

Пути решения проблем создания современных газореактивных двигательных установок для малого космического аппарата

Авторы: Булдашев С. А., ФГУП «НИИМаш»; Кутуев Р. Х., ФГУП «НИИМаш»; Богданов В. В., ФГУП «НИИМаш»

Рассматривается применение газореактивных двигательных установок для стабилизации и ориентации малых космических аппаратов. Даются основные направления совершенствования газореактивных двигательных установок. Описываются проведённые во ФГУП «НИИМаш» для удовлетворения современных требований в области реактивных систем управления работы. Рассматриваются результаты выполненных работ.

Реактивные системы управления космическими аппаратами подбираются согласно выполняемым аппаратом задачам, устанавливающим требования:

- суммарного импульса;
- частот включений и возможности многократного и воспроизводимого запуска;
- минимальной величины единичных импульсов тяги;
- динамических характеристик двигателей и малой инерционности (времени выхода на режим и импульса последствия);
- срока активного существования космического аппарата.

Кроме того, при возможности обеспечения заданных условиями эксплуатации космического аппарата требований сразу несколькими типами реактивных систем управления критериями выбора той или иной системы являются [1]:

- состояние разработки и степень отработанности;
- стоимость разработки и изготовления;
- возможность серийного изготовления и наличие сырьевой базы;
- надёжность;
- минимальная полная масса.

По данным [1] для тяги менее 0,5 Н и полного импульса менее 5 000 Н·с наиболее эффективными по массовому совершенству являются системы с сублимационными двигателями. Проигрывая по массовому совершенству, системы с использованием энергии сжатого газа (газореактивные системы) превосходят их по отработанности, стоимости отработки и надёжности.

При тяге до тяги 5 Н и суммарному импульсе до 10 000 Н наиболее эффективными по минимальной полной массе являются газореактивные системы. По данным источника [2] область целесообразного применения реактивных систем управления на базе газовых двигательных установок ограничена суммарными импульсами менее 5881 Н·с (при тяге менее 20 Н) и 981 Н·с (при тяге менее 140 Н). Однако проведенные в 2012 году работы показали, что границами эффективности газореактивных систем являются величина тяги 1 Н и полный импульс менее 1000 Н·с.

Кроме того, в настоящее время наблюдается спрос на системы управления с высоким быстродействием (на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ с). В сложившейся ситуации реактивные системы управления на базе газовых двигательных установок являются предпочтительными.

Преимущества газореактивных систем:

- относительная простота конструкции;
- высокое быстродействие;
- возможность получения малых значений тяг и единичных импульсов при их высокой стабильности;
- высокая надёжность;
- возможность создания системы с длительным сроком работы и стабильностью рабочего тела;
- работоспособность в широком диапазоне температур;
- простота эксплуатации.

С целью удовлетворения новых требований во ФГУП «НИИМаш» разработаны меры, направленные на улучшение конструкции газореактивных систем. Требование минимальной полной массы газореактивной системы может быть удовлетворено совершенствованием существующих отработанных конструкций путём замены устаревших элементов и материалов современными аналогами. С этой целью во ФГУП «НИИМаш» проведена оценка возможности отказа от схем, использующих газовые ресиверы, и применения разработанных на предприятии стабилизаторов расхода.

По предварительным оценкам применение стабилизаторов расхода (проектная масса – 0,025 кг) вместо ресивера и блока управляющих клапанов (масса ресивера – 0,180 кг, масса 4 электроклапанов высокого давления – $4 \times 0,350 = 1,400$ кг) позволяет уменьшить массу двигательной установки приблизительно на 1,380 кг (при использовании восьми стабилизаторов расхода).

Работоспособность существующих стабилизаторов расхода в предполагаемых диапазонах

параметров рабочего тела проверена, окончательно вынесено решение о возможности создания новых стабилизаторов, выполненных на современном технологическом уровне.

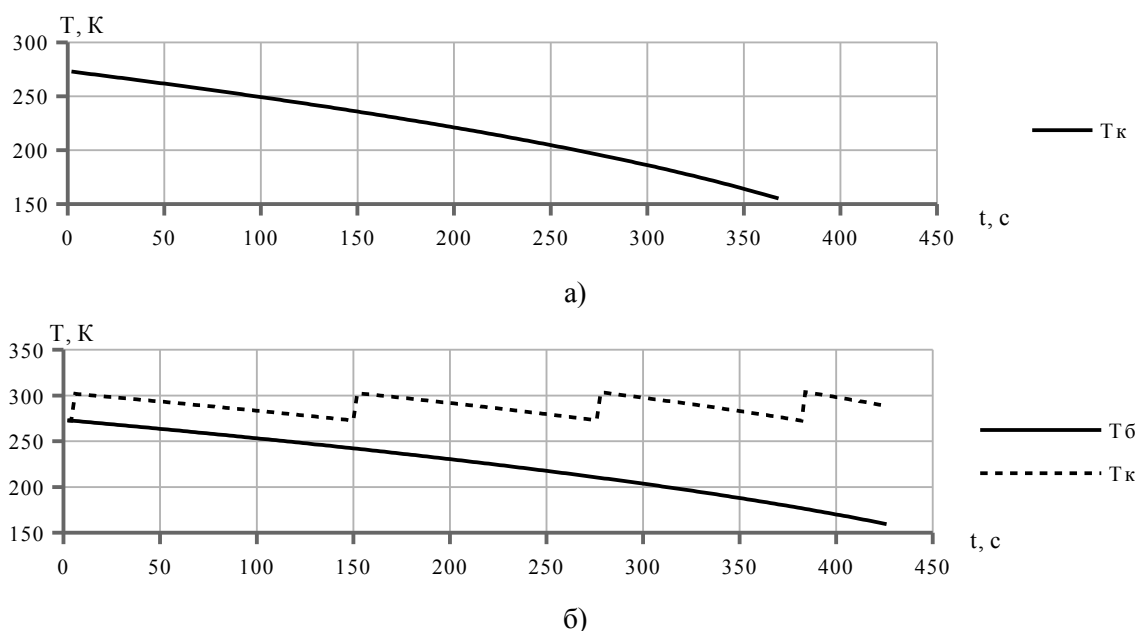
Задача определения минимально потребного количества рабочего тела решена созданием алгоритма расчёта заправляемой массы рабочего тела с учётом процессов, происходящих во время работы двигательной установки.

Как известно из газодинамики, при истечении из резервуара температура рабочего тела (а вместе с ней теплоёмкость, плотность и прочие параметры) меняются по закону (адиабата Пуассона) [3]: $\bar{T}_2 = \frac{T_2}{T_{02}} = (1 - \eta)^{k-1}$, где $\eta = \frac{\Delta m}{m_{02}}$, T_2 и \bar{T}_2 – температура рабочего тела на данный момент в размерной и безразмерной форме соответственно, T_{02} – температура рабочего тела в начальный момент времени, k – коэффициент адиабаты, m_{02} – масса рабочего тела в баллоне в начальный момент времени, Δm – расход рабочего тела на данный момент. В связи с этим расчёт параметров двигателя следует проводить с учётом изменений параметров рабочего тела, происходящих постепенно на протяжении всего времени работы двигательной установки.

Данная задача решена использованием итерационных численных методов с применением электронно-вычислительных машин. Принцип действия алгоритма расчёта заключается в разбивке всего процесса работы двигательной установки на множество малых интервалов (по массовому расходу или по приращению суммарного импульса), в пределах каждого из которых параметры рабочего тела можно считать неизменными, и последующем расчётом всех параметров рабочего тела в конце участка (являющихся начальными параметрами для следующего участка). Так как параметры рабочего тела, как следует из адиабаты Пуассона, зависят от начальной массы, являющейся неизвестной величиной, возникает необходимость проведения нескольких итерационных расчётов, в результате которых возможно определение потребной заправляемой массы рабочего тела для обеспечения требуемых конечных условий работы двигательной установки (минимальное давление, минимальный удельный импульс и др.). При этом рассмотрены два варианта работы двигательной установки: с использованием какой-либо системы поддержания параметров (температуры) рабочего тела (с целью обеспечения постоянства тяги двигательной установки) и без неё. В первом случае алгоритм позволяет определить потребное для поддержания температуры рабочего тела количество теплоты согласно выбранной программе работы нагревательных элементов. Рассмотренные случаи включают: идеальный случай – плавное увеличение подвода теплоты в зависимости от текущих параметров рабочего тела на входе в нагревательный элемент; ступенчатое дискретное возрастание мощности нагревателя по достижению рабочим телом минимально заданных параметров.

Результаты расчётов температуры рабочего тела на протяжении работы двигательной уста-

новки в баллоне ($T_{\text{б}}$) и на входе в двигатель ($T_{\text{к}}$) без системы поддержания параметров рабочего тела и со ступенчатым дискретным возрастанием мощности отображены на рисунке 1.



а) без системы поддержания параметров, б) со ступенчатым дискретным возрастанием мощности

Рисунок 1 – Теоретические зависимости изменения температуры рабочего тела

Возможно использование реальных режимов подвода тепла в нагревательном элементе согласно экспериментальным данным.

Дополнительно предложен метод определения оптимальных геометрических характеристик баллона хранения рабочего тела с точки зрения массового совершенства двигательной установки и условий работы автоматики.

Все расчёты выполнены использованием прямого программирования без привлечения специализированных программных комплексов разработки сторонних организаций.

В рамках рассмотрения возможных реализаций подогрева рабочего тела предложено использование теплообменного элемента пористого материала, обладающего большой площадью контакта «твёрдое тело – газ» и, как следствие, малыми габаритами.

Динамические процессы двигателя складываются из процессов срабатывания электроклапана и процесса заполнения полости камеры двигателя, сопровождающегося истечением рабочего тела из камеры через сопло. Порядок расчёта динамических процессов в газовых двигателях в момент выхода на режим и выключения описан в [1]. По результатам оценочных расчётов времена открытия и закрытия электроклапана на порядок превосходят времена протекания процессов наполнения и опорожнения камеры двигателя. Так, для камеры объёмом $39 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ при входном давлении 10 атмосфер и истечении в вакуум время заполнения составит приблизительно $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, а время опорожнения после закрытия клапана составит $6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. В то же время применяемые в настоящее время клапаны имеют времена открытия и закрытия порядка $10 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Таким

образом улучшение динамических характеристик газовых двигателей напрямую связано с совершенствованием управляющих электроклапанов.

Для обеспечения высокого быстродействия двигателей в составе двигательной установки принято решение использовать современные электроклапаны с высокой скоростью срабатывания типа 18РТ собственной разработки. Зависимость времени открытия (t_{0}) клапана 18РТ от напряжения питания и входного давления показаны на рисунке 2.

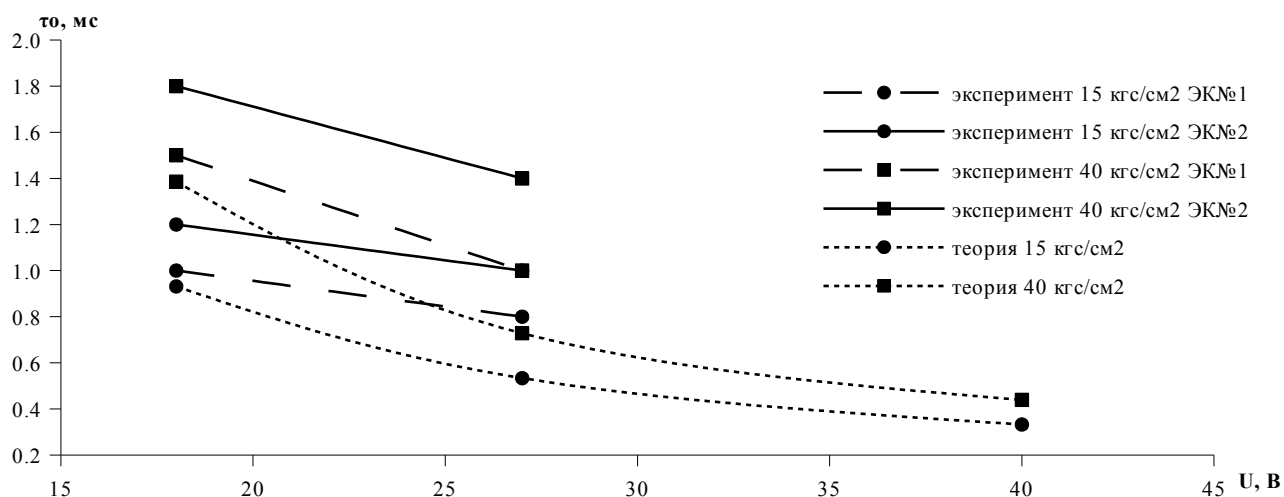


Рисунок 2 – Экспериментальные и теоретические данные динамических характеристик электроклапана 18РТ

Важной частью разработки двигательной установки является её испытание и подтверждение заявленных проектных характеристик. В связи с ужесточившимися требованиями к динамическим характеристикам двигателей испытательные стенды должны быть оснащены средствами измерения, способными регистрировать быстро меняющиеся параметры. Ключевым моментом в подтверждении параметров двигателей является прямой замер тяги с использованием тягоизмерительного устройства. Во ФГУП «НИИМаш» проведены работы по проверке возможностей системы измерения динамической тяги газовых двигателей в диапазоне от 0 до 1 Н с помощью импульсного тягоизмерительного устройства ИТУ-3. Работы проведены по методикам, разработанным согласно теории, изложенной в [4]. В ходе проверки системы определены частоты собственных колебаний установки и подводящих трубопроводов, проведены контрольные испытания существующего двигателя МД-08, их результаты сопоставлены с известными параметрами двигателя. По результатам работ существующая система измерения динамической тяги на базе тягоизмерительного устройства ИТУ-3 позволяет оценивать динамические характеристики газовых двигателей типа МД-08 с тягой до 1 Н при испытаниях в вакууме с частотой замеров 2000 Гц.

Для подтверждения правильности принятых решений проведены патентные исследо-

вания, направленные на выявление существующего уровня техники в области создания газореактивных систем. По результатам исследования имеющиеся на предприятии наработки позволяют создать двигательную установку, выглядящую предпочтительнее, чем известные реальные двигательные установки, а также сборный прототип.

На основе результатов проведённых работ можно сделать вывод о создании во ФГУП «НИИМаш» научно-технического задела для проектирования и отработки газореактивных двигательных установок с параметрами, соответствующими или превосходящими таковые у лучших отечественных и зарубежных образцов объектов аналогичного назначения.

Библиография

1. Беляев, Н. М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов [Текст] / Н. М. Беляев, Н. П. Белик, Е. И. Уваров. – М.: «Машиностроение», 1979. – 232 с.: ил.
2. Проектирование газореактивных систем космических аппаратов [Текст] / В. М. Ковтуненко, Е. И. Уваров, Б. В. Сергейчук, Л. И. Новиков, Н. М. Беляев. – М.: «Машиностроение», 1973. – 264 с.: ил.
3. Орлов, Б. В. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твёрдом топливе [Текст] / Б. В. Орлов, Г. Ю. Мазинг. – М.: «Машиностроение», 1968. – 536 с.: 111 ил.
4. Пановко, Я. Г. Основы прикладной теории колебаний и удара [Текст] / Я. Г. Пановко. – 4-ое изд., перераб. и доп. – Л.: «Политехника», 1990. – 271,[1] с.: 22 ил.; 22 см.