

*Ефремов Н.В.,
слесарь-сборщик ракетных двигателей 4 разряда
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»
Россия, г. Химки*

МЕТОДЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЭРОЗИИ СОПЛА В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

***Аннотация:** в статье рассматриваются основные аналитические и полуэмпирические модели решения проблемы эрозии сопла ракетных двигателей, функционирующих на жидком топливе, перечислены их достоинства и недостатки, приведены примеры успешного применения способов, описанных в статье, для минимизирования рисков выхода из строя ракетной установки.*

***Ключевые слова:** эрозия сопла, жидкостный ракетный двигатель, ракетная установка, ракетостроение.*

***Annotation:** the study considers the key analytical and semi-empirical models of solving the issue of nozzle erosion of rocket engines running on liquid fuel, lists their advantages and disadvantages, and presents examples of successful application of the described approaches to minimize the risks of rocket plant failure.*

***Key words:** nozzle erosion, liquid rocket engine, rocket plant, rocket engineering.*

В ракетных установках, где движущим фактором является простота конструкции системы подачи и наддува [1, с. 482], важными аспектами выступают надёжность и эффективность работы космического аппарата, которые могут быть достигнуты за счёт правильной работы всех его компонентов.

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) одной из сложных и распространённых проблем, которая влияет на их производительность и надёжность, является эрозия сопла, вызванная высокой температурой, давлением и скоростью горючих газов, проходящих сквозь составляющее наибольший сегмент конструкции ракетного двигателя сопло [2, с. 690], а также химическими реакциями между газами и материалом, из которого оно сконструировано. Эрозия сопла может привести к снижению тяги, увеличению расхода топлива, ухудшению управляемости и устойчивости, а также повреждению других компонентов двигателя или ракетной установки в целом. Следовательно, крайне важно вовремя выявить и предотвратить данную проблему.

Существует несколько методов и средств борьбы с эрозией сопел в ЖРД. Простейшие подходы к решению данной проблемы представлены аналитическими и полуэмпирическими моделями.

Одним из подходов, относящимся к полуэмпирическим моделям, является выбор подходящего материала для сопла, обладающего высокой термостойкостью, механической прочностью и химической инертностью. Так, в некоторых ЖРД в качестве материала при изготовлении сопел, используются тугоплавкие металлы (вольфрам, рений) или керамика (диоксид циркония, карбид кремния).

Примером ракетного двигателя с вольфрамовым соплом является РД-170 производства АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», который задействован в первой ступени ракеты-носителя «Энергия». К недостаткам вольфрама относится высокая плотность ($19,25 \text{ г/см}^3$) и стоимость материала, что ограничивает его широкое применение.



Рисунок 1. Жидкостный ракетный двигатель РД-170 производства АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко» [3]

Примером ракетного двигателя с ренийевым соплом и соплом из диоксида циркония является RS-25, эксплуатируемый на космических шаттлах NASA. Рений обладает самой высокой температурой плавления среди всех металлов, составляющую 3186 °С, и приемлемую химическую стойкость к окислению и коррозии, что делает его превосходным материалом для изготовления сопел, однако, как и вольфрам, имеет очень высокую плотность (21 г/см³) и стоимость.

Сопло из карбида кремния используется в двигателе RS-68,

задействованном в первой ступени ракет-носителей Delta IV. Карбид кремния имеет низкую плотность и теплопроводность, что уменьшает массу и тепловые потери сопла. К недостаткам сопел из керамики (в том числе диоксида циркония и карбида кремния) относятся высокая стоимость материала, сложность изготовления сопел и склонность к трещинообразованию при тепловых циклах.

Другим способом минимизировать эрозию сопла является использование специальных покрытий или вставок на поверхности сопла, цель которых – защитить основной материал от термического, механического или химического воздействия газов. К примеру, в некоторых ЖРД используются абляционные материалы (фенольная смола, углеродное волокно) или метод регенеративного охлаждения, предполагающий протекание части или всего количества жидкого топлива через стенки сопла и камеры сгорания перед тем, как поступить в камеру сгорания [4, с. 660].

Следует помнить, что при включённом двигателе происходит значительный отвод тепла от сопла, однако ЖРД имеют металлическую конструкцию, способную выдерживать высокие температуры, и изолированы от остальной части ракетной установки, а топливо при этом хранится в отдельных резервуарах [5, с. 43].

Ещё один метод, позволяющий избежать эрозии сопла, заключается в оптимизации его геометрии и профиля для обеспечения оптимального расширения газов и минимального трения о стенку сопла. Примером служит использование адаптивных или изменяемых сопел, которые могут регулировать свою форму и размер в зависимости от давления окружающей среды.

Наиболее распространёнными примерами ЖРД с адаптивными или изменяемыми соплами являются следующие: двигатель РД-0124, использующийся на второй ступени ракет-носителей Союз-2.1а и Союз-2.1б, и состоящий из четырёх камер сгорания, каждая из которых имеет сопло с

поворотной насадкой, позволяющей изменять угол отклонения от 0 до 45° для управления вектором тяги и траекторией полёта ракеты; двигатель RS-25, применяющийся на третьей ступени ракеты-носителя SLS, имеющий одну камеру сгорания с соплом, которое может изменять свою форму и размер благодаря выдвигной насадке из диоксида циркония, а также двигатель RL-10, который используется на верхних ступенях ракет-носителей Atlas V и Delta IV, включающий также одну камеру сгорания с соплом, которое может изменять свою форму и размер благодаря выдвигной насадке из карбида кремния, что позволяет в обоих случаях оптимизировать коэффициент расширения газов и увеличить удельный импульс.

Для решения проблемы эрозии сопла методом аналитических моделей, основанных на теоретических и экспериментальных данных о тепло- и массообмене, механике деформируемого твёрдого тела, химической кинетике и термодинамике газов, инженеры-конструкторы применяют несколько видов таких моделей, которые различаются по степени сложности, точности и области применения.

Одной из самых ранних и простых моделей, которая учитывает только термическую эрозию сопла, является модель Холмана, основанная на уравнении теплопроводности для стационарного одномерного случая. Она позволяет определить температуру и толщину стенки сопла, а также скорость её абляции при заданных параметрах газового потока.

Усовершенствованной моделью, которая учитывает как термическую, так и механическую эрозию сопла, является модель Бартона. Она основана на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии для нестационарного одномерного случая, и позволяет определить температуру, давление, скорость и состав газового потока, а также температуру, деформацию и износ стенки сопла при заданных параметрах газового потока и материала сопла.

Широкое распространение получила модель Карлина, которая учитывает термическую и химическую эрозию сопла, основанная на уравнениях

сохранения массы, импульса и энергии для нестационарного одномерного случая с учётом химических реакций между газами и материалом сопла. Данная модель определяет те же показатели, что и модель Бартона.

Следует отметить, что фундаментальное значение в вопросе предотвращения эрозии сопла, имеет изучение основных физических механизмов, управляющих эрозией и теплофизическим поведением систем тепловой защиты сопел ракет. В процессе проектирования необходимы надёжные численные модели, чтобы сократить количество дорогостоящих испытаний горячим обжигом [6, с. 24].

Использованные источники:

1. Ванин Ю.В. Монотоплива с закисью азота – нетоксичные, но взрывоопасные? // Аллея науки. – 2023. – № 2 (77). – С. 482.
2. Сарычев С.С. Сопла ракет: краткий обзор // Аллея науки. – 2022. – № 2 (65). – С. 690.
3. Жидкостный ракетный двигатель РД-170, макет 1:1, КБ «Энергомаш» им. В.П. Глушко, Москва, ВДНХ, Павильон № 32 «Космос» (2018). [Электронный ресурс]. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/RD-170.jpg/800px-RD-170.jpg> (дата обращения: 30.07.2023).
4. Бруев В.Н. Системы охлаждения и теплопередачи жидкостных ракетных двигателей // Аллея науки. – 2022. – Т. 1. – № 12 (75). – С. 660.
5. Сарычев С.С. Обзор гибридных ракет с абляционным типом охлаждения // МНПК «Российская наука в современном мире». – Москва, 25 февраля 2022. – С. 43.
6. Ванин Ю.В. Эрозия сопла ракетного двигателя: основные пути решения проблемы // XVI МНПК «Наука, образование, инновации: актуальные вопросы и современные аспекты». – Пенза, 20 февраля 2023. – С. 24.