

## РЕГУЛИРУЕМЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ С МЕСТНЫМ ФОРСИРОВАНИЕМ ГОРЕНИЯ

УДК 629.7.036.5

В. И. Петренко, В. Л. Попов

Пермский государственный технический университет,  
614600 Пермь

*Обоснована принципиальная схема и разработана конструкция регулируемого ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) с местным форсированием горения посредством каталитической решетки (теплового ножа). Выбрана рациональная конструкция теплового ножа, обеспечивающая приемлемые статические и динамические характеристики РДТТ. Проведены экспериментальные исследования двигателя. Подтверждена реализуемость и удовлетворительные характеристики регулируемого РДТТ с тепловым ножом на смесевом безметальном топливе.*

В последние три десятилетия прослеживается устойчивая тенденция в направлении создания ракетных двигателей на твердом топливе, позволяющих регулировать модуль тяги [1–5]. В прогнозах на 21-й век предполагается, что эта тенденция сохранится [6].

Регулирование модуля тяги РДТТ (расхода газогенератора) позволяет более экономично использовать твердое топливо и делает ракетную систему более мобильной.

Для регулирования модуля тяги РДТТ могут быть использованы различные физические принципы [2]. Варьирование площади критического сечения сопла при приемлемых параметрах двигателя позволяет достичь глубины регулирования тяги  $P = P_{\max}/F_{\min} \approx 10$ . За счет изменения поверхности и скорости горения заряда посредством местного форсирования горения и одновременно за счет изменения площади критического сечения сопла глубину регулирования тяги можно увеличить до 100.

Местное форсирование горения твердого топлива осуществляется различными способами. По мнению авторов, применение с этой целью каталитической решетки (теплового ножа), прижимаемой с помощью сервопривода к горячей поверхности заряда — способ, наиболее близкий к реализациям в штатных конструкциях.

Регулирование газоприхода с помощью теплового ножа основано на создании местных повышенных скоростей горения. Этот способ удобен в конструкции заряда торцевого горения (рис. 1). Тепловой нож представляет собой пластинчатую или игольчатую конструкцию, выполненную из жаропрочных материалов (рис. 2).

Учитывая отрывочность сведений о результатах экспериментальных исследований схемы регулируемого РДТТ с тепловым ножом, авторы ставили целью показать особенности работы и практические возможности двигателя такой схемы.

При определении рациональной конструкции теплового ножа исходили из условия выполнения требований по ограничению времени переходных процессов, прочности, тепловой стойкости, технологичности изготовления и массы теплового ножа. Минимальные времена

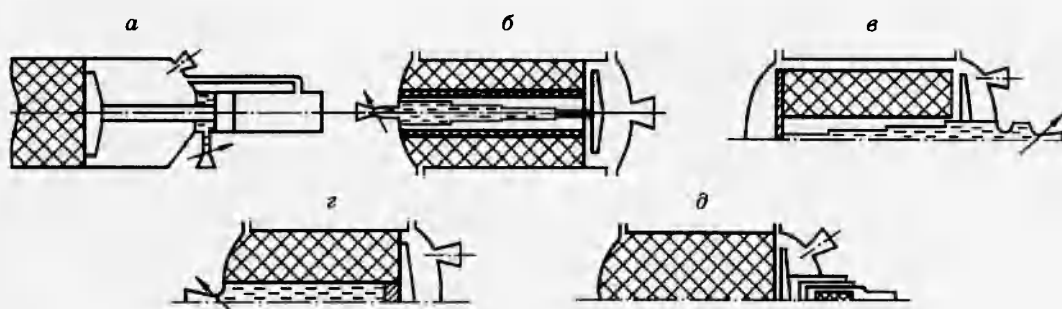


Рис. 1. Конструктивные схемы РДТТ с местным форсированием горения посредством применения теплового ножа:

*а* — с внешним расположением гидропривода, *б* — с внутренним расположением гидропривода, *в* — с подвижным зарядом, *г* — с бескорпусным гидроприводом, *д* — с пиротехническим приводом

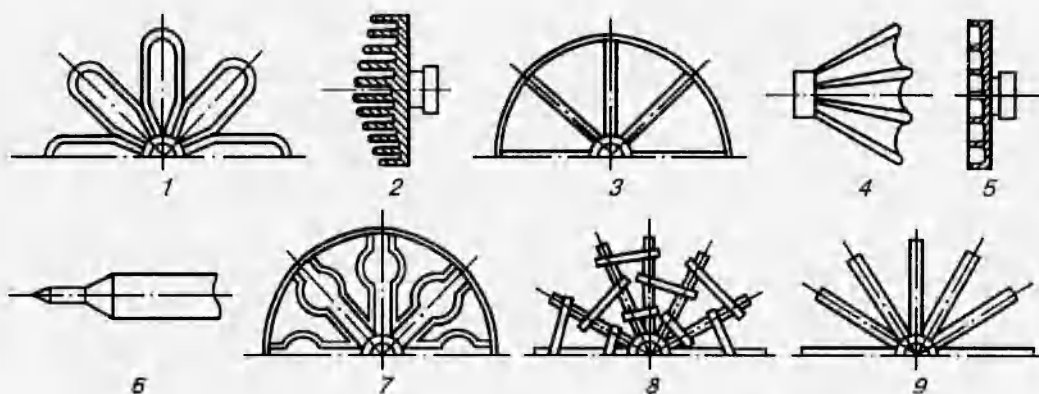


Рис. 2. Формы тепловых ножей:

1 — «ромашка», 2 — «щетка», 3 — «колесо», 4 — угловой радиальный, 5 — кольцевой; 6 — «игла», 7 — фигурный, 8 — «снежинка», 9 — лучевой

переходных процессов обеспечивает конструкция, имеющая форму «снежинки» (см. рис. 2), однако нож такой конфигурации не отвечает требованию технологичности. Удовлетворительные показатели по характеристикам переходных процессов, прочности, тепловой стойкости и технологичности конструкции обеспечивают тепловые ножи лучевой формы (см. рис. 2, вариант 8), изготавливаемые из молибденовых сплавов методами порошковой металлургии. Молибден, взаимодействуя с продуктами сгорания твердого топлива, образует тугоплавкие соединения. Поэтому его сплавы могут быть использованы для изготовления элементов теплового ножа без нанесения защитных покрытий.

С целью уменьшения массы элементы конструкции теплового ножа можно изготавливать из углерод-углеродных композиционных материалов. Для увеличения теплопроводности и термоэрозионной стойкости на поверхность ножа следует наносить слой тугоплавкого материала, например вольфрама.

Привод теплового ножа может быть обеспечен пневматическим или гидравлическим способом, причем источником высокого давления могут быть продукты сгорания, отбираемые из камеры двигателя. Гидравлический способ наиболее прост и работает по принципу

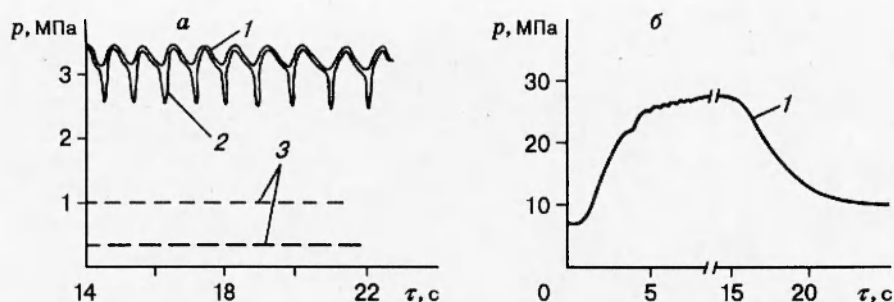


Рис. 3. Изменение рабочих параметров в регулируемом РДТТ с тепловым ножом на квазистационарном (а) и переходном (б) участках работы:

1 — давление в камере сгорания, 2 — давление жидкости в гидроприводе, 3 — сигналы на включение клапанов слива

регулирования расхода стравливаемой из гидроцилиндров жидкости. По отношению к заряду твердого топлива гидропривод может быть внешним (см. рис. 1, а) или внутренним (рис. 1, б). В последнем случае гидропривод выполняется телескопическим и размещается в бронированном канале заряда. Бронирующее покрытие в процессе форсированного горения заряда разрезается пластинами теплового ножа. При такой схеме возникает необходимость тепловой защиты гидроцилиндров с наружной поверхности от воздействия высокотемпературных продуктов сгорания твердого топлива.

Проведены эксперименты на модельных установках и опытных образцах регулируемых РДТТ с тепловым ножом как с внешним, так и внутренним расположением гидроприводов при максимальных расходах продуктов сгорания  $\approx 1$  кг/с. Реализованы различные алгоритмы управления внутрикамерными процессами — от релейного до адаптивного. Опробовано комбинированное регулирование, т. е. в зависимости от поверхности горения за счет воздействия теплового ножа изменялась площадь критического сечения сопла. Во время квазистационарных работ РДТТ с тепловым ножом стабилизация внутрикамерного давления по времени может быть осуществлена с точностью  $\pm 2,2\%$  (рис. 3, а), время переходных процессов в практически значимых случаях не превышало 3–5 с (рис. 3, б).

Для характеристики степени форсирования вводится коэффициент  $n = U/U_0$ , где  $U_0$  — скорость стационарного горения. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4. Зная зависимость  $u(\tau)$ , можно, решая обратную задачу внутренней баллистики, определить зависимость  $S(\tau)$ , где  $S$  — поверхность горения (рис. 5).

В связи с тем, что коэффициент форсирования — одна из основных характеристик регулируемого РДТТ с тепловым ножом, принципиально важно знать взаимосвязь между  $n$  и давлением поджатия ножа  $p_*$ . На основании этой зависимости определяется требуемая мощность привода, прочность элементов конструкции ножа и потенциальные возможности двигателя по глубине регулирования. Зависимость  $n(p_*)$  индивидуальна для различных марок топлив, конструкций ножа и определяется опытным путем. Из рис. 6 следует, что максимальное значение коэффициента форсирования для жестких топлив  $n < 4$ .

В опытных образцах при проведении испытаний с использованием высокоэластичных смесевых безметалльных топлив наблюдались случаи, когда  $n = 8 \div 10$ . Проведенный анализ показал, что форсирование в данном случае осуществляется не только за счет передачи дополнительного тепла от пластин ножа к топливу, а в основном за счет механического

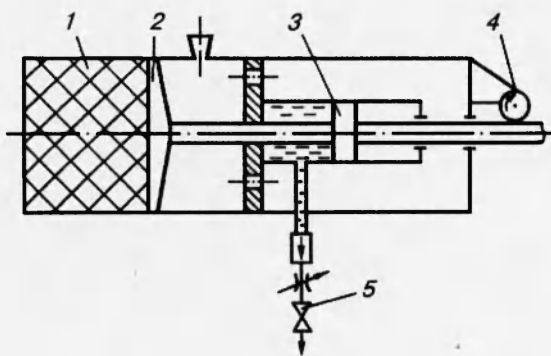


Рис. 4

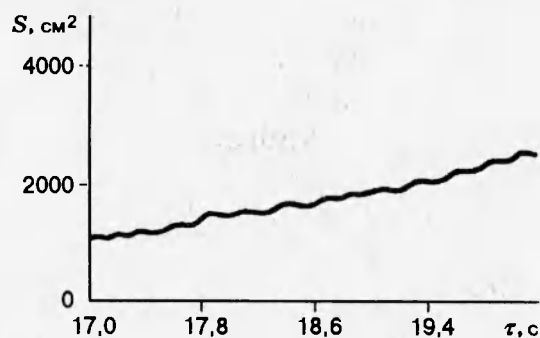


Рис. 5

Рис. 4. Схема экспериментальной установки для замера местной повышенной скорости горения:

1 — заряд, 2 — тепловой нож, 3 — шток с поршнем, 4 — датчик перемещения, 5 — клапан слива жидкости из гидроцилиндра

Рис. 5. Расчетно-экспериментальная зависимость изменения поверхности горения от времени

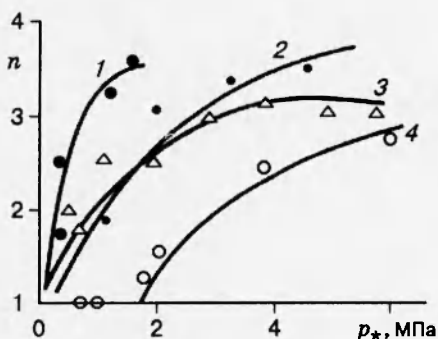


Рис. 6. Экспериментальные зависимости коэффициента форсирования от давления поджатия теплового ножа для баллиститных топлив (1-3) и смешового безметалльного топлива (4):

1 — 2260, 2 — 1600, 3 — 1497, 4 — 1350 К; символам соответствуют расчетные данные

«раздвигания» топлива пластинами теплового ножа. Физика данного явления рассмотрена в работах [7, 8].

Таким образом, комплексные экспериментальные исследования показали возможность практической реализации высокоэффективного регулируемого РДТТ с местным форсированием горения посредством применения теплового ножа с гидравлическим приводом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобылев В. М. Ракетный двигатель твердого топлива как средство управления движением ракет. М.: Машиностроение, 1992.
2. Петренко В. И., Попов В. Л., Русак А. М., Феофилактов В. И. РДТТ с регулируемым модулем тяги. Миасс.: Изд-во Государственного ракетного центра «КБ имени академика В. П. Макеева», 1994.
3. Макдональд А. Д. РДТТ с многократным запуском и регулированием величины тяги // Вопр. ракет. техн. 1973. № 2. С. 32-50.

4. **Русак А. М.** Статические характеристики газогенераторов с регулируемой поверхностью горения // Изв. вузов. Авиац. техника. 1988. №4. С. 73–77.
5. **Buschulte W.** Zur Schubregelung von Feststoffraketen — betribwerken // Z. Flugwissenschaften und Weltraumforschung. 1977. Bd 1. H. 5. S. 358–364.
6. **Chambers E., Andrews W., Wills W.** Solid rocket technologies for the 21st century // Aerosp. Amer. 1990. N 7. P. 44–47.
7. **Барсуков В. Д., Гусаченко Л. К.** Скорость внедрения горячего предмета в аморфный материал // Методы и алгоритмы параметрического анализа линейных и нелинейных моделей переноса: Сб. науч. тр. 1993. Вып. 8. Ч. 1. С. 10–16.
8. **Уилкинсон У. Л.** Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964.

*Поступила в редакцию 16/XI 1995 г.*

---