

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ВХОДНЫХ ДАВЛЕНИЙ НА ТЯГУ И СООТНОШЕНИЕ РАСХОДОВ КОМПОНЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ ЖРД НА НИЗКИХ РЕЖИМАХ

ОАО "НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко":
Анатолий Иванович Колбасенков, начальник сектора, к.т.н.
Пётр Сергеевич Лёвочкин, заместитель главного конструктора по науке, к.т.н.
Дмитрий Сергеевич Пушкарёв, инженер-конструктор
Вадим Ильич Семёнов, заместитель главного конструктора по ЖРД, д.т.н.
Елена Николаевна Сёмина, ведущий инженер-конструктор, к.т.н.
Игорь Григорьевич Стороженко, ведущий инженер-конструктор, к.т.н.

Испытания двигателя показали существенное влияние значений входных давлений компонентов на их массовое соотношение расходов при работе на низких режимах. Возможность "парирования" влияния входных давлений компонентов топлива подтверждена проведенными испытаниями.

Engine test showed a significant effect of input pressures of components on their mass flow ratio when LRE working on low mode. Opportunity to "parry" influence of input pressures of components is confirmed by the tests.

Ключевые слова: ЖРД, входные давления, управление, регулирование.

Keywords: LRE, input pressure, control, regulation.

Работа двигателя, устанавливаемого на центральном блоке перспективной ракеты-носителя (РН), характеризуется тем, что при старте РН данный двигатель выводится (одновременно с двигателями боковых ступеней) на режим 100 % номинальной тяги, а через некоторое время переводится на режим 30 % номинальной тяги при тяге боковых ступеней 100 %. Режим 30 % сохраняется в течение всего времени работы боковых ступеней. После отстыковки этих ступеней двигатель центрального блока форсируется до уровня 100 % номинальной тяги. Подобный режим полета РН позволяет существенно (до 15 %) увеличить выводимую полезную нагрузку.

При работе двигателя центрального блока на режиме дросселирования происходит существенно меньшая выработка компонентов из центрального блока (по сравнению с боковыми ступенями), при непрерывно возрастающем ускорении РН, что приводит к росту давлений компонентов на входе в двигатель. На рисунке 1 представлены расчетные зависимости изменения давлений на входе по линиям окислителя (жидкий кислород) и горючего (керосин) в процессе работы двигателя центрального блока на режиме 30 %.



Рис. 1. Прогноз изменения входных давлений компонентов на входе в двигатель на режиме 30 %

Видно, что в течение ~155 с давления окислителя и горючего на входе в двигатель монотонно возрастают соответственно от ~4,5 кгс/см² и ~2,7 кгс/см² до ~9,8 кгс/см² и ~3,7 кгс/см² и далее (при переводе работы двигателей боковых ступеней на пониженный режим тяги перед отстыковкой) снижаются до исходных значений.

При отработке предшествующих двигателей, работающих на тех же компонентах в диапазоне изменения режимов по тяге 100...50 % было установлено крайне низкое влияние входных давлений компонентов на точность поддержания требуемых значений тяги R и соотношения расхода компонентов Km .

Разработанные алгоритмы регулирования двигателя не учитывали влияние такого внешнего фактора как давления компо-

нентов на входе в двигатель. Однако отмеченный выше большой диапазон изменения данных давлений (особенно по линии окислителя) и низкая напорность насосных ступеней на низком режиме требуют проведения исследований по возможному учету влияния входных давлений компонентов на R и Km в алгоритме регулирования двигателя.

Для исследования влияния входных давлений компонентов на R и Km в ОАО "НПО Энергомаш" были проведены экспериментальные испытания. Испытания двигателей проводились при номинальных и повышенных давлениях на низких режимах по тяге. На одном из испытаний на режиме 27 % (~70 с) было обеспечено значение тяги $R = 28,5 \%$ и соотношения компонентов $Km = 2,7$. После 80 с в течение ~30 с в соответствии с рис. 3 последовательно увеличивалось входное давление окислителя с величины 3,2 кгс/см² до 8,6 кгс/см². Рост входного давления окислителя сопровождался монотонным ростом значения R до 29 % и Km до 2,9 (рис. 2). На 140 секунде вводилась поправка кода команд, выдаваемых на привод дросселя, необходимая для возвращения значения Km к номинальной величине. После 150 с в течение ~20 с в соответствии с рис. 3 последовательно увеличивалось

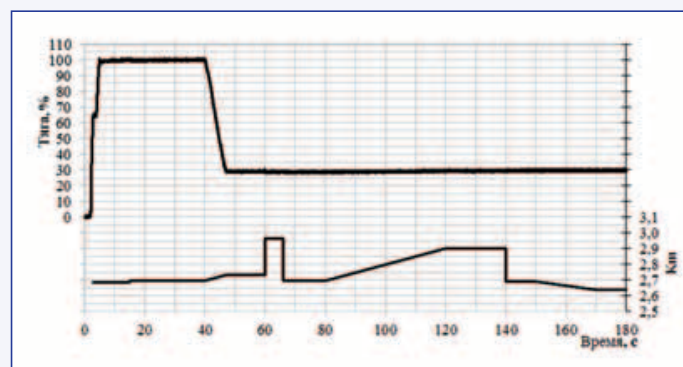


Рис. 2. Профиль изменения тяги и соотношения компонентов



Рис. 3. График изменения входных давлений компонентов

входное давление горючего с величины 1,6 кгс/см² до 4кгс/см². Рост входного давления горючего сопровождался монотонным снижением значения *Km* с величины 2,7 до 2,64.

Изменение таких параметров как тяга и соотношение компонентов топлива в зависимости от изменения входного давления окислителя ($\Delta p_{вх.о}$) и горючего ($\Delta p_{вх.г}$) могут быть представлены уравнениями

$$\Delta R_p = \frac{\partial R}{\partial p_{вх.о}} \Delta p_{вх.о} + \frac{\partial R}{\partial p_{вх.г}} \Delta p_{вх.г},$$

$$\Delta Km_p = \frac{\partial Km}{\partial p_{вх.о}} \Delta p_{вх.о} + \frac{\partial Km}{\partial p_{вх.г}} \Delta p_{вх.г}.$$

На двигателе проводится испытание, с изменяемыми входными давлениями компонентов топлива. По результатам испытаний на каждом из режимов определяются значения

$$\frac{\partial R}{\partial p_{вх.о}}, \frac{\partial R}{\partial p_{вх.г}}, \frac{\partial Km}{\partial p_{вх.о}}, \frac{\partial Km}{\partial p_{вх.г}}.$$

Данные для расчета поправки по входным давлениям компонентов, полученные в результате проведения двух испытаний на разных двигателях, сведены в таблицу 1 (для окислителя) и таблицу 2 (для горючего):

Таблица 1

Параметры для определения коэффициентов влияния входного давления окислителя на тягу и соотношение компонентов топлива						
№ испытания	R (1)	R (2)	Km (1)	Km (2)	$p_{вх.о} (1),$ кг/см ²	$p_{вх.о} (2),$ кг/см ²
1	0,027	0,028	2,816	3,079	3,361	8,305
2	0,028	0,028	2,715	2,997	3,378	8,477

Таблица 2

Параметры для определения коэффициентов влияния входного давления горючего на тягу и соотношение компонентов топлива						
№ испытания	R (1)	R (2)	Km (1)	Km (2)	$p_{вх.г} (1),$ кг/см ²	$p_{вх.г} (2),$ кг/см ²
1	0,028	0,028	2,856	2,806	1,707	3,810
2	0,029	0,029	2,748	2,685	1,933	3,893

В соответствии с проведенным расчетом, были найдены и осреднены (по результатам двух испытаний) коэффициенты, учитывающие влияние входных давлений компонентов на тягу и соотношение компонентов топлива

$$\frac{\partial R}{\partial p_{вх.о}} = 0,00015; \quad \frac{\partial R}{\partial p_{вх.г}} = -0,00003;$$

$$\frac{\partial Km}{\partial p_{вх.о}} = 0,054; \quad \frac{\partial Km}{\partial p_{вх.г}} = -0,028.$$

Для подтверждения полученных данных был проведен эксперимент по "парированию" влияния входных давлений компонен-

тов на тягу и соотношение компонентов. При входном давлении окислителя 3,5 кгс/см² на режиме 27 % по тяге были обеспечены значения *R* = 27,3 % и *Km* = 2,8. С 80 секунды увеличивалось входное давление окислителя на данном режиме до 8,35 кгс/см², рост давления сопровождался ростом значения тяги и соотношения компонентов до величины *R* = 28 % и *Km* = 3,079 соответственно. Со 140 секунды учитывалась поправка для "парирования" влияния входных давлений, полученная экспериментальным методом. Со 150 секунды увеличивалось входное давление горючего с величины 1,7 кгс/см² до 3,8 кгс/см², что было учтено поправкой. В конце участка роста входных давлений компонентов значение *Km* = 2,8, что и было реализовано первоначально на 80 секунде (рис. 4, 5).

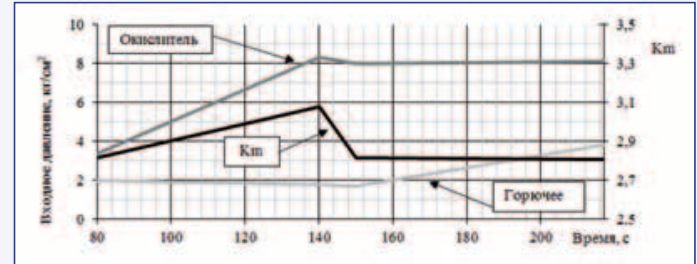


Рис. 4. График изменения входных давлений и соотношения компонентов топлива с учетом поправки по входным давлениям компонентов

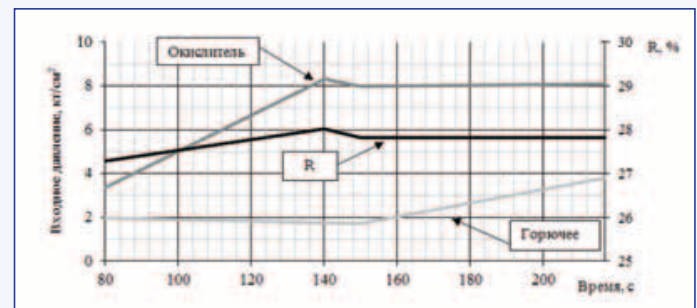


Рис. 5. График изменения входных давлений и тяги с учетом поправки по входным давлениям компонентов

Выводы

1. Выявлено существенное влияние давлений компонентов на входе в двигатель при его работе на низких режимах (*R* < 30 %).
2. Определены коэффициенты влияния величин входных давлений компонентов на изменение соотношения компонентов *Km* при работе на низких режимах.
3. Экспериментальным путем подтверждена возможность "парирования" влияния входных давлений компонентов на тягу и соотношение компонентов двигателя.

Связь с автором: e-mail: pushcarev@hotmail.com

ИНФОРМАЦИЯ: Самый мощный ускоритель NVIDIA

NVIDIA представила графический процессор NVIDIA® Tesla® K40 - самый мощный в мире ускоритель из когда-либо созданных, который обеспечивает экстремальную производительность в широком спектре научных, инженерных, корпоративных и HPC-приложений.

Tesla K40 обладает вдвое большим объемом памяти и на 40 % быстрее предшественника Tesla K20X, а также в 10 раз быстрее самого мощного на сегодня CPU, являясь первым в мире и самым мощным ускорителем, оптимизированным для анализа больших объемов данных и масштабных научных исследований.

"GPU-ускорители уже массово применяются для супервычислительных и HPC-задач,

позволяя инженерам и ученым быстро получать новые результаты и совершать научные открытия, - сказал Сумит Гупта (Sumit Gupta), директор направления Tesla Accelerated Computing в NVIDIA. - С передовой производительностью и увеличенным объемом памяти процессора Tesla K40 компании могут быстро обрабатывать огромные массивы данных, генерируемых приложениями для анализа Big Data".

Графический процессор Tesla K40, основанный на архитектуре NVIDIA Kepler™ - самой мощной и эффективной архитектуре в мире - превосходит все существующие ускорители по двум основным показателям вычислительной производительности: 4,29 терафлопс в вычислениях с одинарной точ-

ностью и 1,43 терафлопс в вычислениях с двойной точностью.

Ключевые особенности ускорителя Tesla K40:

- 12 Гб скоростной памяти GDDR5 для обработки вдвое больших объемов данных и их быстрого анализа;
- 2880 параллельных ядер CUDA® обеспечивают ускорение работы приложений до 10 раз по сравнению с CPU;
- динамический параллелизм позволяет GPU-потокам создавать новые потоки для быстрой и легкой работы с адаптивными и динамическими структурами данных;
- поддержка интерфейса PCIe 3-го поколения ускоряет передачу данных вдвое по сравнению с PCIe 2.