

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

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БОЛЬШОЙ ТЯГИ

***Аннотация:** в статье рассматриваются основные конструкторские задачи и решения по обеспечению стабильности работы двигателя большой тяги с возможностью дросселирования тяги, обсуждаются важнейшие технологии и тенденции развития дросселирования, включая стабилизацию процесса сгорания топлива и регенеративное охлаждение газогенераторов при низких уровнях тяги, модернизацию конструкции форсунок, турбонасосов, а также стабильное дросселирование и точный контроль в широком диапазоне условий эксплуатации. Освещаются некоторые новые технологии для регулирования тяги, пока не получившие широкого распространения. Таким образом, для успешного процесса дросселирования требуется слаженная стабильная работа всех компонентов системы.*

***Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, двигатель большой тяги, дросселирование, тяга.*

***Annotation:** this paper addresses the essential design problems and solutions to ensure the stability of the large thrust throttling engine. Here we discuss the most important technologies and development trends in throttling, including stabilization of the combustion process and regenerative gas generator cooling at low thrust levels, modernization of nozzle design, turbopumps, and stable throttling and precise control in a wide range of operating conditions. Some new technologies for thrust*

control, not yet widely used, are highlighted. Thus, a successful throttling process requires the coordinated, stable operation of all system components.

Key words: *liquid rocket engines, large-thrust engine, throttling, thrust.*

Современные жидкостные ракетные двигатели большой тяги, являющиеся основными двигательными установками в большинстве современных ракет-носителей, имеют важную особенность – возможность регулирования тяги – дросселирование. Преимущественно способы дросселирования включают корректировку траектории фазы разгона, снижение полётной перегрузки и повышение грузоподъёмности. Дросселирование обеспечивает вертикальную посадку и восстановление первой и разгонной ступеней для ракет многоразового использования, позволяет осуществлять предполётную диагностику при сниженных уровнях тяги, минимизировать импульс отключения во время остановки двигателя и снизить риск несвоевременного разделения ступеней. Так, двигатель РД-180 может быть отрегулирован от 100% до 47% номинальной тяги [1, с. 5]. Такая возможность позволяет ракете-носителю Атлас-V контролировать перегрузку в полёте и увеличивать грузоподъёмность.

Для двигателей большой тяги достижение стандартной производительности является первостепенной задачей, а повышение адаптивности к полётам за счёт технологии дросселирования рассматривается лишь как дополнительное требование. Следовательно, компоненты системы в основном рассчитаны на типовые условия, и могут выходить из строя при их эксплуатации в ненормированных условиях, что особо важно учитывать при глубоком дросселировании.

Если в прошлом разработка ракет-носителей производилась при государственном финансировании, то с появлением коммерческих компаний одной из приоритетных задач в конструировании ракетных установок стала их ценовая конкурентоспособность [2, с. 31], ввиду чего активно продвигается

концепция их многоразового использования, что достигается, в том числе, методом вертикальной посадки, для обеспечения безопасности и надёжности которой требуется точное и стабильное регулирование тяги двигателя до низких уровней.

Согласно принципу работы ракетной установки, основным способом регулирования тяги – регулирование расхода топлива, при этом следует отметить, что, в свою очередь, основными способами регулирования расхода топлива являются регулирующие устройства, следовательно, для успешного процесса дросселирования требуется стабильная работа всех компонентов системы, в том числе устройств и деталей.

В этой связи одной из основных задач является обеспечение стабильности процесса сгорания топлива при низких уровнях тяги. Для успешного функционирования газогенераторов и камер сгорания требуются форсунки. Перепад давления в форсунке имеет решающее значение для эффективного распыления, смешивания и сгорания топлива в камерах сгорания [3, с. 4], соответственно, недостаточный перепад давления при низких уровнях тяги не может обеспечить производительность и стабильность системы. При таком сценарии даже незначительное сгорание создаст колебания всей системы, а длительное колебание приведёт к разрывам труб, утечкам топлива и т. п. В случае вихревой форсунки открытого типа, которая используется преимущественно в двигателях со ступенчатым циклом сгорания, при недостаточном перепаде давления жидкая плёнка в вихревой камере уплотняется, и периодически отсоединяется газовое ядро. Взаимодействие газового ядра с жидкой плёнкой вызывает сопряжённые колебания, что приводит к нестабильности сжигания топлива и влияет на работу турбонасосов [4, с. 20-21]. В процессе дросселирования, особенно глубокого, расход топлива и соотношение компонентов смеси в газификаторе значительно изменяются, в частности, при низких уровнях тяги. Экстремально низкая температура, возникающая в результате такого соотношения

компонентов смеси, является ещё одной причиной некорректной работы турбонасосов.

Модернизация конструкции форсунок позволяет минимизировать перепады в процессе сгорания топлива. Оптимальной среди регулируемых форсунок является штифтовая форсунка, в то время как многоколлекторная вихревая форсунка и система впрыска газа требуют технологического усовершенствования. Изменение конструкции вихревых форсунок может эффективно минимизировать возникающие колебания. Посредством корректировок в системе подачи топлива возможно избежать нестабильности его сжигания; например, увеличением перепада давления в результате изменения сопротивления в линии подачи топлива, или устранением дисбаланса в соотношении компонентов топливной смеси методом скоординированного регулирования потоков окислителя и топлива.

Ещё одна задача, которую решают инженеры-проектировщики – обеспечение адекватной работы турбонасосов в широком диапазоне условий эксплуатации. Необходимо увеличивать площадь отрицательного наклона кривой напора насоса, что может быть реализовано посредством оптимизации насосной конструкции. Разработка интеллектуальных алгоритмов и машинного обучения позволит будущим конструкторам создавать инновационные типы насосов. Достижения в области моделирования систем помогут выявить взаимодействие свойств насоса и динамических характеристик системы, чтобы исследовать схемы регулирования с более стабильными сегментами насоса.

Отмечено, что во время дросселирования осевое усилие турбонасоса может значительно меняться, что может вывести из строя подшипники [4, с. 21]. Для ограничения остаточного осевого усилия в приемлемом диапазоне при всех уровнях тяги необходимы самобалансирующиеся системы осевого усилия с широкими рабочими диапазонами и уплотнительными выступами подходящих размеров.

Следующей задачей является надёжное охлаждение камер сгорания двигателей большой тяги. Для этой цели активно применяется регенеративное охлаждение, поскольку оно эффективно минимизирует тепловые потоки стенок сопла и камеры сгорания: в стенках сопла и камеры предусматриваются каналы, по которым пропускается топливо для отвода тепла [5, с. 4]. С увеличением давления в камере сгорания тепловой поток снижается, а расход хладагента уменьшается пропорционально давлению в камере, что приводит к недостаточному охлаждению камеры сгорания при низких уровнях тяги [4, с. 22]. Для обеспечения надёжного охлаждения камеры сгорания могут быть приняты следующие меры: регулирование скорости потока охлаждающего слоя, дросселирование расхода топлива и повышение адгезивности охлаждающего слоя. Сложность реализации данных мер заключается не только в необходимости разработки и производства соответствующих компонентов и устройств, но также в повышенной сложности исходной системы. Прогресс в таких технологиях, как 3D-печать, позволит создавать элементы, способные обеспечивать более эффективное охлаждение при низких скоростях потока. Достижения в технологии динамического моделирования систем помогут найти лучшие решения для балансировки охлаждения камеры сгорания и стабильности системы.

Наконец, немаловажной конструкторской задачей является достижение стабильного дросселирования и точного контроля тяги. В широком диапазоне тяги негативное воздействие на процесс дросселирования оказывает повреждение различных компонентов системы, таких как форсунки, турбонасосы и камеры сгорания. Следовательно, стабильное дросселирование в широком диапазоне тяги не может быть реализовано действием определённого компонента системы, для этого требуется координированная работа совокупности устройств.

Приведём пример согласованного дросселирования с использованием регулятора расхода и двухпозиционного главного клапана окислителя в

двигателе со ступенчатым циклом сгорания [6, с. 389-396]: значения параметров нормализуются делением исходных значений на наблюдаемые. Управление силой тяги достигается регулированием расхода топлива в газогенераторе с высоким уровнем окислителя с помощью регулятора расхода. Для предотвращения чрезмерно низкой температуры при низких уровнях тяги (снижение тяги до 58% от номинального уровня), двухпозиционный главный клапан окислителя смещается в положение с высоким сопротивлением. По мере увеличения нагрузки насоса окислителя при том же уровне тяги расход топлива в газогенераторе увеличивается, возвращая температуру газогенератора к приемлемому уровню.

Таким образом, развитие цифрового проектирования, системного моделирования, машинного обучения, и других инноваций, значительно способствует разработке улучшенных по стабильности технологий дросселирования с прецизионными методами управления.

Использованные источники:

1. Бруев В.Н., Козловский Л.Н. Принцип дросселирования в отечественных жидкостных ракетных двигателях // Аллея науки. – 2023. – № 1 (76). – С. 3.
2. Бруев В.Н., Ефимов М.В. Обзор топлив для жидкостных ракетных двигателей ракет-носителей будущего // МНПК «Современная наука и образование: актуальные вопросы теории и практики». – Пенза, 10 января 2023. – С. 31.
3. Барышев С.А. Анализ способов регулирования тяги в жидкостных ракетных двигателях // Аллея науки. – 2023. – № 1 (76). – С. 4.
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. 20-22.

5. Бруев В.Н. Системы охлаждения и теплопередачи жидкостных ракетных двигателей // Аллея науки. – 2022. – № 12 (75). – С. 4.

6. Wang H.Y. et al. Comparison of deep thrust throttling schemes of oxidizer-rich gas staged combustion liquid oxidizer/kerosene engine // Manned Spaceflight. – 2019. – Т. 25. – № 3. – С. 389-396.