

УДК 629.7.036.54

К выбору рабочих тел для газовых ракетных двигателей малой тяги

Дворянцева Евгения Александровна^(*)

eva.edle@mail.ru

Вертаков Николай Михайлович

vertakov@fakel-russia.com

АО «ОКБ «Факел», Калининград, Россия

Аннотация. В настоящей работе выполнен расчет и анализ эффективности применения 11 газообразных РТ (сернистый газ, аммиак, ксенон, углекислый газ, фреон, криптон, пропан, бутан, аргон, метан, азот) в части приращения характеристической скорости спутника, массы незаправленных баллонов, их химической активности, взрыво- и пожароопасности и стоимости. Сделаны выводы по критериям выбора газообразного РТ, подходящего под конкретную задачу.

Ключевые слова: газовый ракетный двигатель, газ, приращение характеристической скорости, рабочее тело, газовая двигательная установка

Введение. Газовые двигатели — конструктивно самые простые ракетные двигатели среди применяемых в настоящее время. Принцип их действия — простое газодинамическое ускорение газа в сопле Лавала без протекания химических реакций в камере. Обладая более низким удельным импульсом в сравнении с, например, химическими или электрическими ракетными двигателями, газовые двигатели представляют интерес благодаря своей относительно низкой стоимости и простоте в эксплуатации.

Методы и материалы; результаты. В табл. 1 представлены РТ в порядке убывания приращения характеристической скорости ΔV . Для проведения расчетов условно принято, что объем баллона с газообразным РТ при температуре 20 °С составляет 0,5 л, «сухая масса» спутника составляет 2 кг. Расчет идеального удельного импульса тяги проводился в специализированном программном комплексе (СПК) Тетра разработки Московского государственного университета им. Н.Э. Баумана.

Таблица 1

Параметры газообразных рабочих тел

Газ	Химическая формула	Идеальный удельный импульс, м/с	Давление газа в баллоне, МПа	Идеальный объемный удельный импульс**, кг/с·м ²	Приращение характеристической скорости, м/с	Агрегатное состояние РТ в баллоне: 1 — газ, 2 — жидкость-газ
Сернистый газ	SO ₂	589	0,5*	839 325	179,48	2
Аммиак	NH ₃	1079	0,5*	681 928	158,28	2

Окончание табл. 1

Газ	Химическая формула	Идеальный удельный импульс, м/с	Давление газа в баллоне, МПа	Идеальный объемный удельный импульс**, кг/с·м ²	Приращение характеристической скорости, м/с	Агрегатное состояние РТ в баллоне: 1 — газ, 2 — жидкость-газ
Ксенон	Xe	304	19	646 973	129,68	1
Углекислый газ	CO ₂	687	5,8	533 112	121,81	2
Фреон (R-236fa)	C ₃ F ₆ H ₂	392	0,5*	539 784	115,97	2
Криптон	Kr	383	35	530 838	113,95	1
Пропан	C ₃ H ₈	775	35	430 900	100,87	2
Бутан	C ₄ H ₁₀	697	0,5*	403 563	94,22	2
Аргон	Ar	549	35	303 597	71,09	1
Метан	CH ₄	1137	35	267 195	64,91	1
Азот	N ₂	775	35	256 525	61,62	1
* Давление принято условно. ** Идеальный объемный удельный импульс рассчитывался как произведение идеального удельного импульса на плотность газа в баллоне.						

Сернистый газ, аммиак, углекислый газ, фреон R-236fa, пропан, бутан хранятся в двухфазном состоянии жидкость-газ [1, 2].

Для более полной оценки рассматриваемых газообразных РТ был проведен дополнительный анализ, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики рассматриваемых РТ

Газ	Химическая активность	Взрыво- и пожаробезопасность	Предварительная цена за заправку 1 л, руб. (на ноябрь 2024 г.)
Сернистый газ	Высокая	Невзрывоопасен	500
Аммиак	Химически активен	Смесь аммиака с воздухом взрывоопасна	60
Ксенон	Низкая	Невоспламеняемый газ	1200
Углекислый газ	Химически активен	Невзрывоопасен	50
Фреон (R-236fa)	Низкая	Невзрывоопасен	5600

Окончание табл. 2

Газ	Химическая активность	Взрыво- и пожаробезопасность	Предварительная цена за заправку 1 л, руб. (на ноябрь 2024 г.)
Криптон	Низкая	Невзрывоопасен	190
Пропан	Низкая	Сжиженные газы образуют с воздухом взрывоопасные смеси	40
Бутан	Низкая		*
Аргон	Низкая	Невзрывоопасен	70
Метан	Низкая	Горючий газ	30
Азот	Низкая	Невзрывоопасен	50
* Точных данных не найдено.			

Закключение. Проведен анализ одиннадцати РТ, которые можно использовать для газовых РД. Наибольшим приращением характеристической скорости среди рассмотренных РТ обладает сернистый газ, однако он обладает высокой химической активностью и стоимостью. Наименьшим приращением характеристической скорости обладает азот, но при этом он дешев, доступен и инертен.

Список источников

- [1] Martínez J.M., Lafleur T. On the selection of propellants for cold/warm gas propulsion systems. *Acta Astronautica*, 2023, vol. 212, pp. 54–69.
- [2] Martínez Martínez J.M., Lafleur T. Cold/warm gas thruster propellant ranking and performance data. Dataset on Zenodo, 2023.