

УДК 621.454.3

В. А. Глазков, В. Г. Енотов, канд. техн. наук Л. Р. Козак, В. С. Фоменко

ДВИГАТЕЛИ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЯГОЙ

Рассмотрены результаты научно-исследовательских и экспериментальных работ, проведенных ГП «КБ «Южное» по двигателям на твердом топливе с регулируемой тягой. Показана принципиальная возможность создания таких двигателей и стабилизации их характеристик на различных режимах работы за счет системы регулирования площади критического сечения и выбора соответствующего алгоритма управления.

Розглянуто результати науково-дослідних і експериментальних робіт, які провело ДП «КБ «Південне» щодо двигунів на твердому паливі з регульованою тягою. Показано принципову можливість створення таких двигунів і стабілізації їх характеристик на різних режимах роботи за рахунок системи регулювання площі критичного перерізу та вибору відповідного алгоритму керування.

The paper considers the results of scientific research and experimental works performed by Yuzhnoye SDO on solid-propellant motors with controlled thrust. The possibility in principle is shown of creating such motors and stabilizing their characteristics in different operation modes due to the throat area regulation system and selection of relevant control algorithm.

Большинство маршевых ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) выполнены без регулирования расходно-тяговых характеристик. Однако в ряде случаев использование регулируемых двигателей становится технически целесообразным и необходимым. Так, например, подобные двигатели могут найти применение в последних ступенях ракет-носителей космических аппаратов, с помощью которых требуется запустить ряд спутников на разные орбиты или перевести спутник с одной орбиты на другую, либо в боевых ракетах с разделяющимися головными частями. В этих случаях от двигателя требуется форсированный режим работы для разгона (торможения) ступени и режим пониженной тяги для уменьшения влияния возмущений на отделяемый объект. Как правило, в таких случаях используют жидкостные ракетные двигатели, регулирование тяги которых осуществляется с помощью изменения расхода топлива.

В целях упрощения конструкции, повышения безопасности, улучшения эксплуатационных качеств могут быть применены и РДТТ. Актуальность работ по регулируемым двигателям на твердом топ-

ливе подтверждается публикациями [1, 2]. Основная техническая сложность при использовании РДТТ заключается в невозможности регулирования тяги за счет непосредственного изменения расхода топлива. Наиболее приемлемым способом регулирования тяги твердотопливного двигателя является изменение (регулирование) площади критического сечения сопла и, как следствие, изменение давления в камере сгорания (КС), скорости горения топлива и его расхода.

Недостатком этого способа является большой диапазон изменения внутрикамерного давления, на который накладываются ограничения по устойчивому горению заряда твердого топлива (работа на пониженном режиме тяги) и по массе конструкции двигателя (режим повышенной тяги).

При этом очень важное значение приобретает такой параметр топлива, как показатель степени в законе скорости горения v , с увеличением которого расширяется диапазон регулирования тяги при указанных выше ограничениях.

Для проведения теоретических и, главное, экспериментальных исследований ГП «КБ «Южное» провело научно-исследовательские работы по определению возмож-

ностей разработки двигателей с регулируемой тягой (ДРТ).

Конструктивная схема опытного двигателя для проведения этих работ была выбрана из условия применения промежуточного регулируемого критического сечения, обеспечивающего расходно-тяговые характеристики.

Как показал опыт отработки многосопловых двигателей, изменение площади критического сечения сопел, создающих тягу, ведет к существенным трудностям ее регулирования из-за следующих обстоятельств:

- неидентичных (от сопла к соплу) тепловых деформаций деталей клапанной группы;
- непрогнозируемой частичной зашлакованности критического сечения сопел;
- отклонения фактических площадей критических сечений от расчетных как из-за указанных выше факторов, так и из-за не поддающихся расчету изменений коэффициента расхода продуктов истечения;
- несинхронности работы рулевых машинок при многосопловой конструкции двигателя.

Для односопловых двигателей введение промежуточного критического сечения и камеры регулирования (рис. 1) позволяет обеспечить стабилизацию тяги на различных по уровню режимах работы за счет системы регулирования тяги с обратной связью по давлению.

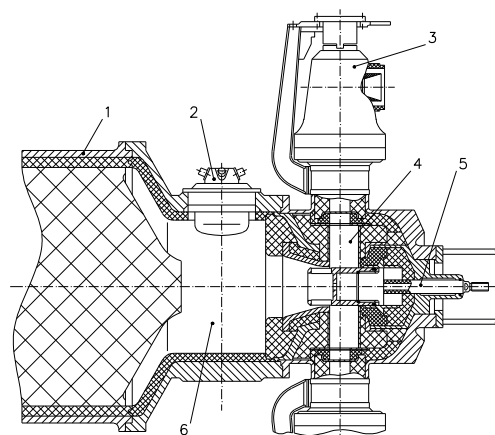


Рис. 1. Конструкция опытного ДРТ:
1 – снаряженный корпус; 2 – система запуска;

3 – сопловой блок; 4 – камера регулирования;
5 – клапан регулирования давления; 6 – камера сгорания

Как правило, из-за многочисленных переходов с одного режима на другой двигателя подобного типа имеют продолжительное время работы (более 100 с). В этих условиях вполне оправданным является применение заряда торцевого горения из низкотемпературного твердого топлива (НТТТ).

Научно-исследовательские работы по двигателю с регулируемой тягой проводились в два этапа.

Первый этап исследований (штатное топливо, регулирование без обратной связи)

На этом этапе работ были проведены анализ публикаций по проблеме устойчивости горения зарядов из НТТТ при малых давлениях, поиск топливных составов с высоким показателем ν , а также выполнена большая серия экспериментов на специальных модельных установках по определению характера зависимости скорости горения топлива в широком диапазоне давлений в КС $P_{кc}$. Было установлено, что при низком давлении в камере и при малом свободном объеме не исключено возникновение аномального режима работы двигателя вследствие появления низкочастотной неустойчивости (НЧН). При этом в качестве обобщающего параметра, определяющего наличие (отсутствие) НЧН, может быть принята характеристическая длина камеры сгорания

$$L^* = V_{св} / S_{пкc},$$

где $V_{св}$ – свободный объем КС; $S_{пкc}$ – площадь промежуточного критического сечения.

Лабораторные исследования соотношений между давлением в КС, при котором происходит гашение заряда, и значением параметра L^* позволили получить функци-

ональную зависимость $P_{кc}^{заш} = f(L^*)$, подтверждающую для класса НТТТ общую закономерность снижения порогового уровня $P_{кc}^{заш}$ с ростом параметра L^* (рис. 2).

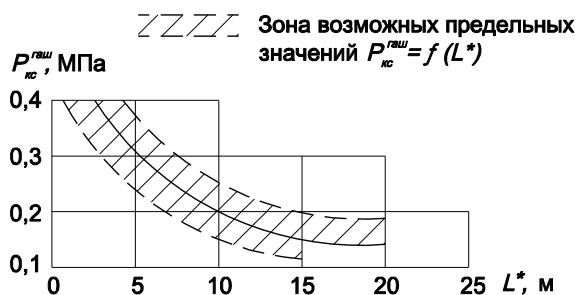


Рис. 2. Зависимость порогового уровня давления гашения от характеристической длины камеры сгорания

Анализ экспериментальных данных о характере изменения скорости горения НТТТ, обусловленном изменением параметра v в диапазоне $P_{кc}$ 0,5–5 МПа, свидетельствовал о существенной предрасположенности области малых значений $P_{кc}$ к появлению возможных аномалий.

В результате моделирования процесса резкого изменения $P_{кc}$ был определен диапазон критических градиентов $dP_{кc}/dt$, при котором происходит полное гашение образцов топлива,

$$dP_{кc}/dt = 500 - 200 \text{ МПа/с.}$$

В целом исследования на моделях позволили определить область устойчивого горения НТТТ, принятого для ДРТ, и сделать вывод, что их результаты не противоречат теоретическим представлениям о явлениях низкочастотной неустойчивости.

Затем были начаты испытания разработанной конструкции ДРТ (рис. 1).

В качестве топлива использовался состав НТТТ (показатель в законе скорости горения $v=0,4$), а регулирование промежуточного критического сечения в системе ДРТ + привод осуществлялось без применения специальной системы управления.

Площадь промежуточного критического сечения ДРТ регулировалась за счет переменных при движении штока клапана-регулятора давления (КРД) проходных сечений в заслонке клапана.

Анализ соответствия расчетных и экспериментальных значений давления в КС на максимальных и минимальных режимах показал, что расчетный уровень глубины дросселирования давления не был достигнут. Реализация соотношения

$$\frac{(P_{кc}^{\max} / P_{кc}^{\min})_{\text{факт}}}{(P_{кc}^{\max} / P_{кc}^{\min})_{\text{расч}}} \text{ не превышает } 0,6.$$

Причина заключалась в ошибке прогнозирования $P_{кc}^{\min}$ как из-за незнания закона скорости горения топлива в области низких давлений, так и из-за значительного отличия расчетного и фактического коэффициентов расхода при открытом КРД.

В связи с этим методика прогнозирования ожидаемого значения $P_{кc}^{\min}$ потребовала ввести в расчетную формулу поправочный коэффициент K_c соответствия величин $P_{кc}^{\min}$ и $P_{кc}^{\max}$:

$$P_{кc}^{\min} = P_{кc}^{\max} \left(\frac{S_{нкc}^{\min}}{S_{нкc}^{\max}} \right)^{\frac{1}{1-v}} \cdot \left(\frac{1}{K_c} \right)^{\frac{1}{1-v}}.$$

Для серии зачетных огневых стендовых испытаний среднее значение коэффициента соответствия при $v=0,4$ было получено равным 0,7.

По аналогичной причине не было достигнуто приемлемое согласование опытного значения степени регулирования пустотной тяги R_n^{\max} / R_n^{\min} с расчетным (ожидаемым) в соответствии с формулой

$$(R_n^{\max} / R_n^{\min})_{\text{ож}} = (P_{кc}^{\max} / P_{кc}^{\min})_{\text{факт}}^v.$$

Это расхождение, оцениваемое соотношением

$$K_{расч} = \left(\frac{R_n^{\max}}{R_n^{\min}} \right)^{факт} \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{P_{кc}^{\max}}{P_{кc}^{\min}} \right)^{\nu}} \right]^{факт},$$

получено в среднем на уровне $K_{расч}^{ср} = 0,9$.

С учетом этого было предложено оценку $\left(\frac{R_n^{\max}}{R_n^{\min}} \right)_{ож}$ проводить по формуле

$$\left(\frac{R_n^{\max}}{R_n^{\min}} \right)_{ож} = K_{расч}^{ср} \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{S_{нкс}^{\min}}{S_{нкс}^{\max}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} \cdot \left(\frac{1}{K_c} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}} \right]^{\nu}. \quad (1)$$

Расчеты с учетом экспериментальных данных показали, что оценка ожидаемой в условиях единичного пуска глубины регулирования пустотной тяги R_n по зависимости (1) может быть получена с ошибкой не более 5%.

Оценка стабильности расходно-тяговых характеристик двигателя на стационарном участке его работы показала, что и на максимальных, и на минимальных режимах тяга ДРТ с приемлемой точностью отслеживала характер изменения давления в камере сгорания $P_{кc}$. Несмотря на ограниченное число опытов и разброс экспериментальных данных, удалось установить не противоречащие теоретическим представлениям основные закономерности изменения параметров ДРТ, характеризующие переходные процессы: время τ_n и градиент $dP_{кc}/d\tau$ на участках подъема и спада давления. Была подтверждена однозначная зависимость τ_n и $dP_{кc}/d\tau$ от значения свободного объема КС, изменяемого по времени работы двигателя, а также установлено определенное влияние на τ_n глубины регулирования тяги (давления) –

время переходного процесса растет с увеличением $P_{кc}^{\max}/P_{кc}^{\min}$.

В целом результаты испытаний ДРТ на первом этапе исследований позволили установить следующее:

- регулирование расходно-тяговых характеристик можно осуществить путем изменения площади промежуточного критического сечения;
- максимальная глубина регулирования по тяге на уровне 2,3–2,6 (по давлению соответственно 10–10,5);
- конструкция разработанного опытного двигателя и прочно скрепленный с корпусом заряд работоспособны в условиях многократного изменения давления в камере сгорания от 0,2 до 5,0 МПа и с градиентами до 25 МПа/с.

Однако на этом этапе работы не удалось с использованием топлива с $\nu = 0,4$ достичь требуемой глубины регулирования расходно-тяговых характеристик двигателя (~5), а также обеспечить необходимый уровень их стабильности на стационарных и переходных участках работы.

В соответствии с этим целесообразно продолжение исследований ДРТ по следующим направлениям:

- доведение глубины регулирования по тяге R_n^{\max}/R_n^{\min} до 5–6 за счет применения топлива с $\nu > 0,4$;
- стабилизация тяги на заданных уровнях путем введения в систему регулирования обратной связи по давлению в КС и камере регулирования (КР);
- уменьшение значения забросов (провалов) тяги на переходных режимах путем соответствующего регулирования скорости перемещения штока КРД.

Второй этап исследований (специально разработанное топливо, регулирование с обратной связью)

Разработанная на ГП «КБ «Южное» система регулирования и стабилизации тяги (РСТ) включала в себя:

- элементы измерения параметров ДРТ – датчики давления (ДД), установленные в КС и КР;
- элементы усиления и преобразования сигналов от ДД;
- элемент, регулирующий алгоритм управления;
- исполнительный орган – гидропривод (ГП) КРД;
- датчик обратной связи (ДОС) по положению штока ГП КРД.

Система РСТ обеспечивала регулирование и стабилизацию задаваемых (программных) уровней тяги (давления в КР) в соответствии с алгоритмом, разработанным на основе уравнений сохранения массы, описывающих нестационарные газодинамические процессы в ДРТ.

Система дифференциальных уравнений первого порядка, положенная в основу принятой динамической схемы двигателя с промежуточным критическим сечением, имела следующий вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_{kc}}{d\tau} &= \frac{RT}{V_{kc}} (SU_1 \cdot P_{kc}^v \cdot \rho_m - A_{kc} \cdot P_{kc} \cdot S_{ПКС}), \\ \frac{dP_{кр}}{d\tau} &= \frac{RT}{V_{кр}} (A_{kc} \cdot P_{kc} \cdot S_{ПКС} - A_{кр} \cdot P_{кр} \cdot S_{кр}), \\ S_{ПКС} &= f(P_{kc}, P_{кр}), \quad A_{kc(кр)} = \mu_{kc(кр)} \cdot A_m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или в упрощенной форме записи:

$$dP_{kc}/d\tau = \kappa_1 \cdot P_{kc}^v - \kappa_2 \cdot S_{ПКС} \cdot P_{kc}; \quad (3)$$

$$R_n = \kappa_3 \cdot S_{ПКС} \cdot P_{kc}, \quad (4)$$

где $S_{ПКС}$ – площадь критического сечения камеры сгорания; A_m – термодинамический коэффициент истечения; S – площадь поверхности горения; μ – коэффициент расхода; $kc, кр$ – индексы принадлежности параметров к КС и КР соответ-

ственно; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – коэффициенты, с помощью которых в уравнениях (3), (4) учитываются изменения в процессе работы ДРТ свободного объема КС, поверхности горения заряда, отклонения от номинальных значений параметров НТТТ и фактической площади критического сечения КРД (т. е. промежуточного критического сечения ДРТ).

Применительно к установившимся стационарным участкам (режим тяги R_n^{\max} , R_n^{\min}), когда выполняется условие $dP_{kc}/d\tau = 0$, система уравнений (3) и (4) была преобразована к виду

$$P_{kc} = \left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2 \cdot S_{ПКС}} \right)^{\frac{1}{1-v}};$$

$$R_n = \frac{\kappa_1 \cdot \kappa_3}{\kappa_2} P_{kc}^v.$$

Так как в реальных условиях значения P_{kc} и R_n в зависимостях $P_{kc} = f(S_{ПКС})$ и $R_n = f(P_{kc})$ располагаются в определенной зоне («трубке») (рис. 4), то поддержание на заданном уровне только P_{kc} не решало задачу стабилизации тяги. Необходимо было введение в контур регулирования обратной связи по давлению в камере регулирования $P_{кр}$.

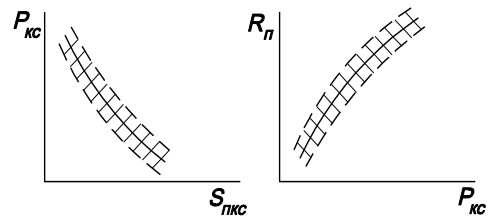


Рис. 3. Вид зависимостей $P_{kc} = f(S_{ПКС})$ и $R_n = f(P_{kc})$

Еще одна проблема была связана с работой системы РСТ на переходных режимах, когда при резком увеличении или уменьшении площади промежуточного критического сечения $S_{ПКС}$ имеет место кратковременный неадекватный в динами-

ке характер изменения давления в КС и тяги (рис. 4).

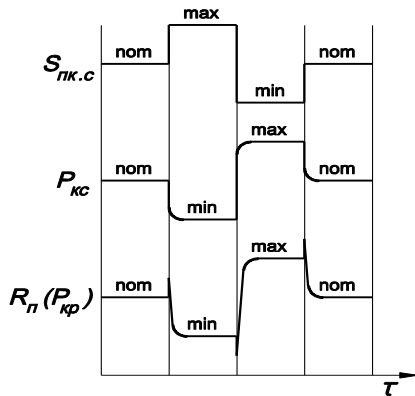


Рис. 4. Типичный характер изменения давления в КС и тяги за счет регулирования площади промежуточного критического сечения

Проведенные ГП «КБ «Южное» исследования показали, что этот фактор приводит к появлению положительных обратных связей в камере регулирования и, как следствие, к его неустойчивости. Решение было найдено путем замены в законе управления ошибки регулирования тяги интегралом этой ошибки.

Задача выбора коэффициентов усиления в системе РСТ решалась математическим моделированием функционирования ДРТ, что позволило принять алгоритм управления в виде:

$$h^* = f(S_{ПКС});$$

$$S_{ПКС} = S_{ПКС}^{np}(\tau) + \kappa_D \Delta P_{КС} + \kappa_I \int_0^\tau \Delta P_{кр} d\tau,$$

где h^* – командный сигнал на сервопривод (ГП КРД); $f(S_{ПКС})$ – зависимость хода штока КРД от требуемой площади $S_{ПКС}$; $\Delta P_{КС}(\tau) = P_{КС}(\tau) - P_{КС}^{np}(\tau)$; $\Delta P_{кр}(\tau) = P_{кр}(\tau) - P_{кр}^{np}(\tau)$ – отклонения текущих значений давления КС и КР от их программных значений.

Расчетно-теоретические исследования и моделирование процессов в ДРТ с системой РСТ позволили принять в окончатель-

ном виде структурную схему системы регулирования-стабилизации тяги (рис. 5).

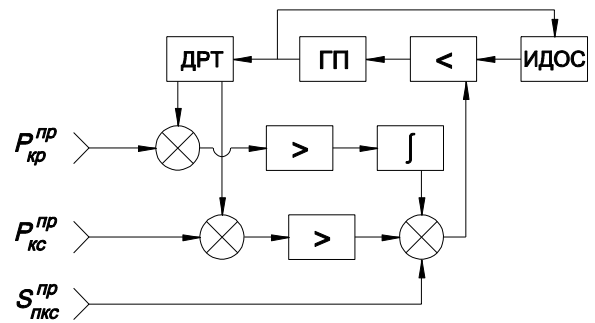


Рис. 5. Структурная схема систем РСТ: \otimes – сумматор; $>$ – усилитель; \int – интегратор; ИДОС – индукционный датчик обратной связи

Продолжились исследования по двигателям с регулируемой тягой после разработки топлива со степенным показателем в законе скорости горения $\nu=0,7$. С использованием функции относительного давления в двигателе-аналоге, пересчитанного с учетом $\nu=0,7$ для нового состава по соотношению

$$\Psi_{P_{КС}} = \left(\Psi_{P_{КС}}^{um} \right)^{\frac{1-\nu_{um}}{1-\nu_{КС}}},$$

были учтены пределы изменения площади $S_{ПКС}$.

С учетом выполнения $\dot{m}_{КС} = \text{const}$ давление $P_{КС}$ определялось из формулы

$$P_{кр} = P_{КС} (A\mu)_{КС} \cdot S_{ПКС} / (A\mu)_{кр} \cdot S_{кр}.$$

Проверка по соотношению

$$P_{кр} / P_{КС} < \pi \lambda_{кр} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

подтвердила наличие в КРД критического режима истечения. В предположении такого режима и были получены коэффициенты расхода КРД.

Учет особенностей работы ДРТ с повышенным значением ν , т. е. с большей чувствительностью параметров в КС и КР к изменению площади $S_{ПКС}$, привел к необходимости снижения допустимых коэффициентов усиления в алгоритме систе-

мы РСТ. Анализ полученных в результате линеаризации уравнений (2) и (3) передаточных функций ДРТ, характеризующих его динамические свойства, показал, что увеличение ν приводит к росту статических коэффициентов передачи двигателя по давлению в КС и по приращению тяги, а также постоянных времени работы двигателя. Это, в свою очередь, потребовало для сохранения динамических свойств ДРТ с системой РСТ соответствующего уменьшения коэффициентов алгоритмического управления примерно в 3-4 раза по сравнению с их значением при $\nu=0,4$.

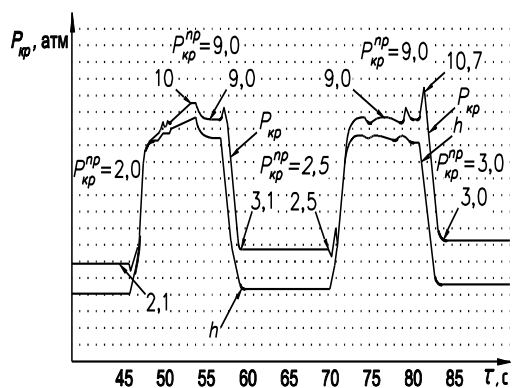


Рис. 6. Экспериментальная зависимость давления в камере регулирования $P_{кр}$ и хода штока клапана регулирования $h = f(S_{ПКС})$ по времени (фрагмент, топливо с $\nu=0,7$)

Заключительные испытания ДРТ с системой РСТ и топливом нового состава $\nu=0,7$ позволили получить дополнительные экспериментальные данные (рис. 6), подтвердившие с учетом результатов исследований на предыдущем этапе:

- принципиальную возможность создания РДТТ с регулируемой тягой за счет изменения площади промежуточного критического сечения;

- справедливость и достоверность описания нестационарных газодинамических процессов в ДРТ предложенной (на основе принципа сохранения массы) системой дифференциальных уравнений;

- возможность стабилизации тяги двигателя на различных по уровню стационарных режимах его работы с достаточно

высокой точностью ($<3\%$) за счет применения системы РСТ с обратной связью по давлению в КС и КР и выбора алгоритма управления с соответствующими коэффициентами усиления;

- достижение глубины регулирования тяги $\sim 2,5$ на составе НТТТ ($\nu=0,4$) и ~ 5 при использовании специально разработанной рецептуры ($\nu=0,7$).

Вывод

Учитывая тенденции развития твердотопливного двигателестроения и положительные результаты экспериментальных работ ГП «КБ «Южное» по ДРТ целесообразно проведение теоретических и экспериментальных исследований в части создания РДТТ с регулируемой тягой.

Список использованной литературы

1. Петренко В. И., Соколовский М. И. и др. Управление энергетическими установками на твердом топливе. – М.: Машиностроение, 2003. – 463 с.
2. Пресняков В. Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1984. – 248 с.
3. Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Физматлит, 1967. – 368 с.

Статья поступила 20.06.2017