

## РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА В ГАЗОГЕНЕРАТОР ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрены статические характеристики однокомпонентного газогенератора для питания турбины и управляющего дросселя системы подачи жидкостного ракетного двигателя. Приведены уравнения, описывающие процессы, происходящие в унитарном газогенераторе и управляющем дросселе, а также показаны графические зависимости. Представлена математическая модель процессов, позволяющая выявить основные закономерности влияния командных величин и внешних воздействий на выходную величину. Результаты, представленные в работе, позволяют получить динамические характеристики элементов жидкостного ракетного двигателя.

**Ключевые слова:** жидкостной ракетный двигатель, унитарное топливо, жидкостной газогенератор, дроссель.

Жидкостной ракетный двигатель (ЖРД) является динамической системой, основными звеньями которой являются камера сгорания, ее форсуночная головка, такт охлаждения, трубопроводы подачи жидких компонентов топлива, турбонасосный агрегат, жидкостной газогенератор и др. Процессам, протекающим во всех этих звеньях ЖРД, свойствен динамический характер. Помимо этого, составляющие этой динамической системы звенья являются сами по себе сложными элементами, правда, более низкого иерархического уровня [1, 2].

Для исследования динамических процессов, происходящих в звеньях ЖРД, успешно применяется системотехнический подход [2], который позволяет устанавливать сложные связи между звеньями системы, выявлять замкнутые контуры прохождения воздействий внутри элементов, а также в самой системе в целом. Два основных метода, составляющих названный подход, — анализ и синтез. Процедура анализа делает возможным представить ЖРД как иерархическую структуру, в которой ее системы по функциональному назначению разбиваются на подсистемы, которые, в свою очередь, делятся на элементы. Далее моделируются физические процессы в каждом элементе и исследуются его свойства. Применяемый после анализа синтез выделяет звенья более высокого иерархического уровня в структуре ЖРД, выявляет взаимодействия и взаимовлияния элементов друг на друга, позволяет упростить структурную схему сложной системы. Для моделирования физических процессов внутри элемента вначале необходимо получить его статическую характеристику, а лишь затем выявить динамические свойства [3–5].

Таким образом, основная задача работы — получение уравнений, описывающих зависимость

между выходной и входными величинами на установившемся режиме (статические характеристики), для жидкостного однокомпонентного газогенератора совместно с его управляющим элементом (дросселем переменного проходного сечения), который дозирует поступление топлива.

Данное соединение звеньев (однокомпонентный газогенератор и дроссельный кран) встречается в ЖРД с насосной системой подачи и унитарным топливом для питания жидкостного газогенератора турбины.

Путем реакции разложения жидкого унитарного компонента (например, перекиси водорода, гидразина) в присутствии твердого катализатора получают высокотемпературный газ, являющийся рабочим телом для газовой турбины турбонасосного агрегата (ТНА) системы подачи жидких компонентов топлива в камеру двигателя [6, 7]. Пакет катализатора расположен непосредственно в камере разложения газогенератора. Давление на входе в газовую турбину ТНА, а значит, и ее мощность, можно изменять с помощью проходной площади дросселя. В итоге это изменение приводит к управлению силой тяги ЖРД.

В принятой схеме жидкостной газогенератор, работающий на унитарном топливе, состоит (рис. 1) из камеры разложения 1, пакета с твердым катализатором 2, форсуночной головки газогенератора 3, обеспечивающей поступление топлива в камеру разложения. В качестве управляющего элемента 4 рассматривается дроссельный кран, который установлен на входе в форсуночную головку 3. Для выполнения поставленной задачи требовалось получить отдельно статические характеристики жидкостного газогенератора (ЖГГ) и дросселирующего крана, а также построить совместную статическую

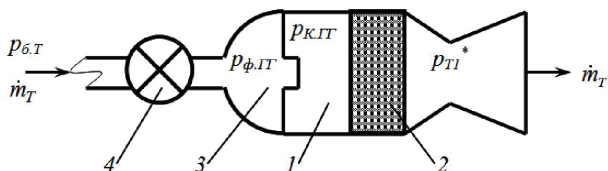


Рис. 1. Физическая модель однокомпонентного газогенератора с управляющим дросселем:

- 1 — камера разложения;  
2 — пакет с твердым катализатором;  
3 — форсуночная головка; 4 — управляющий элемент

характеристику газогенератора, работающего совместно с дросселем.

Первым рассматриваемым звеном в выбранной системе элементов является газогенератор, так как его выходная величина будет являться выходной величиной всей системы, вторым звеном — управляющий элемент. ЖГГ непосредственно состоит из трех элементов: камеры разложения 1, пакета с твердым катализатором 2 и форсуночной головки 3. Однако камеру и пакет катализатора можно объединить в единый узел и представить его как распределенное по длине сопротивление. Тогда другим элементом, составляющим ЖГГ, будет форсуночная головка, рассматриваемая как сосредоточенное сопротивление.

Выходной величиной ЖГГ будем считать перепад давления  $\Delta p_{ГГ}$ , а входной — расход рабочего тела (унитарного топлива)  $\dot{m}_T$ . Тогда выходной величиной камеры разложения с пакетом катализатора будет перепад давления в пакете катализатора  $\Delta p_{к,ГГ}$ , выходной величиной форсуночной головки (ФГ) — перепад давления на ФГ ЖГГ  $\Delta p_{\phi,ГГ}$ , а входная величина будет общая, как и для всего звена (ЖГГ) — расход унитарного топлива  $\dot{m}_T$ . Перепады давлений определяются следующим образом:

$$\Delta p_{к,ГГ} = p_{к,ГГ} - p_{Г1}^*; \quad (1)$$

$$\Delta p_{\phi,ГГ} = p_{\phi,ГГ} - p_{к,ГГ}; \quad (2)$$

$$\Delta p_{ГГ} = \Delta p_{к,ГГ} + \Delta p_{\phi,ГГ} = \Delta p_{\phi,ГГ} - \Delta p_{Г1}^*, \quad (3)$$

где  $p_{к,ГГ}$  — давление в камере разложения ЖГГ перед катализатором;  $p_{\phi,ГГ}$  — давление перед форсунками ЖГГ;  $\Delta p_{Г1}^*$  — полное давление на входе в газовую турбину (или на выходе из ЖГГ).

Зависимость перепада давления в пакете катализатора (см. выражение (1)), представляющего собой послойную насыпку твердых гранул вещества, от расхода, проходящего сквозь него рабочего тела (жидкого однокомпонентного топлива), представляет собой сложную эмпирическую зависимость. Однако для небольших пределов изменения расходов в первом приближении эта зависимость может быть представлена аналитически по формуле Вейсбаха:

$$\begin{aligned} \Delta p_{к,ГГ} &= \zeta_{кам} \frac{\rho_T V_T^2}{2} \\ &= \zeta_{кам} \frac{\dot{m}_T^2 l^2}{2 \rho_T M_{кам}^2 (1/\rho_{нас} - 1/\rho_{кр})^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\rho_T$  — плотность рабочего тела в газообразном состоянии;  $V_T$  — скорость рабочего тела;  $\zeta_{кам}$  —

приведенный коэффициент местного сопротивления пакета катализатора;  $M_{кам}$  — масса твердого катализатора в пакете;  $\rho_{нас}$  — насыпная плотность катализатора;  $\rho_{кр}$  — плотность катализатора в кристаллическом состоянии;  $l$  — длина пакета катализатора.

Масса закладываемого в пакет катализатора зависит от расхода рабочего тела и определяется по удельной нагрузке катализатора  $S$ , определяемой как отношение расхода рабочего тела (в кг/с) к массе твердого катализатора (в кг):

$$S = \frac{\dot{m}_T}{M_{кам}}.$$

Так как рабочее тело (жидкое унитарное топливо), проходя через слой гранул катализатора, газифицируется (изменяет свое агрегатное состояние), а по мере выработки катализатора его характеристики изменяются, сопротивление пакета твердого катализатора тоже изменяется. Кроме того, даже при одной и той же  $M_{кам}$  сопротивление пакета будет отличаться из-за различий толщины слоя гранул, их размеров и формы, конструктивного оформления ЖГГ.

Все это требует уточнения методом проливки (проведения эксперимента) статической характеристики камеры разложения совместно с пакетом катализатора, связывающей перепад давления в пакете с расходом через него рабочего тела  $\Delta p_{к,ГГ} = f(\dot{m}_T)$  и построенной по зависимости (4).

Для турбулентных режимов движения в элементах ЖРД можно считать зависимость потерь давления от расхода квадратичной, что позволяет представить выражение (4) в следующем виде:

$$\Delta p_{к,ГГ} = p_{к,ГГ} - p_{Г1}^* = A_{кам} \frac{\dot{m}_T^2}{\rho_T}, \quad (5)$$

где

$$A_{кам} = \zeta_{кам} \frac{l^2}{2 M_{кам}^2 (1/\rho_{нас} - 1/\rho_{кр})^2} = \frac{\rho_T \Delta p_{к,ГГ}}{\dot{m}_T^2}.$$

Постоянная  $A_{кам}$  может быть уточнена по результатам экспериментальной проливки на стенде.

При построении статической характеристики форсуночной головки ЖГГ можно считать, что форсунки — сосредоточенные сопротивления, дозирующие подачу компонента унитарного топлива в камеру разложения. Для подобного случая зависимости между перепадом давления на форсуночной головке (выходной величиной)  $\Delta p_{\phi,ГГ}$  (см. выражение (2)) и расходом компонента топлива через форсунки (входной величиной)  $\dot{m}_T$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{m}_T &= \sum_{i=1}^n [\mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2 \rho_T (p_{\phi,ГГ} - p_{к,ГГ})}]_i = \\ &= \sum_{i=1}^n [\mu_{\phi} F_{\phi} \sqrt{2 \rho_T \Delta p_{\phi,ГГ}}]_i, \end{aligned}$$

где  $\mu_{\phi}$  — коэффициент расхода отдельной форсунки;  $F_{\phi}$  — проходная площадь отдельной форсунки;  $n$  — число установленных в головке форсунок.

Аналитически получить такую зависимость достаточно проблематично из-за наличия нескольких форсунок и сложной зависимости коэффициента расхода от проходной площади дроссельного крана. Поэтому статическую характеристику форсу-

ночной головки целесообразно определить методом проливки, используя зависимость вида:

$$\dot{m}_T = \sqrt{\rho_T(p_{\phi,ГГ} - p_{к,ГГ})/A_{\phi,ГГ}}, \quad (6)$$

здесь постоянная  $A_{\phi,ГГ}$  определяется экспериментально:

$$A_{\phi,ГГ} = (p_{\phi,ГГ} - p_{к,ГГ}) \frac{\rho_T}{\dot{m}_T^2} = \frac{\Delta p_{\phi,ГГ} \rho_T}{\dot{m}_T^2}.$$

Необходимо учитывать, что полученная по результатам проливки постоянная  $A_{\phi,ГГ}$  будет действительна только для пределов изменения потерь давления, в которых эта проливка производилась. При этом перепад давления на форсунках ЖГГ на расчетном режиме должен быть назначен с учетом требований, предъявляемых к типу применяемых форсунок, глубине регулирования по тяге.

Таким образом, статическая характеристика форсуночной головки ЖГГ будет иметь вид:

$$\Delta p_{\phi,ГГ} = p_{\phi,ГГ} - p_{к,ГГ} = A_{\phi,ГГ} \frac{\dot{m}_T^2}{\rho_T}. \quad (7)$$

В итоге, статическую характеристику жидкостного газогенератора, работающего на унитарном топливе, представляющего собой соединение двух элементов — камеры разложения с пакетом катализатора и форсуночной головки, — можно получить суммированием (см. выражение (3)) зависимостей (5) и (7):

$$\begin{aligned} \Delta p_{ГГ} &= p_{\phi,ГГ} - p_{Г1} = \Delta p_{к,ГГ} + \Delta p_{\phi,ГГ} = \\ &= A_{кам} \frac{\dot{m}_T^2}{\rho_T} + A_{\phi,ГГ} \frac{\dot{m}_T^2}{\rho_T} = (A_{кам} + A_{\phi,ГГ}) \frac{\dot{m}_T^2}{\rho_T}. \end{aligned} \quad (8)$$

Суммирование можно производить аналитически или графически. Выходной величиной выступа-

ют потери давления в газогенераторе  $\Delta p_{ГГ}$ , а входной — расход рабочего тела  $\dot{m}_T$ .

Вторым звеном рассматриваемой системы является управляющий элемент, являющийся частью регулятора тяги ЖРД. В качестве выходной величины при определении статической характеристики дросселя рассматривается перепад давления на нем  $\Delta p_{гр,ГГ}$ , а в качестве входной, как и для ранее рассмотренного звена — расход рабочего тела  $\dot{m}_T$ . Т.е. статическая характеристика дросселя будет иметь вид:

$$\Delta p_{гр,ГГ} = p_{б,Г} - p_{\phi,ГГ} = f(\dot{m}_T),$$

где  $p_{б,Г}$  — давление в баке компонента топлива.

В случае использования вытеснительной системы подачи компонента в ЖГГ выбирается давление в баке компонента топлива для работы на расчетном режиме. В процессе работы двигателя выбранное давление будет поддерживаться постоянным с помощью агрегатов системы надува (например, газовых редукторов).

Вследствие того, что проходная площадь дроссельного крана  $F_{гр,ГГ}$  изменяется в общем случае от нуля до максимума, а коэффициент расхода дроссельного крана  $\mu_{гр}$  является функцией его проходной площади, статическая характеристика управляющего элемента представляет собой поле характеристик. При этом необходимо учитывать, что при работе ЖРД на режиме максимальной тяги (расчетный режим) дроссельный кран частично открыт (70...75 %  $F_{гр,ГГ,max}$ ) для необходимости обеспечения запасов регулирования двигателя [8]. Связь между перепадом давления на дросселе, расходом жидкого компонента и площадью проходного сечения определяется выражением:

$$\begin{aligned} \dot{m}_T &= \mu_{гр} F_{гр,ГГ} \sqrt{2\rho_T(p_{б,Г} - p_{\phi,ГГ})} = \\ &= \mu_{гр} F_{гр,ГГ} \sqrt{2\rho_T \Delta p_{гр,ГГ}}. \end{aligned}$$

Таблица 1

Результаты расчета статических характеристик ЖГГ и управляющего элемента на различных режимах работы

Режим	$\dot{m}_T$ , кг/с	$A_{кам} \cdot 10^{-6}$ , м <sup>-4</sup>	$\Delta p_{\phi,ГГ}$ , МПа	$A_{\phi,ГГ} \cdot 10^{-6}$ , м <sup>-4</sup>	$\Delta p_{к,ГГ}$ , МПа	$\Delta p_{ГГ}$ , МПа	$F_{гр,ГГ} \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup>	$\Delta p_{гр,ГГ}$ , МПа
номинальный	7,5	12,75	0,498	51,20	2,000	2,498	3,98	0,202
I	1,5		0,020		0,080	0,100		0,008
II	4,5		0,179		0,720	0,899		0,073

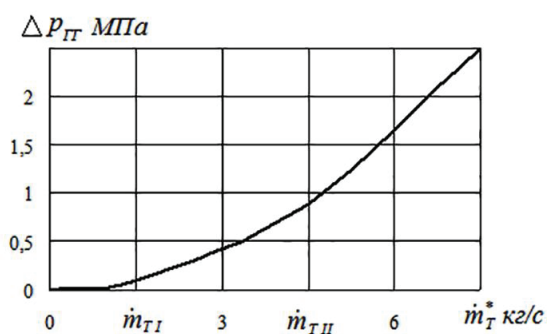


Рис. 2. Статическая характеристика газогенератора

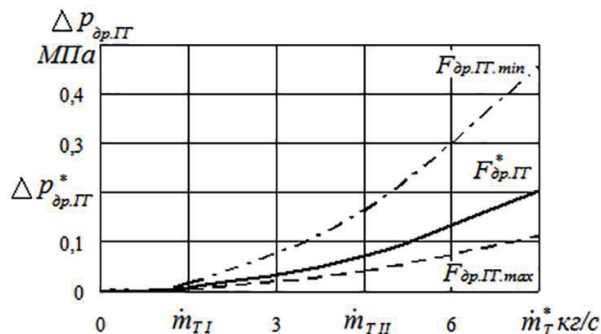


Рис. 3. Статическая характеристика управляющего дросселя

Таким образом, статическая характеристика дроссельного крана будет

$$P_{б.Г} - P_{ф.Г} = \Delta p_{гр.Г} = \frac{1}{2\mu_{гр}^2 F_{гр.Г}^2} \frac{\dot{m}_Г^2}{\rho_Г}. \quad (9)$$

Проходная площадь дроссельного крана на каждом из режимов работы в зависимости от необходимого расхода унитарного топлива и перепада давлений определяется по выражению

$$F_{гр.Г} = \frac{\dot{m}_Г}{\mu_{гр} \sqrt{2\rho_Г(P_{гр.Г} - P_{ф.Г})}}.$$

По выражениям (8) и (9) были рассчитаны статические характеристики и дроссельного крана для случая использования в качестве унитарного топлива водного раствора перекиси водорода ВПВ-80 и пакета катализатора с характеристиками  $S = 4 \frac{\text{кг/с}}{\text{кг}}$ ,  $\rho_{нас} = 1650 \text{ кг/м}^3$ . Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Статическая характеристика ЖГГ, полученная по выражению (8), представлена на рис. 2. На рис. 3 показана статическая характеристика управляющего дросселя жидкостного газогенератора. На ней нанесены перепады давления на дросселе и соответствующие им площади проходных сечений дроссельного крана, потребные для каждого из выбранных режимов. В рабочей точке (на расчетном режиме) дроссель открыт на 75 % ( $F^*_{гр.Г} = F_{гр.Г.ном} = 0,75 F_{гр.Г.мах}$ ) и перепад давления на нем соответствует заданному  $\Delta p^*_{гр.Г}$ . По этой характеристике (рис. 3) видно, что с увеличением проходной площади дросселя  $F_{гр.Г}$  при неизменном (заданном) расходе унитарного топлива перепад давления на дроссельном кране будет уменьшаться, что позволяет изменять статическую характеристику всей гидравлической системы, а в конечном итоге и увеличивать тягу двигателя.

На рис. 4 приведена статическая характеристика всей рассмотренной системы, т.е. жидкостного газогенератора совместно с дроссельным краном, открытым на расчетном режиме (\*) и режимах предварительной ступени (I и II).

Получение статических характеристик отдельных звеньев ЖРД позволяет получить на их основе динамические характеристики составляющих его элементов и в дальнейшем оценить динамические свойства всего двигателя [9, 10].

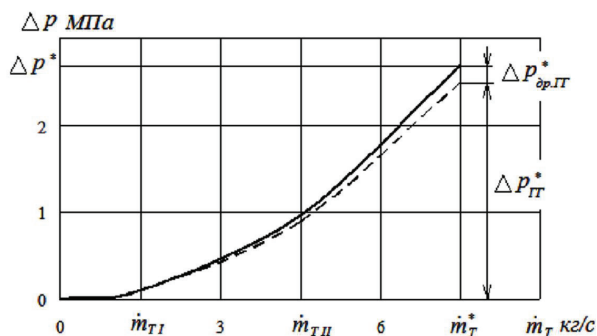


Рис. 4. Статическая характеристика газогенератора с управляющим дросселем

## Библиографический список

1. Бабкин А. И., Белов С. И., Рутовский Н. Б. [и др.]. Основы теории автоматического управления ракетных двигательных установок. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1986. 458 с.
2. Лебединский Е. В., Калмыков Г. Л., Мосолов С. В. [и др.]. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей / под ред. А. С. Коротева. М.: Машиностроение, 2009. 375 с.
3. Васютин Ю. И., Смирнов И. А., Ягодников Д. А. [и др.]. Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок / под ред. Д. А. Ягодникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 223 с. ISBN 978-5-7038-4120-4.
4. Karimi H., Mohammadi R., Taheri E. E. Dynamic Simulation and Parametric Study of a Liquid Propellant Engine // RAST '07, 2007 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 14–16 June. 2007. P. 219–224. DOI: 10.1109/RAST.2007.4283980.
5. Hetem A., Miraglia J., Burian R. [et al.]. Numerical simulation of liquid propellant rocket engines // MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention, May. 2011. P. 930–934.
6. Вачнадзе В. Д., Овечко-Филиппов Э. В., Смоленцев А. А. [и др.]. Разработка, этапы модернизации и итоги пятидесятилетней эксплуатации первого отечественного жидкостного ракетного двигателя замкнутой схемы // Космическая техника и технологии. 2015. № 2 (9). С. 82–90.
7. Калачевский Б. А., Яковлев А. Б. ЖРДУ как исполнительный орган системы управления движением // Полет: общерос. науч.-техн. журн. 2012. № 5. С. 46–51.
8. Горячкин А. А., Жуковский А. Е., Игначков С. М. [и др.]. Регуляторы расхода для топливных систем двигателей летательных аппаратов / под ред. В. П. Шорина. М.: Машиностроение, 2000. 208 с. ISBN 978-5-217-03058-3.
9. Яковлев А. Б., Личман А. А. ЖРДУ как исполнительный орган системы управления движением // Полет: общерос. науч.-техн. журн. 2010. № 4. С. 36–40.
10. Завадский В. К., Иванов В. П., Каблова Е. Б. [и др.]. Терминальные системы управления расходом топлива жидкостных ракет-носителей (История развития от Р-7 до современных РН «Союз», РН «Ангара») // Датчики и системы. 2018. № 4 (224). С. 3–16.

**КУЗЬМЕНКО Ирина Анатольевна**, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 9128-3421

Адрес для переписки: kia55@inbox.ru

**ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 8194-5800

AuthorID (РИНЦ): 488687

ORCID: 0000-0002-1987-2138

AuthorID (SCOPUS): 56503089200

ResearcherID: E-7451-2014

Адрес для переписки: yakovlev@omgtu.ru

## Для цитирования

Кузьменко И. А., Яковлев А. Б. Расчет статической характеристики системы подачи унитарного топлива в газогенератор жидкостного ракетного двигателя // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 15–18. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-15-18.

Статья поступила в редакцию 15.10.2018 г.

© И. А. Кузьменко, А. Б. Яковлев