

**Астраханцев Даниил Андреевич**

студент бакалавриата  
Сибирский государственный университет науки  
и технологий им. академика М.Ф. Решетнева  
Красноярск, Россия

**Погибов Андрей Павлович**

студент бакалавриата  
Сибирский государственный университет науки  
и технологий им. академика М.Ф. Решетнева  
Красноярск, Россия

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ  
С ВЫТЕСНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА****Аннотация**

Рассматриваются вопросы экономических проблем конструирования и производства двигателей с вытеснительной системой подачи топлива для малогабаритных космических аппаратов. Проводится анализ факторов, влияющих на себестоимость и экономическую эффективность таких двигательных установок, включая выбор газа-вытеснителя, материалов и конструктивных решений, направленных на снижение массы и объёма оборудования. Результатами исследования являются обоснование направлений оптимизации затрат и предложения по использованию инновационных технологий для снижения стоимости производства и эксплуатации. Сделан вывод о значимости комплексного учёта экономических параметров на этапе проектирования и производства для повышения конкурентоспособности таких систем.

**Ключевые слова:** вытеснительная система, экономическая эффективность, управление затратами

Вытеснительная система подачи топлива представляет собой одну из ключевых альтернатив традиционным насосным схемам, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить не только высокую надёжность и простоту конструкции, но и оптимизацию производственных и эксплуатационных затрат. Экономическая эффективность таких систем обусловлена снижением количества подвижных частей, упрощением технологических процессов и уменьшением затрат на техническое обслуживание. Вытеснительные системы широко применяются в малогабаритных двигательных установках, автономных ракетных двигателях и космических аппаратах, где ограниченные габариты, масса и высокая отказоустойчивость напрямую связаны с удорожанием или удешевлением всего проекта. Основной принцип работы вытеснительной системы заключается в использовании газа-вытеснителя для создания давления в топливных и окислительных баках, что позволяет отказаться от дорогостоящих насосных агрегатов. Газ может быть закачан в систему заранее либо

получен в процессе эксплуатации установки, что также влияет на себестоимость и экономическую целесообразность выбранной конструкции.

Экономические проблемы конструирования и производства двигателей с вытеснительной системой подачи топлива связаны с необходимостью поиска баланса между затратами на разработку, производством и эксплуатацией, а также с выбором материалов, технологий и компонентов, обеспечивающих минимизацию расходов без ущерба для качества и надёжности. Эти вопросы приобретают особую актуальность в условиях жёстких бюджетных ограничений и растущих требований к рентабельности космических проектов.

#### 1. Выбор газа-вытеснителя и расчёт давления

Газ, используемый для вытеснения топлива, должен обеспечивать необходимое давление на всём протяжении работы двигателя. Наиболее часто используются гелий, азот или разлагающиеся газы. Необходимо учитывать термодинамические параметры — температуру, объём, давление в зависимости от режима работы. Например, при использовании гелия в криогенных системах требуется его предварительный нагрев, чтобы избежать резкого падения давления. Неправильно рассчитанное давление может привести либо к недостаточному расходу топлива, либо к превышению допустимого давления в баке, что приведёт к его разрушению.

#### 2. Проблемы герметизации и температурных перепадов

Бак с топливом, находящийся под высоким давлением, требует надёжной герметизации, особенно в условиях космоса или высоких перепадов температур. Уплотнительные элементы должны сохранять герметичность при значительном диапазоне температур. Проблемы возникают при запуске в условиях вакуума, когда возможна деградация эластомеров и утечка газа-вытеснителя.

#### 3. Совместимость компонентов

Газ-вытеснитель, топливо и конструкционные материалы должны быть химически инертны друг к другу. Использование, например, азота с гидразиновыми топливами требует соответствующего покрытия внутренней поверхности баков. Неправильный подбор может вызвать катализ разложения топлива или коррозию.

#### 4. Масса и объём

Одним из главных ограничений вытеснительных систем является их сравнительно высокая масса и объём по сравнению с насосными схемами. Несмотря на отсутствие насосов и связанных с ними приводов, система требует установки прочных баллонов высокого давления, а также арматуры – трубопроводов, редукторов, обратных и предохранительных клапанов, манометров. Масса одного только газа-вытеснителя может составлять значительную долю от общей массы установки. В среднем масса арматуры и конструктивных элементов составляет 10-15% от массы всей топливной системы, что особенно критично при проектировании малых космических аппаратов, где каждый грамм на счету. Кроме того, баллоны требуют определённого пространства, которое трудно выделить в компактных корпусах микроспутников. Эти факторы вынуждают инженеров искать баланс между необходимым запасом топлива, давлением газа и допустимыми габаритами системы, часто прибегая к компромиссным решениям.

#### 5. Динамика подачи

Одна из характерных проблем вытеснительной схемы – изменение давления в баке по мере расхода газа-вытеснителя, что непосредственно влияет на расход топлива. Без применения системы поддержания давления подача топлива становится неравномерной: в начале цикла давление и, соответственно, расход находятся на пиковом уровне, но постепенно снижаются, что нарушает стабильность тяги и может привести к изменению характеристик полёта. Для компенсации этого эффекта используются различные подходы, включая применение многоступенчатых баллонов, в которых газ подаётся поэтапно, или установка регулируемых редукторов давления, автоматически поддерживающих заданные параметры. Однако все эти решения увеличивают сложность системы, требуют дополнительных компонентов и повышают общую массу. Вдобавок они могут снижать надёжность, так как любая дополнительная арматура – это потенциальная точка отказа. Поэтому разработка стабильной и предсказуемой динамики подачи остаётся важной задачей при создании вытеснительных систем. Современные тенденции в развитии космической техники, особенно в области миниатюрных аппаратов, таких как микроспутники, CubeSat и наноспутники, требуют появления новых экономически эффективных решений в сфере двигательных установок. Основными требованиями к таким системам становятся не только высокая надёжность, минимальные масса и габариты, низкое энергопотребление и упрощённая конструкция, но и снижение затрат

на производство, обслуживание и запуск. В этих условиях вытеснительные схемы подачи топлива приобретают особую актуальность, так как они позволяют отказаться от дорогостоящих насосных агрегатов, тем самым существенно уменьшая технические риски, стоимость изготовления и расходы на эксплуатацию.

Несмотря на свои преимущества, вытеснительные системы требуют комплексного подхода не только к техническому, но и к экономическому совершенствованию. Одним из направлений развития становится применение композитных баллонов нового поколения, которые при высокой прочности и малом весе позволяют снизить затраты на производство и транспортировку. Такие баллоны способны выдерживать значительные давления без увеличения массы конструкции, что критически важно для экономической целесообразности космических миссий. Ещё одним перспективным решением с точки зрения экономики является использование газов-вытеснителей, получаемых непосредственно на борту. Это позволяет отказаться от предварительного закачивания и хранения инертного газа, снижая расходы на подготовку и запуск аппарата.

Кроме того, разработки адаптивных регуляторов давления, которые автоматически подстраиваются под условия работы двигателя, открывают возможности для уменьшения затрат на сервисное обслуживание и продления ресурса системы. Внедрение интеллектуальных систем термоконтроля газовой полости также способствует экономии энергии и повышению общей эффективности вытеснительных схем.

Дополнительным направлением эволюции является интеграция вытеснительных систем в состав многокомпонентных двигателей с возможностью динамического изменения режима подачи топлива и окислителя, что позволяет гибко управлять тягой и экономить ресурсы в зависимости от этапа полёта и задач миссии. Таким образом, вытеснительные системы сохраняют высокий потенциал для использования как в гражданских, так и в оборонных космических проектах, сочетая техническую надёжность с экономической целесообразностью.

Вытеснительная система подачи топлива представляет собой жизнеспособную, конструктивно простую и надёжную альтернативу традиционным насосным схемам, особенно в тех случаях, когда требуется не только высокая надёжность и компактность, но и снижение общих затрат на проектирование, производство и эксплуатацию. Такие системы доказали свою экономическую целесообразность в ряде приложений, включая

космические аппараты и малогабаритные двигательные установки, где каждый грамм массы и каждый кубический сантиметр объёма напрямую связаны с увеличением или снижением стоимости миссии.

Проектирование и внедрение вытеснительных систем требует всестороннего учёта не только технических, но и экономических факторов. Выбор газа-вытеснителя, материалов, обеспечение герметичности и устойчивости давления – всё это оказывает существенное влияние на себестоимость двигателя и долгосрочные затраты на его обслуживание. В современных условиях развития космических технологий особую значимость приобретает поиск решений, которые позволяют снизить расходы без ущерба для надёжности и эффективности. К таким решениям относятся использование композитных материалов, интеллектуальных регуляторов, адаптивных систем управления и методов численного моделирования, позволяющих сократить затраты на разработку и оптимизировать производственные процессы.

Дальнейшее развитие вытеснительных систем должно быть направлено не только на совершенствование технических характеристик, но и на достижение экономической эффективности. Это обеспечит конкурентоспособность данных технологий и их широкое применение в космических проектах нового поколения.

### **Список использованных источников**

1. Винокуров, А.А. Системы подачи топлива в ракетных двигателях. – М.: Машиностроение, 2017. – 288 с.
2. Гудков, И.И. Наддув в ракетных системах: теория и практика. – Новосибирск: НГТУ, 2019. – 176 с.
3. Хьюстон, Р. Ракетные двигатели малой тяги. Пер. с англ. – М.: Мир, 2020. – 310 с.
4. Smith J., Rocket Propulsion Systems. 2nd Edition. – Springer, 2018. – 412 p.
5. Tsiolkovsky K.E. Works on Rocket Dynamics. – NASA Historical Archive, 2015. – 198 p.