

Математическое моделирование аммиачных электротермических микродвигателей по результатам натурных испытаний корректирующих двигательных установок

Mathematical Simulation of Ammonia Electrothermal Fine Adjustment Microthrusters According to Results of Field Tests of Fine Adjustment Thrusters

Блинов / Blinov V.

Виктор Николаевич
(blinovviktor@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор,
почетный машиностроитель,
заслуженный изобретатель РФ.
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет» (ОмГТУ),
профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».
г. Омск

Чарушина / Charushina E.

Елена Борисовна
(_krain@mail.ru)
ОмГТУ, старший преподаватель кафедры
«Нефтегазовое дело».
г. Омск

Шалай / Shalay V.

Виктор Владимирович
(info@omgtu.ru)
доктор технических наук, профессор,
изобретатель СССР,
почетный работник высшего
профессионального образования РФ,
заслуженный работник высшей школы РФ.
ОмГТУ, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело»,
президент.
г. Омск

Ключевые слова: корректирующая двигательная установка – correcting propulsion system; математическое моделирование – mathematical simulation; натурные испытания – full-scale tests; электротермический микродвигатель – electrothermal thruster; удельный импульс тяги – specific impulse; характеристическая скорость – characteristic velocity.

Представлены результаты натурных испытаний аммиачных корректирующих двигательных установок (КДУ) в составе малых космических аппаратов (МКА), рассмотрено математическое моделирование температурных режимов электротермических микродвигателей (ЭТМД) КДУ, полученное на основе обработки температурных параметров натурных микродвигателей с дальнейшим их прогнозированием на максимальном промежутке времени разового включения ЭТМД, удельного импульса тяги ЭТМД и запасов характеристической скорости КДУ в составе МКА.

Results of full-scale tests of the ammonia correcting propulsion systems (CPS) as a part of the small spacecraft's (SSC) are presented, the mathematical simulation of temperature conditions of electrothermal thruster (ETT) of the CPS received on the basis of processing of temperature parameters of natural thrusters with their further forecasting on the maximum period of single inclusion of ETT, a specific impulse of draft of ETT and stocks of characteristic velocity of CPS as a part of SSC is considered.

Современный этап развития МКА характеризуется созданием маневрирующих МКА, в т.ч. с аммиачными КДУ и ЭТМД [1–4].

Практика создания маневрирующих МКА с аммиачными КДУ и ЭТМД показала, что оценка эффективности КДУ методом натурных испытаний затрудняется ограничениями по количеству варьируемых испытываемых параметров летного образца КДУ и присущими этому методу ограничениями: большие материальные затраты и длительные сроки испытаний [1]. Поэтому при определении и исследовании летных характеристик КДУ и ЭТМД получило применение математическое моделирование ЭТМД, исходные данные для которого определяются по результатам натурных испытаний КДУ в составе различных МКА.

Исходные данные формируются в виде базы данных опорных альтернатив, составленных из МКА с КДУ, прошедших натурные летные испытания и описанных габаритно-массовыми и параметрическими математическими моделями [5]. Такой подход составляет сущность разрабатываемого в настоящее время опытно-теоретического метода оценки и исследования летных характеристик аммиачных КДУ с ЭТМД [6].

При сформулированных общих положениях опытно-теоретического метода оценка показателей качества маневрирующих МКА с аммиачными КДУ с учётом многокритериальных подходов требует его конкретизации в направлении комплексного применения математического моделирования при ограниченном количестве натурных экспериментов [6].

Объектом натурных испытаний являются аммиачные ЭТМД с тягой 30 мН, использованные в КДУ в натурных условиях для разведения пяти МКА по орбите функционирования (рис.1, 2) [1, 2].

В ходе натурных испытаний через блок управления КДУ, бортовой комплекс управления МКА передавались на наземный комплекс управления следующие телеметрические параметры ЭТМД, КДУ:

– температура нагревателя ЭТМД, формируемая первой термопарой T_{HD1} , °С;

- температура нагревателя ЭТМД, формируемая второй термопарой T_{HD2} , °С;
- напряжение нагревателя ЭТМД, В;
- ток в цепи нагревателя ЭТМД, А;
- давление в камере ЭТМД, кПа;
- температура нагревателя испарителя, формируемая первым термодатчиком T_{HI1} , °С;
- температура нагревателя испарителя, формируемая вторым термодатчиком T_{HI2} , °С;
- напряжение испарителя, В;
- ток испарителя, А.

В процессе натурных испытаний КДУ изменялись следующие параметры:

- время разогрева нагревателя ЭТМД и нагревателя испарителя;
- продолжительность работы ЭТМД;
- максимальная мощность нагревателя ЭТМД и испарителя КДУ;
- скорость нарастания мощности нагревателя ЭТМД и испарителя КДУ.

В процессе проведения натурных исследований КДУ использовались схемы «горячего» и «холодного» запуска ЭТМД [1].

Циклограмма «горячего» запуска ЭТМД включает в себя предварительный разогрев конструкции при помощи нагревателей и последующую подачу в ЭТМД аммиака, предварительно газифицированного в испарителе (рис. 3).

На рис. 4–5 приведены параметры ЭТМД при «горячем» запуске, полученные в ходе обработки телеметрической информации.

«Горячий» запуск ЭТМД является наиболее предпочтительным для обеспечения высокого удельного импульса тяги. Вместе с тем, опыт эксплуатации данной конструкции ЭТМД показал, что недостатком «горячего» способа запуска является низкая надежность ЭТМД из-за имеющейся вероятности перегорания нагревателей вследствие отсутствия теплосъема при разогреве конструкции.

Циклограмма «холодного» запуска ЭТМД включает в себя подачу в ЭТМД аммиака, предварительно газифицированного в испарителе, с практически одно-

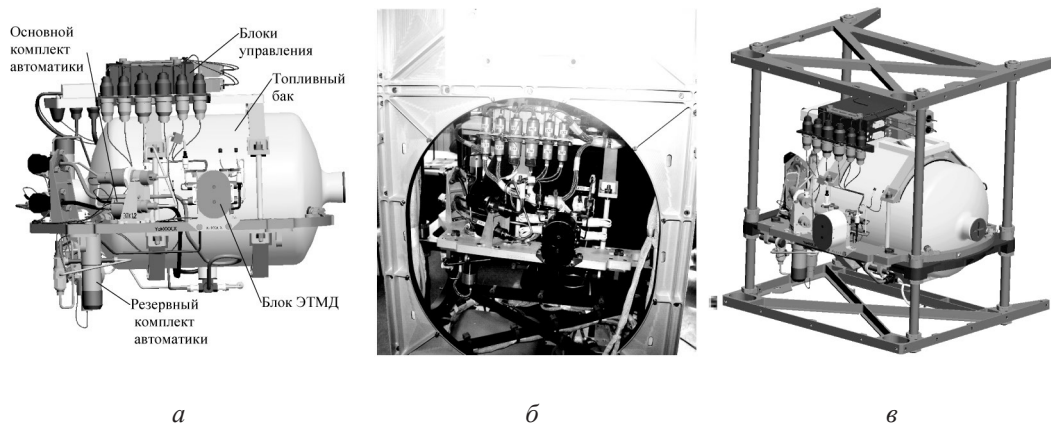


Рис. 1. Общий вид КДУ
а – общий вид КДУ; б – КДУ в составе МКА; в – установка КДУ в МКА

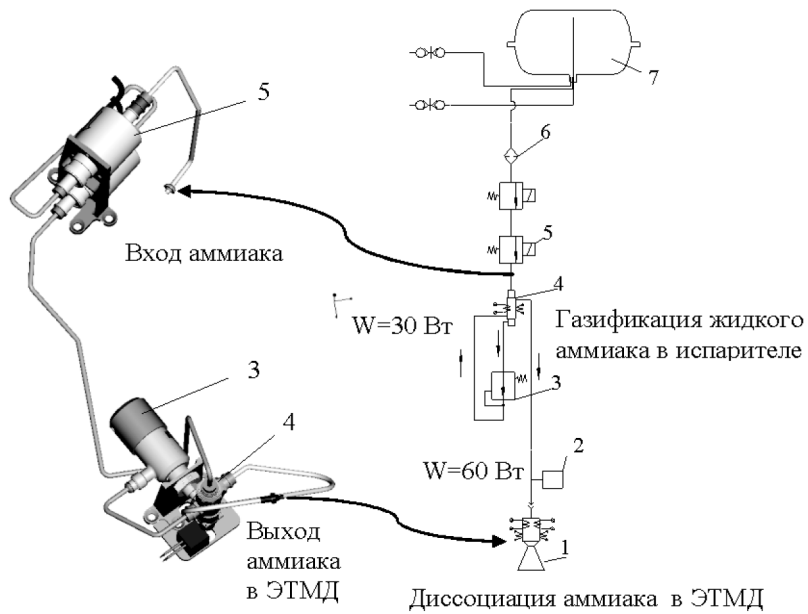


Рис. 2. Принципиальная схема КДУ
 1 – блок ЭТМД; 2 – датчик давления; 3 – регулятор давления;
 4 – испаритель; 5 – электропневмоклапан; 6 – фильтр; 7 – бак с аммиаком.

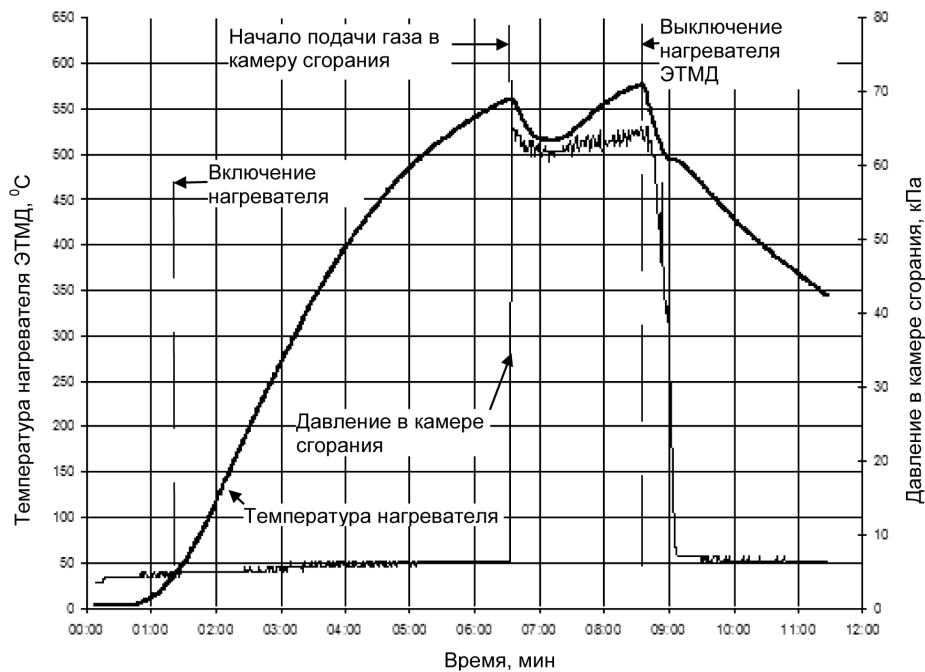


Рис. 3. Изменение параметров ЭТМД при «горячем» запуске
 (ТМИ МКА № 1, виток 766)

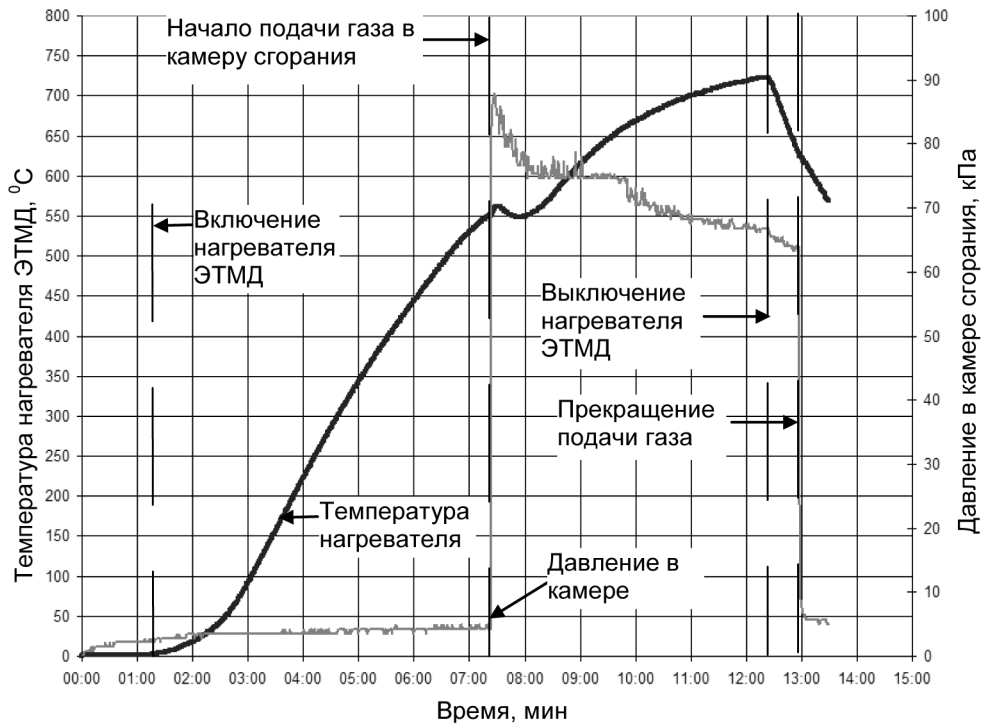


Рис. 4. Изменение параметров ЭТМД при «горячем» запуске (ТМИ МКА № 5, виток 523)

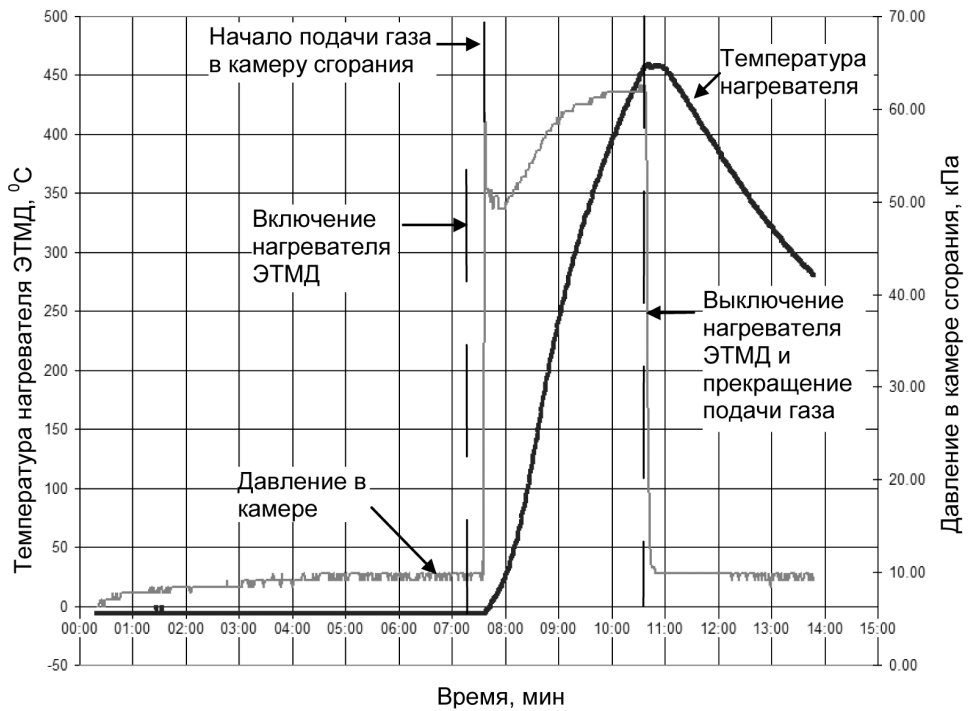


Рис. 5. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА № 2, виток 1519)

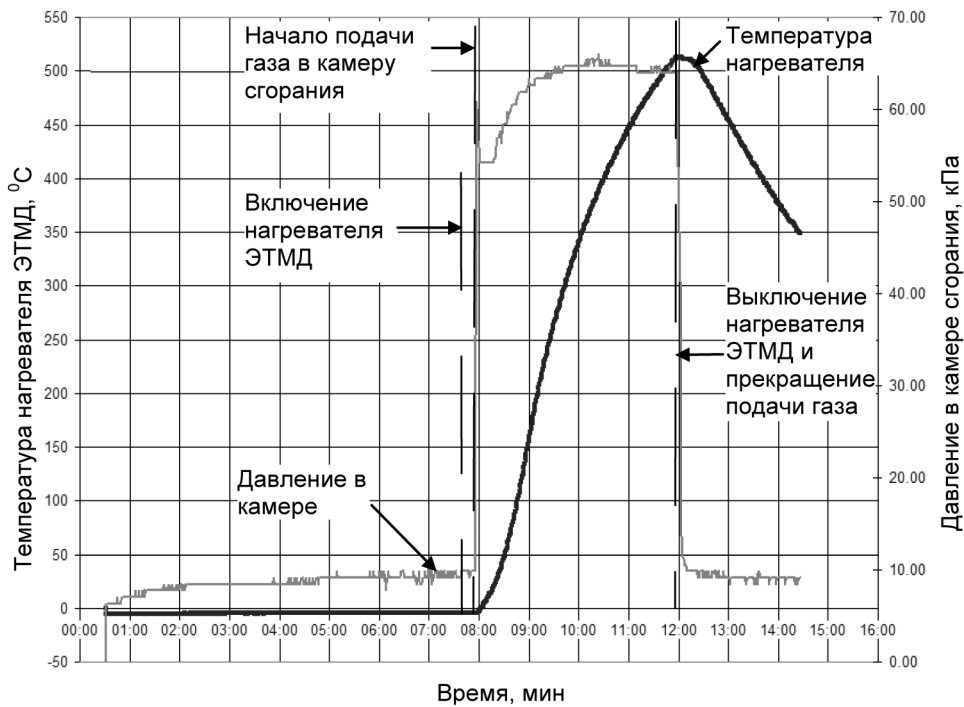


Рис. 6. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА № 2, виток 1533)

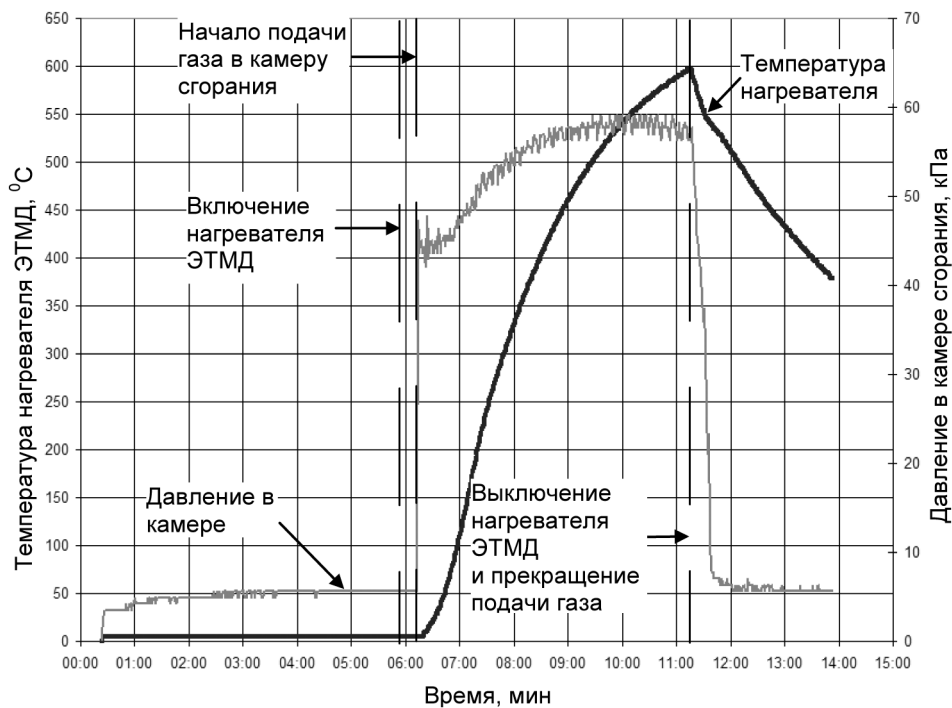


Рис. 7. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА № 1, виток 3384)

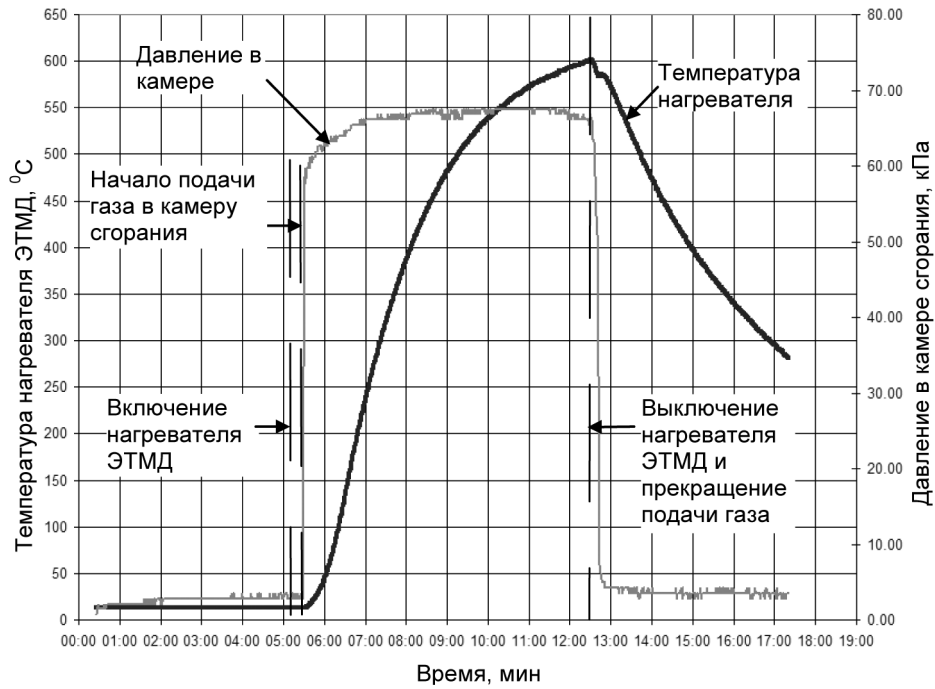


Рис. 8. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА №2, виток 1923)

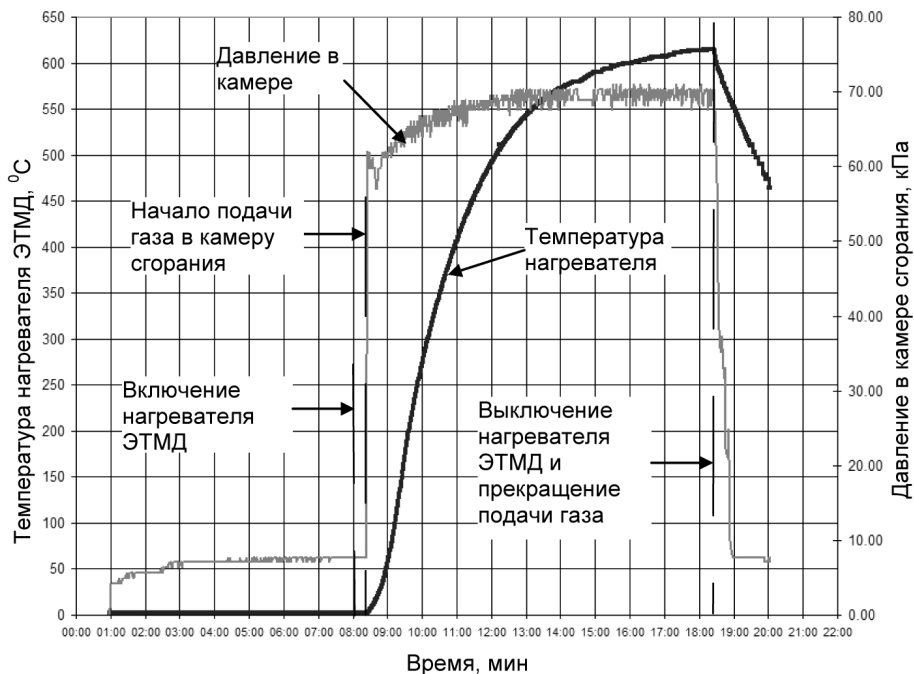


Рис. 9. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА № 3, виток 1736)

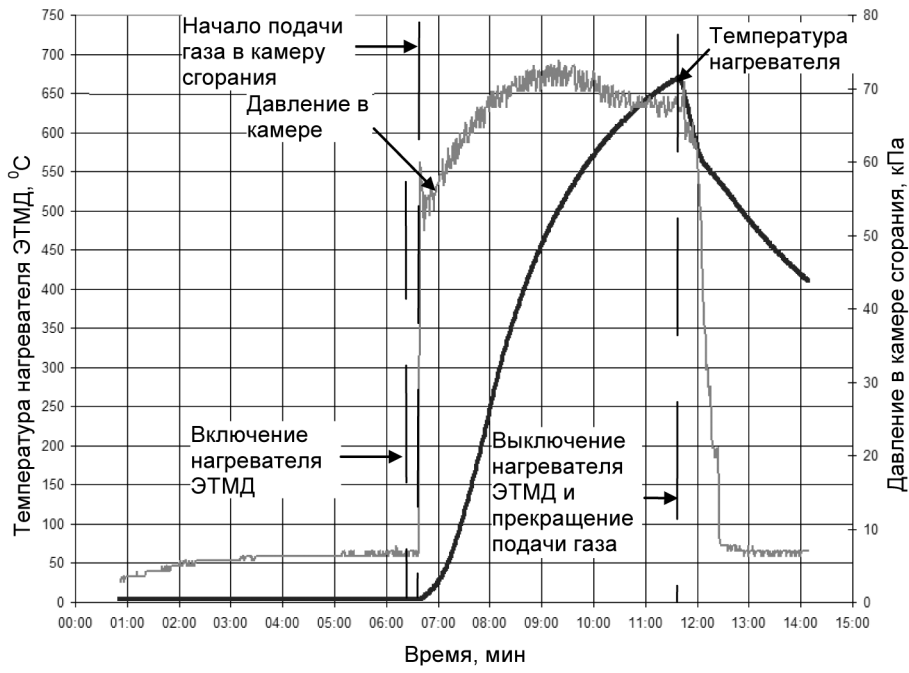


Рис. 10. Изменение параметров ЭТМД при «холодном» запуске (ТМИ МКА № 3, виток 3110)

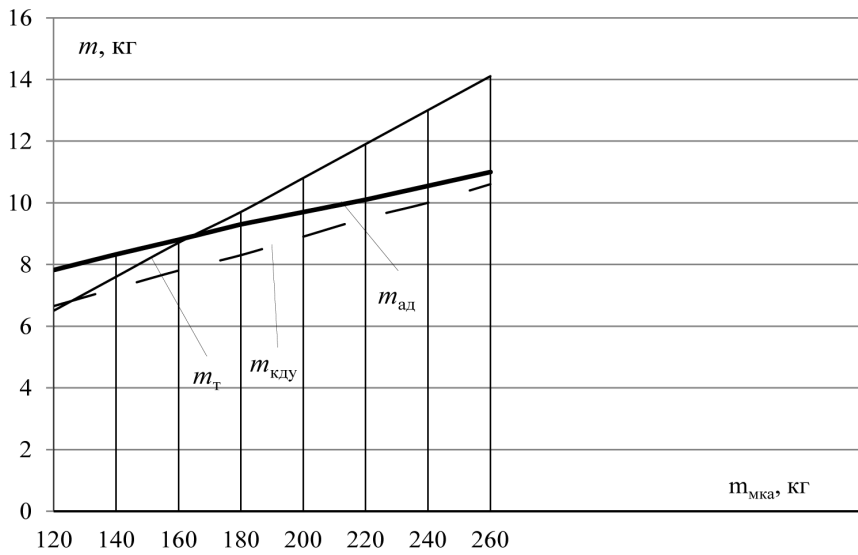


Рис. 11. Зависимость массовых характеристик КДУ от массы маневрирующего МКА

временным включением нагревателей. При натурной эксплуатации КДУ были реализованы «холодные» запуски ЭТМД с продолжительностью работы 3, 4, 5, 7, 10 минут. Характерное изменение температуры аммиака в ЭТМД показано на рис. 6.

На рис. 7–11 приведены параметры ЭТМД при «холодном» запуске и потребляемой мощности 60 Вт. Температура аммиака при «холодном» запуске ЭТМД ниже, чем при «горячем», в среднем на 100–130°C.

«Холодный» запуск ЭТМД гарантирует сохранение целостности нагревателей, однако ведет к снижению величины нагрева газообразного аммиака и к некоторому к снижению эффективности расходования рабочих запасов аммиака в КДУ.

Надежность «холодного» запуска на интервале испытаний подтверждена более 70 натурными включениями КДУ. По результатам натурной эксплуатации КДУ «холодный» запуск ЭТМД принят основным [1].

Повышение эффективности «холодного» запуска ЭТМД может быть достигнуто увеличением потребляемой мощности и времени работы ЭТМД при единичном включении. На рис. 12 показаны параметры ЭТМД при его запуске по «холодной» схеме и потребляемой мощности 80 Вт. В этом случае температура аммиака увеличивается на 100–120°C.

По результатам натурных испытаний КДУ сформулированы следующие выводы:

1. При «холодном» запуске ЭТМД длительностью от 3 до 10 минут достигается максимальная температура в камере ЭТМД в пределах от 458°C до 617°C.

2. При «горячем» запуске ЭТМД длительностью от 2 до 5 минут достигается максимальная температура в камере ЭТМД в пределах от 574°C до 726°C.

Основным проектным параметром ЭТМД является величина удельного импульса тяги, в основном определяемая температурой газообразного аммиака на входе в критическое сечение сопла. Температура газообразного аммиака определяется потребляемой мощностью, способом запуска и продолжительностью работы ЭТМД при одном включении [1].

Особенностью изменения температуры газообразного аммиака при нагреве ЭТМД является длительный период выхода на режим стационарной температуры.

С учетом циклограммы выхода ЭТМД на режим выражение для характеристической скорости, обеспечиваемой КДУ в составе МКА, имеет вид [1,7]:

$$\Delta V = -g_0 P_{уд}^B \ln \frac{M_{мка} - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^P} T^P (N-1) - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^B} T^B N}{M_{мка} - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^P} T^P (N-1)} - g_0 P_{уд}^P \ln \frac{M_{мка} - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^B} T^B N - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^P} T^P N}{M_{мка} - \frac{P_{дв}}{P_{уд}^B} T^B N}$$

где, ΔV – характеристическая скорость;

$P_{уд}^B, P_{уд}^P$ – средний удельный импульс тяги ЭТМД при выходе и после выхода на режим соответственно;

$M_{мка}$ – масса МКА;

$P_{дв}$ – тяга двигателя;

T^B, T^P – время выхода ЭТМД на режим и работы на режиме соответственно;

N – количество включений КДУ.

Удельный импульс тяги ЭТМД для переходного и стационарного режима определяется выражениями:

$$P_{уд}^P = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \left(\lambda + \frac{1}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{k+1}{2k} \frac{RT(t)}{\mu}} dt;$$

$$P_{уд}^B = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(\lambda + \frac{1}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{k+1}{2k} \frac{RT(t)}{\mu}} dt \quad (2)$$

где,

$\lambda = \frac{W_c}{a_{кр}}$ – коэффициент скорости газового потока;

$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R \cdot T(t)}{\mu}}$ – скорость потока газа в критическом сечении сопла;

$W_c = \sqrt{2 \frac{R}{\mu} T(t) \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_c}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$ – динамическая

составляющая удельного импульса тяги;

R – газовая постоянная;

T – температура продуктов сгорания в камере сгорания;

K, μ – показатель адиабаты расширения и молярная масса аммиака соответственно;

P_c, P_k – давление на срезе сопла и давление на входе в критическое сечение сопла соответственно.

Выражение для температуры в зависимости от времени представим в виде:

$$T(t) = c_0 - c_1 \cdot e^{-c_2 t} \quad (3)$$

где,

c_0 – температурный коэффициент при установившемся режиме работы;

c_1 – температурный коэффициент, учитывающий разницу начального и установившегося режима работы;

c_2 – коэффициент скорости нарастания температуры.

Используя результаты натурных испытаний ЭТМД для «холодного» запуска ЭТМД при энергопотреблении 60, 80 Вт, получены температурные зависимости для максимального времени функционирования ЭТМД, определяемого исключением перегрева электроклапана КДУ (20 мин.):

– для 60 Вт: $T(t) = (899,167 - 728,485 \cdot e^{-0,0078 \cdot t})$, К (4)

– для 80 Вт: $T(t) = (985,93 - 947,93 \cdot e^{-0,010687 \cdot t})$, К (5)

Выражения (4, 5) обеспечивают моделирование температуры ЭТМД с погрешностью менее 2,3% и

соответствующих значений удельного импульса тяги $P_{уд}^B, P_{уд}^P$.

Моделирование удельного импульса тяги ЭТМД по результатам натурных испытаний и использование выражения (1) для характеристической скорости ЭТМД (КДУ) в составе МКА позволяет уже на ранних стадиях проектирования моделировать летные характеристики КДУ и маневрирующего МКА с высокой точностью: запасы топлива на реализацию заданной характеристической скорости, габаритно-массовые характеристики КДУ и средств адаптации КДУ в МКА, включая средства выставки вектора тяги ЭТМД относительно центра масс МКА, степень увеличения габаритно-массовых характеристик МКА при установке КДУ, габариты и вместимость топливного бака с учетом газовой подушки, количество включений ЭТМД.

Для этих целей с использованием данных по натурному конструктивному исполнению МКА, КДУ с ЭТМД, средств адаптации КДУ в МКА моделируются соответствующие габаритно-массовые характеристики с использованием либо габаритно-массового метода, либо метода трехмерного параметрического моделирования [7, 8].

В качестве примера на рис. 11 приведены изменения массы топлива m_t , массы конструкции КДУ $m_{кду}$, массы средств адаптации $m_{ад}$ КДУ в составе МКА для следующих определенных математическим моделированием и принятых в качестве исходных параметров: $\Delta V=100$ м/с, $P_{уд}^B=158$ с, $P_{уд}^P=198$ с, $T^B=480$ с, $T^P=720$ с, $P_{эТМД}=30$ мН, $m_{мка}=120-260$ кг.

Более широкое использование результатов математического моделирования ЭТМД для оценки летных характеристик МКА с аммиачными КДУ различных конструктивных схем связано с формированием базы данных опорных альтернатив, составленной из летных маневрирующих МКА, габаритно-массовые и летные характеристики которых описаны математическими моделями [5, 8].

Работа выполнена в рамках выполнения гранта «Разработка принципов построения и методов проектирования многоцелевых спутниковых платформ с аммиачными КДУ в целях создания МКА военного, социально-экономического и научного назначения» (№ 14.574.21.01104)

Литература

1. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов: монография / В.Н. Блинов [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 264 с.

2. Патент 2332583 Российская Федерация, МПК F02K9/68. Электротермический микродвигатель / В.Н. Блинов [и др.]; патентообладатель: ЗАО «Полет-Интер»; заявл. 13.02.07; опубл. 27.08.08. – Бюл. № 24.

3. The studies of Small Space Vehicles Ammoniac Electrothermal Engine Units Design and Structural Layout

/ V.N. Blinov [et al.] // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9. – No. 5. ISSN 1913-1844, E-ISSN 1913-1852. Published by Canadian Center of Science and Education.

4. Design features and research of Electrothermal Microthrusters with Autonomous Heating Elements for the Purposes of Small Space Vehicle Orbital Manoeuvring / V.N. Blinov [et al.] // Indian Journal of Science and Technology. – October, 2015. – Vol 8(27). IPL0581 ISSN (Print) : 0974-6846. ISSN (Online) : 0974-5645.

5. Блинов, В. Н. К выбору опорных альтернатив при оценке эффективности малых космических аппаратов с аммиачными двигательными установками методом аналитической иерархии / В.Н. Блинов, В.В. Шалай, Е.Б. Чарушина // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 2. – С. 210–220.

6. Блинов, В. Н. Методика выбора конструктивных схем маневрирующих малых космических аппаратов методом аналитической иерархии / В.Н. Блинов, В.В. Шалай, Е.Б. Чарушина // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 158–168.

7. Оценка массовой эффективности маневрирующих малых космических аппаратов с двигательной установкой микротяги на аммиаке / В.Н. Блинов [и др.] // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2012. – № 1(107). – С. 59–61.

8. Блинов, В. Н. Исследования массовых характеристик опорных альтернатив корректирующих двигательных установок и средств их адаптации в малый космический аппарат / В.Н. Блинов, В.В. Шалай // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы IX всеросс. науч. конф. – Омск, 2015. – С. 50–56.