

*Барышев С.А.,
энергетик сборочно-сварочного цеха (222)
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»
Россия, г. Химки*

АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГИ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

***Аннотация:** в данной статье представлен анализ основных способов регулирования тяги для жидкостных ракетных двигателей большой тяги: изменение мощности турбины и напора с помощью различных регулирующих устройств в системе питания, и регулирование перепада давления на форсунках в камерах сгорания. Приведено описание регуляторов расхода, дроссельных заслонок, кавитирующих трубок Вентури с переменным сечением, штифтовых форсунок, объясняются принципы работы некоторых из них. В качестве примеров приводятся успешные дросселируемые двигатели, разработанные в стране и за рубежом.*

***Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, тяга, регулятор расхода, дроссельная заслонка, кавитирующие трубки Вентури, штифтовая форсунка, ракетостроение.*

***Annotation:** this article analyzes the main ways of thrust control for large thrust liquid-propellant rocket engines: changing the turbine power and pressure by means of various regulating devices in the power system, and regulating the differential pressure on the nozzles in the combustion chambers. Flow regulators, throttle valves, cavitating Venturi tubes with variable cross-section, and pintle injectors are described, and the principles of operating some of them are explained. Successful throttle engines developed in the country and abroad are presented as examples.*

Key words: liquid rocket engine, thrust, flow regulator, throttle valve, cavitating Venturi tubes, pintle injector, rocket science.

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) большой тяги топливо сжигается в камере сгорания ракеты [1, с. 1], при этом энергия, выделяемая при сгорании топлива, должна удерживаться внутри камеры сгорания, а впоследствии направляться в сопло для создания тяги [2, с. 31]. Тяга ЖРД представляет собой равнодействующую реактивной силы двигателя и сил давления окружающей среды, действующих на его внешние поверхности, за исключением сил внешнего аэродинамического сопротивления [3].

Скорость потока зависит от характеристик топлива, удельной теплоёмкости, степени давления в сопле, и площади горловины сопла. При этом влияние характеристик топлива, удельной теплоёмкости и степени давления в сопле на тягу незначительно, а технология регулирования тяги за счёт изменения площади горловины сопла обычно используется в твердотопливных ракетных двигателях, и для ЖРД является трудно выполнимой. На практике наиболее эффективным способом регулирования тяги ЖРД является изменение массового расхода топлива, в связи с чем процесс дросселирования синонимичен регулированию тяги.

Как правило, существует два способа регулирования тяги: изменение мощности турбины и напора с помощью различных регулирующих устройств в системе питания, или регулирование перепада давления на форсунках в камерах сгорания. Типичными регулируемыми устройствами для управления скоростью потока являются дроссельные заслонки, кавитирующие трубки Вентури с переменным сечением и регуляторы расхода [4, с. 15]. В большинстве регулирующих устройств скорость потока регулируется путём изменения площади потока для повышения точности и линейности регулирования. Трубки Вентури чаще используются в двигателях малой тяги, а в двигателях большой тяги, ввиду простоты использования, – дроссельные

заслонки. Существенным недостатком является то, что при их использовании на скорость потока могут влиять условия внешней среды, следовательно, для достижения точного управления тягой рекомендовано их использование вместе с системами управления с обратной связью. По сравнению с дроссельной заслонкой, регулятор расхода представляет собой устройство, которое может автоматически стабилизировать расход в зависимости от колебаний давления без какого-либо активного управления. В отечественных двигателях широкое распространение получила комбинация самостабилизирующихся регуляторов расхода и систем управления с обратной связью, в то время как зарубежные двигатели чаще используют сочетание дроссельных заслонок и систем управления с обратной связью.

На рисунке 1 представлен стандартный регулятор расхода, применяющийся в большинстве ракетных двигателей:

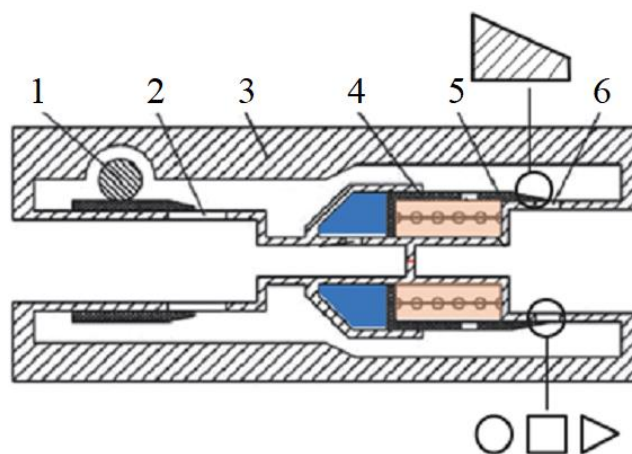


Рисунок 1. Регулятор расхода: 1 – регулировочный механизм; 2 – дроссель; 3 – корпус регулятора; 4 – пружина; 5 – ползунок; 6 – дроссельная заслонка [4, с. 16], прим.: перевод автора

Принцип работы устройства заключается в следующем: расход регулируется изменением площади дросселя, которая, в свою очередь, контролируется с помощью регулировочного механизма. Ползунок может реагировать на перепад давления и усилие пружины, ввиду чего площадь

дроссельной заслонки регулируется автоматически. Таким образом, на расчётном уровне можно стабилизировать расход на выходе.

Особого внимания заслуживают две важные особенности регулятора расхода, способствующие успешному управлению тягой: (1) в зависимости от угла наклона исполнительного устройства скорость потока изменяется линейно, (2) а также может поддерживаться на постоянном уровне с точным значением в широком диапазоне перепадов давления. Первая особенность способствует достижению простоты и эффективности системы регулирования, а вторая обеспечивает более стабильную работу двигателя в широком диапазоне уровней тяги.

Регуляторы расхода успешно применяются в некоторых всемирно известных двигателях, таких как РД-180 и РД-0120. В данных двигателях регуляторы расхода установлены на линии подачи топлива в газогенератор с наименьшим расходом, а именно на линии подачи топлива в газогенератор с высоким уровнем окислителя, или на линии подачи окислителя в газогенератор с высоким уровнем топлива [5, с. 3].

Ещё одним способом контроля уровня тяги является применение регулируемых штифтовых форсунок в камерах сгорания. Как известно, перепад давления в форсунке имеет решающее значение для эффективного распыления, смешивания и сгорания топлива в камерах сгорания. Достаточность перепада давления измеряется жёсткостью, значение которой, чтобы предотвратить нестабильность сжигания топлива, должно поддерживаться на уровне выше 5% [4, с. 16]. В газовых форсунках жёсткость не зависит от скорости потока, а в жидкостных жёсткость и скорость потока прямо пропорциональны. Следовательно, когда тяга снизится до 50%, форсунка с жёсткостью 10% при номинальной тяге может выйти из строя. С целью недопущения подобного сценария, жидкостные форсунки двигателей с переменной тягой должны иметь специальную конструкцию.

Одним из способов обеспечения жёсткости форсунок при низких уровнях тяги является повышение расчётного значения жёсткости, указанного при номинальной тяге. Однако следует учитывать, что высокий перепад давления предъявляет строгие требования к турбонасосам, и, как следствие, ведёт к снижению производительности при номинальной тяге.

Таким образом, использование форсунок, которые могут регулировать перепад давления при различных скоростях потока, является практичным решением. Для жидкостей, протекающих через отверстие с заданной скоростью потока, падение давления обратно пропорционально площади отверстия, плотности жидкости и коэффициенту расхода [4, с. 17]. Данные свойства являются основными конструктивными параметрами регулируемых форсунок.

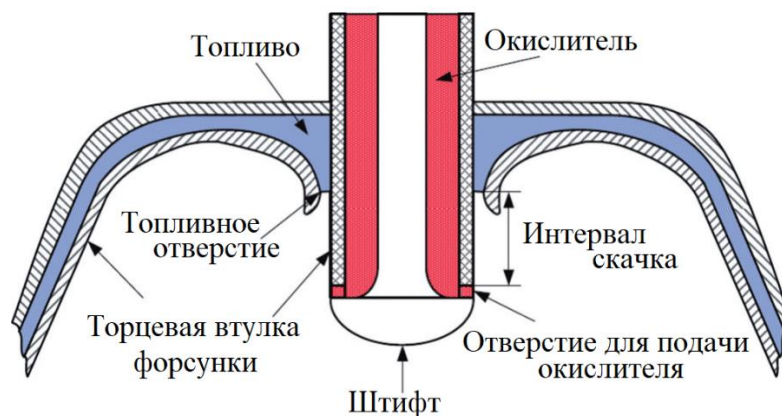


Рисунок 2. Схема штифтовой форсунки [4, с. 17], прим.: перевод автора

Принцип работы представлен на примере штифтовой форсунки, или игольчатом инжекторе (рисунок 2): в условиях низкой скорости потока торцевая втулка перемещается вниз, сужая отверстие и увеличивая перепад давления. Конструкция штифтовых форсунок также способствует распылению топлива и, таким образом, обеспечивает равномерное сжигание топлива. Осевой слой жидкости, впрыскиваемый из топливных отверстий, сталкивается с радиальным слоем жидкости, впрыскиваемым из отверстий для

подачи окислителя, вследствие образуя распылительный вентилятор, который обеспечивает лучшее смешивание компонентов.

Успешное применение регулируемых штифтовых форсунок представлено в пусковом механизме двигателя лунного модуля «Аполлон» (LEM). Широкий диапазон регулирования тяги (10:1) был достигнут за счёт использования кавитирующей трубки Вентури с переменным сечением в системе подачи топлива для регулирования его расхода. Другим примером служит двигатель Merlin-1D, оснащённый штифтовой форсункой с регулируемой частотой вращения, снизившей тягу до 75% от номинального уровня.

Проверенным способом снижения плотности жидкости, проходящей через форсунки, является впрыск инертного газа, например, азота, гелия, в поток топлива, что обеспечивает снижение давления без влияния на массовый расход топлива. Так, в двигателе SE-10 для обеспечения глубокого дросселирования применяется впрыск газообразного гелия.

Падение давления при низких скоростях потока может поддерживаться за счёт уменьшения коэффициента расхода при использовании вихревых форсунок. Коэффициент расхода в вихревых форсунках уменьшается с уменьшением тангенциальных входных площадей.

Таким образом, наши специалисты освоили технологию регулирования тяги ЖРД, однако остаётся нерешённым ряд вопросов, требующих тщательного изучения. Так, необходима модернизация регулирующих тягу устройств: разработка усовершенствованных надёжных регуляторов расхода, регулируемых форсунок, которые смогут обеспечить лучшую равномерность сгорания топлива, турбонасосов с широким диапазоном стабильной работы.

Использованные источники:

1. Гришин А.Н. Устройство и принцип работы жидкостного ракетного двигателя // Аллея науки. – 2021. – № 12 (63). – С. 1.
2. Сарычев С.С. Плёночное охлаждение жидкостных ракетных двигателей // VI МНПК «Наука и Просвещение: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 25 февраля 2022. – С. 31.
3. ГОСТ 17655-89. Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения (1990) // М.: Издательство стандартов.
4. Bin L. I. et al. A review of throttling technology development for large-thrust liquid rocket engines // 中国航天 (英文版). – 2021. – Т. 22. – №. 2. – С. 15-17.
5. Бруев В.Н., Козловский Л.Н. Принцип дросселирования в отечественных жидкостных ракетных двигателях // Аллея науки. – 2023. – № 1 (76). – С. 3.