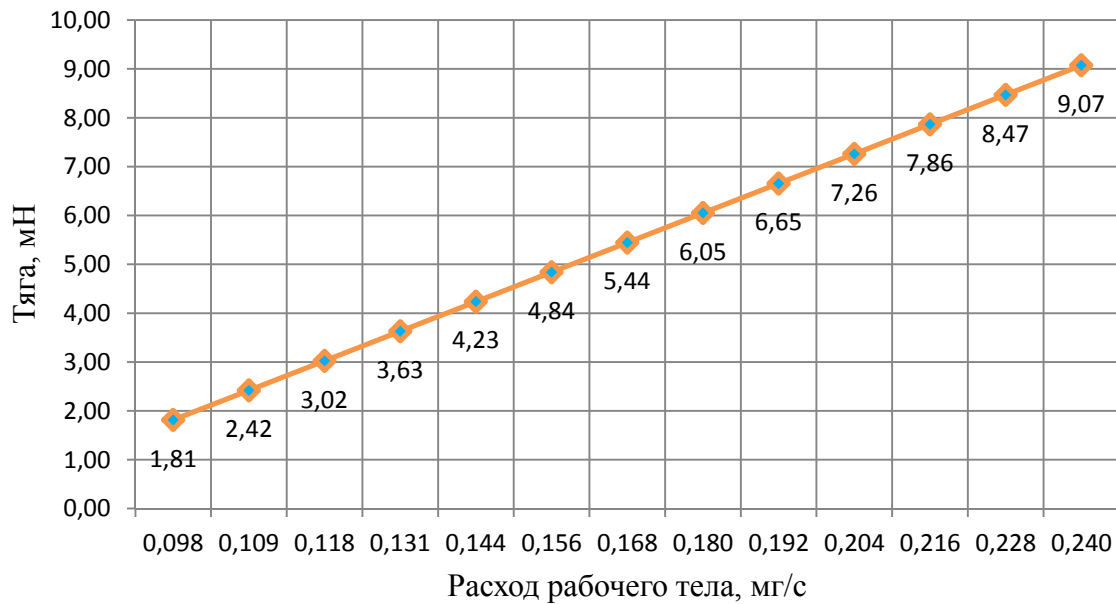


Рис. 5. Зависимость изменения тяги двигателя от расхода рабочего тела

Из графика на рис. 5 видно, что значение тяги изменялось линейно, изменение массового расхода на $\pm 1\%$ пропорционально изменяет тягу на $\pm 0,63\%$ в диапазоне тяг от 70 до 110% от номинала. Максимальное значение тяги составило 9,1 мН при удельном импульсе 3740 с. Необходимо отметить, что способ изменения тяги путём изменения массового расхода РТ является наиболее предпочтительным ввиду простоты его реализации.

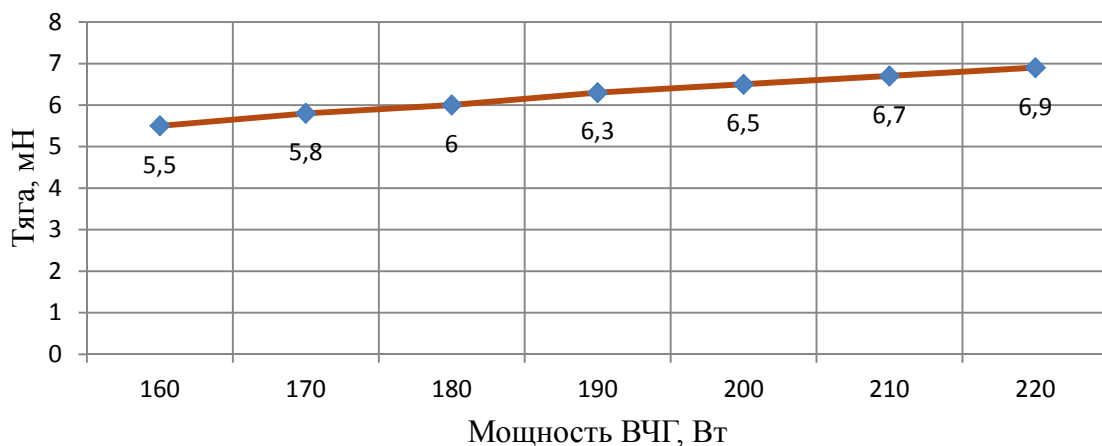


Рис. 6. Зависимость тяги двигателя от мощности высокочастотного генератора при значении напряжения эмиссионного электрода 1200 В

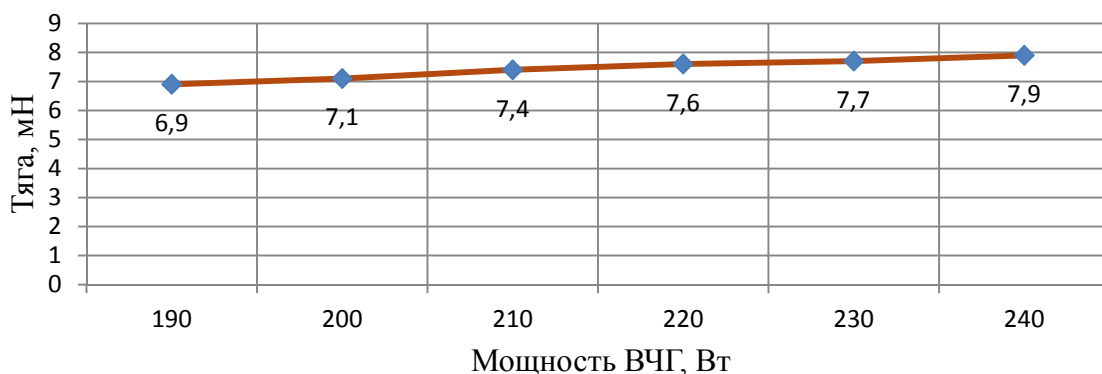


Рис. 7. Зависимость тяги двигателя от мощности высокочастотного генератора при значении напряжения эмиссионного электрода 1800 В

При значениях напряжения ЭЭ 1200 В изменение мощности ВЧГ на $\pm 1\%$ пропорционально изменяет тягу на $\pm 0,75\%$ во всём исследуемом диапазоне тяг (рис. 6), при значениях напряжения ЭЭ 1800 В изменение мощности ВЧГ на $\pm 1\%$ изменяет тягу на $\pm 0,23\%$ (рис. 7). Данный способ изменения тяги может быть использован для вывода двигателя на стационарный режим, при этом нерационален для работы на режимах увеличения тяги. Изменение мощности ВЧГ ограничено снизу необходимым уровнем мощности для поддержания плазменного разряда, а сверху – максимальной температурой элементов двигателя.

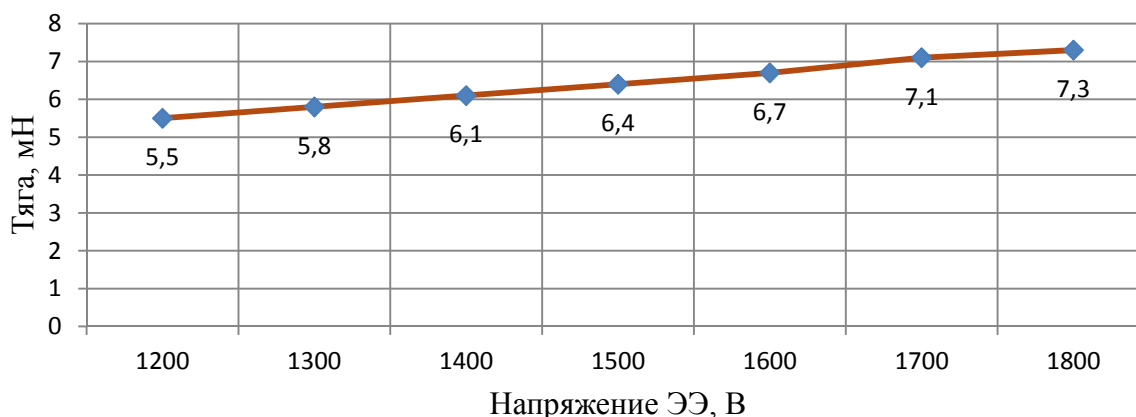


Рис. 8. Зависимость изменения тяги двигателя от напряжения на эмиссионном электроде

Как видно из графика на рис. 8, изменение напряжения ЭЭ на $\pm 1\%$ пропорционально изменяет тягу на $\pm 0,72\%$ во всём диапазоне тяг, но данный параметр ограничен требуемым значением удельного импульса тяги и, соответственно, фиксирован. Также повышение напряжения на ЭЭ ведет к снижению энергетического КПД двигателя, т.к. скорость ионов пропорциональна удельному импульсу, а их энергия – квадрату скорости.

Теловой режим двигателя оценивался по результатам измерения температуры размещённой на наружной поверхности ГРК поверхностной термпары. На рис. 9 приведены полученные в ходе проведения испытаний двигателя значения температуры ГРК (температура на графике указана в градусах Кельвина).

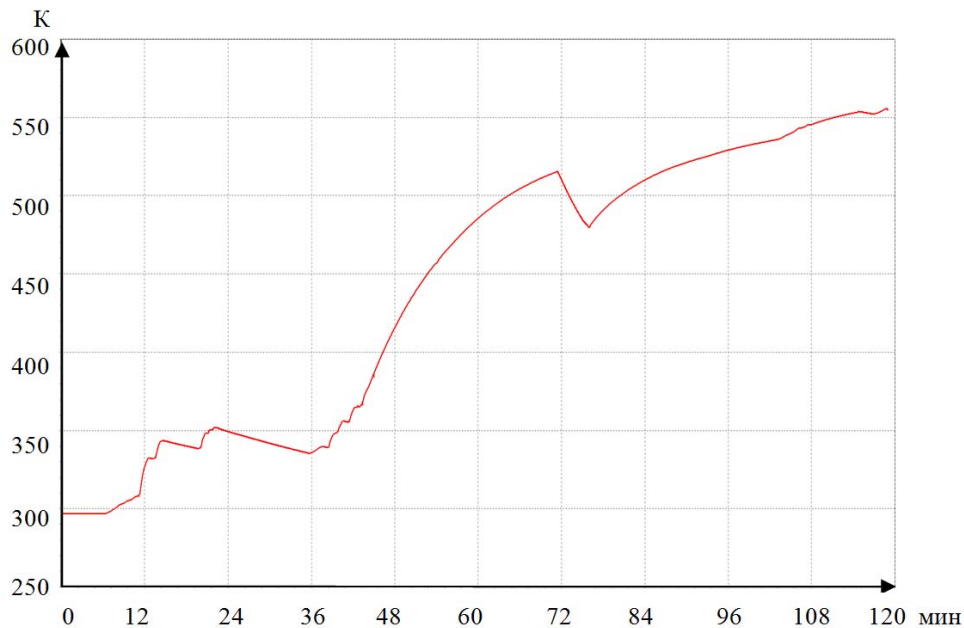


Рис. 9. Температура газоразрядной камеры во время испытаний

Из приведённых данных следует, что после прогрева двигателя температура ГРК достигает значений 525...570 К в режиме, близком к стационарному.

Также следует отметить, что ток перехвата УЭ в процессе испытаний находился в пределах 3% от тока на ЭЭ, что свидетельствует о хорошей фокусировке ионно-оптической системы (ИОС) и отсутствии влияния термических расширений на работу ИОС. Данные параметры работы обеспечены использованием способа изготовления и сборки ИОС [2].

Суммарная наработка двигателя составила 120 мин. Было выявлено, что при первом запуске для стабилизации параметров двигателя необходима работа на пониженных уровнях мощности в течение 60 мин для отжига электродов ИОС. Приведённые выше параметры (рис. 4 – 9) фиксировались после 60 мин работы двигателя.

Заключение

Описана стендовая база АО КБХА и её параметры, позволяющие провести полный цикл наземной отработки электроракетных двигателей мощностью до 1,5 кВт, обеспечивая условия, близкие к эксплуатационным.

Приведены данные экспериментальной отработки высокочастотного ионного двигателя малой мощности РД0310. Максимальная полученная тяга составила 9,1 мН при удельном импульсе 3740 с.

Библиографический список

1. Akhmetzhanov R., Bogatyı A., Derkachev A., Dyakonov G., Kim V., Lyubinskaya N., Merkuryev D., Obukhov V., Popov G., Semenikhin S. Development of electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC (October, 1-5, 2018, Bremen, German).
2. Баскаков А.В., Дронов П.А., Иванов А.В., Спивак О.О., Натальченко Т.Д., Симонов В.Ю., Степанищев С.В. Способ изготовления элементов и сборки ионно-оптической системы (варианты), ионно-оптическая система: патент РФ № 2608188 С1; опубл. 17.01.2017; бюл. № 2.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE COMPONENTS OF HIGH-FREQUENCY ION ENGINE RD0310

© 2021

- A. A. Kazbanov** Design Engineer;
Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation;
Postgraduate Student;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
abel-cadb@yandex.ru
- P. A. Dronov** Deputy Chief Designer;
Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation;
Candidate of Science (Engineering); Associate Professor;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
abel-cadb@yandex.ru
- O. O. Spivak** Chief Specialist;
Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation;
abel-cadb@yandex.ru
- A. B. Derkachev** Design Engineer;
Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation;
Postgraduate Student;
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation;
abel-cadb@yandex.ru

Testing of prototypes of equipment is the most important stage of their development. The article considers a low-power high-frequency ion engine RD0310 which was manufactured and tested at the production base of the KBHA joint-stock company. The tests were carried out in a vacuum chamber with a volume of 5.66 m³, the vacuum pumping system of which allows for a pressure inside the chamber of no more than $1 \cdot 10^{-5}$ mm Hg. with xenon consumption of up to 0.7 mg/s, which is as close as possible to space conditions. During the tests, the cyclogram of starting and stopping the engine was worked out, and the thrust dependences on the flow rate of the working fluid, the power of the high-frequency generator and the voltage at the emission electrode were obtained. According to the test results, stable engine operation was achieved and the following values were obtained: the thrust of 9.1 mN at a specific impulse of 3740 s.

High-frequency ion engine; vacuum chamber; vacuum pumping system; ion engine tests

Citation: Kazbanov A.A., Dronov P.A., Spivak O.O., Derkachev A.B. Experimental studies of the components of high-frequency ion engine RD0310. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 49-56. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-49-56

References

1. Akhmetzhanov R., Bogatyi A., Derkachev A., Dyakonov G., Kim V., Lyubinskaya N., Merkurjev D., Obukhov V., Popov G., Semenikhin S. Development of electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC (October, 1-5, 2018, Bremen, German)*.
2. Baskakov A.V., Dronov P.A., Ivanov A.V., Spivak O.O., Natalchenko T.D., Simonov V.Yu., Stepanishchev S.V. *Sposob izgotovleniya elementov i sborki ionno-opticheskoy sistemy (varianty), ionno-opticheskaya sistema* [Method of producing elements and assemblies of ion optical system (versions), ion-optical system]. Patent RF no. 2608188 C1, 2017. (Publ. 17.01.2017, bull. no. 2.)