

Возможность увеличения удельного импульса жидкостного ракетного двигателя при добавлении в камеру сгорания гелия

© С.А. Орлин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты расчетов на удельный импульс жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) добавок гелия в топливные пары: N_2O_4 + НДМГ, жидкий O_2 + керосин, жидкий O_2 + жидкий H_2 , жидкий F_2 + жидкий H_2 . Показано, что для первых двух топливных пар (N_2O_4 + НДМГ, жидкий O_2 + керосин) добавка гелия при определенных условиях приводит к увеличению удельного импульса.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, добавки гелия в контур ЖРД, увеличение удельного импульса, топливо кислород — керосин, гелий.

Основным показателем, характеризующим эффективность ракетных топлив с энергетической точки зрения, является удельный импульс тяги, т. е. тяга двигателя, приходящаяся на 1 кг топлива, расходуемого в 1 с.

Для иллюстрации влияния состава топлива на его энергетические показатели приемлемо следующее уравнение, применяемое при расчете удельного импульса тяги $I_{уд}$:

$$I_{уд} = \sqrt{2RT \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_k} \right)^{(k-1)/k} \right]},$$

где R — газовая постоянная (удельная); T — температура продуктов сгорания в камере сгорания; k — показатель адиабаты расширения, зависящий от состава продуктов сгорания и температуры газов; p_c и p_k — давление на срезе сопла и давление в камере сгорания соответственно.

Из уравнения следует, что удельный импульс тяги зависит от температуры и газовой постоянной продуктов сгорания, а также от степени их расширения при истечении из сопла двигателя. Последняя величина определяется конструкцией ЖРД и условиями его применения. Тяга двигателя повышается с уменьшением отношения p_c/p_k , поэтому энергетические показатели топлив сравнивают при одинаковых условиях.

Величинами, характеризующими энергетические возможности используемых топлив, как следует из уравнения для определения $I_{уд}$,

являются температура T продуктов сгорания в камере двигателя и газовая постоянная R топливной смеси.

Температура продуктов сгорания определяется теплопроизводительностью топлива, т. е. тепловым эффектом химического взаимодействия между окислителем и горючим (отнесенным к единице массы или объема топлива).

Газовая постоянная продуктов сгорания определяется их составом. Чем меньше молекулярная масса продуктов сгорания топлива, тем большим, при равной теплопроизводительности, будет его удельный импульс тяги. Молекулярная масса продуктов сгорания определяет и влияние отношения компонентов на удельный импульс тяги. Как правило, наибольший удельный импульс тяги достигается при нестехиометрическом соотношении компонентов, обеспечивающем максимальное выделение энергии. Вследствие этого при сравнении энергетических характеристик различных топлив соотношение компонентов обычно принимают таким, чтобы обеспечивалась максимальная тяга двигателя (стехиометрическое отношение).

В настоящее время наиболее часто применяемыми ракетными топливами являются: N_2O_4 + НДМГ, жидкий O_2 + керосин, жидкий O_2 + жидкий H_2 , жидкий F_2 + жидкий H_2 .

Последняя топливная пара, несмотря на явные преимущества в энергетическом плане, из соображений экологической безопасности не получила применения в качестве топлива для ЖРД, хотя в Научно-производственном объединении «Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» были созданы и испытаны на стенде ЖРД марок РД 302, 303, 350 с фтором в качестве окислителя.

Актуальной на сегодняшний день задачей является увеличение удельного импульса ЖРД при минимальных экономических затратах, т. е. с использованием уже отработанной технологии создания двигателей. Один из путей решения указанной задачи — использование добавки нейтрального газа (гелия). Прирост удельного импульса в этом случае будет определяться увеличением значения R смеси при снижении ее молекулярной массы.

Определяющим параметром при выборе гелия была атомная масса, поскольку гелий является одноатомным газом. Сравнение атомных масс различных одноатомных нейтральных газов приведено ниже:

| Газ | Атомная масса |
|--------------|---------------|
| Гелий..... | 4 |
| Неон..... | 20 |
| Аргон..... | 40 |
| Криптон..... | 84 |
| Ксенон..... | 131 |

Так как необходимо иметь наибольшее значение R смеси, из перечисленных газов был выбран гелий:

$$R_k = \frac{R}{\mu_{\text{смеси}}}$$

Необходимо отметить, что при добавке гелия в топливо некоторое количество теплоты будет идти на его (гелия) нагрев. Это приводит к уменьшению температуры в зависимости от количества добавляемого гелия. При использовании гелия происходят два явления:

- 1) увеличение газовой постоянной смеси продуктов сгорания R_k ;
- 2) уменьшение температуры продуктов сгорания вследствие дополнительных затрат на нагрев нейтрального газа, не участвующего в процессе горения.

Необходимо отметить, что уменьшение температуры в камере сгорания не только несет отрицательный эффект, но и приводит к уменьшению затрат на охлаждение камеры, что является положительным моментом. Оба фактора зависят от количества добавленного гелия, хотя их влияние противоположно.

Необходимо иметь в виду, что на борту летательного аппарата всегда находится гелий, используемый для надува баков, продувки магистралей подачи и элементов двигательной установки, а также привода пневмоавтоматики. Это исключает необходимость использовать в ряде случаев специальные системы, резко ухудшающие массовые характеристики двигательной установки.

Для анализа влияния добавления гелия был выбран ракетный двигатель, работающий на следующих топливных парах:

- 1) N_2O_4 + НДМГ;
- 2) жидкий O_2 + керосин;
- 3) жидкий O_2 + жидкий H_2 ;
- 4) жидкий F_2 + жидкий H_2 .

Параметры двигателя: $p_k = 150$ МПа; $p_a = 0,8$ МПа.

Количество нейтрального газа (гелия) в качестве примеси к топливу варьировалось в диапазоне 5...45 % по отношению к массе топлива. Расчеты проводились на ЭВМ по программе «Астра».

На первом этапе подбиралось оптимальное значение α для каждой топливной пары, соответствующее максимальному значению удельного импульса (табл. 1).

На втором этапе непосредственно рассчитывался удельный импульс при добавлении в топливо нейтрального газа гелия. Результаты расчетов для каждой топливной пары представлены в табл. 2–5, а также на рис. 1–4.

Таблица 1

Оптимальное значение α для каждой топливной пары

| Параметр | Топливная пара | | | |
|----------|------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | $N_2O_4 + \text{НДМГ}$ | Жидкий $O_2 +$ + керосин | Жидкий $O_2 +$ + жидкий H_2 | Жидкий $F_2 +$ + жидкий H_2 |
| K_m | 3 | 2,8 | 5,5 | 16,2 |
| α | 0,95 | 0,9 | 0,8 | 0,95 |

Таблица 2

Результаты расчетов для топливной пары жидкий $O_2 +$ керосин

| № п/п | $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100 \%$ | $\mu_{смеси},$ Г/МОЛЬ | $T_{к},$ К | $I_{уд},$ с | $\Delta I_{уд},$ с |
|-------|--|--------------------------|------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0 | 23,8 | 3780 | 345 | 0 |
| 2 | 5,6 | 19,4 | 3560 | 356 | 11 |
| 3 | 10 | 16,3 | 3355 | 358 | 13 |
| 4 | 12,5 | 15,8 | 3300 | 359 | 14 |
| 5 | 20 | 13,5 | 3045 | 357 | 12 |
| 6 | 40 | 9,7 | 2300 | 349 | 4 |

Таблица 3

Результаты расчетов для топливной пары $N_2O_4 + \text{НДМГ}$

| № п/п | $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100 \%$ | $\mu_{смеси},$ Г/МОЛЬ | $T_{к},$ К | $I_{уд},$ с | $\Delta I_{уд},$ с |
|-------|--|--------------------------|------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0 | 25 | 3727 | 329 | 0 |
| 2 | 6,4 | 19 | 3269 | 339,7 | 10,7 |
| 3 | 10,6 | 17 | 3132 | 341,3 | 12,3 |
| 4 | 20,5 | 13,5 | 2793 | 338,8 | 9,8 |
| 5 | 41 | 10 | 2196 | 326,5 | -2,5 |

Таблица 4

Результаты расчетов для топливной пары жидкий $O_2 +$ жидкий H_2

| № п/п | $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100 \%$ | $R_{к},$ Дж/(МОЛЬ·К) | $T_{к},$ К | $I_{уд},$ с | $\Delta I_{уд},$ с |
|-------|--|-------------------------|------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0 | 710 | 3200 | 441 | 0 |
| 2 | 10 | 840 | 3010 | 436 | -5 |
| 3 | 20 | 948 | 2800 | 427 | -14 |
| 4 | 30 | 1038 | 2570 | 417 | -24 |
| 5 | 40 | 1105 | 2400 | 408 | -33 |
| 6 | 50 | 167 | 2210 | 399 | -42 |

Результаты расчетов для топливной пары жидкий F_2 + жидкий H_2

| № п/п | $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%$ | $R_{к,}$ Дж/(моль·К) | $T_{к,}$ К | $I_{уд,}$ с | $\Delta I_{уд,}$ с |
|-------|---------------------------------------|-------------------------|------------|-------------|--------------------|
| 1 | 0 | 520 | 4800 | 468 | 0 |
| 2 | 10 | 600 | 4680 | 467 | -1 |
| 3 | 20 | 705 | 4350 | 459 | -9 |
| 4 | 30 | 805 | 3390 | 446 | -22 |
| 5 | 40 | 897 | 3650 | 435 | -33 |
| 6 | 50 | 975 | 3250 | 422 | -46 |

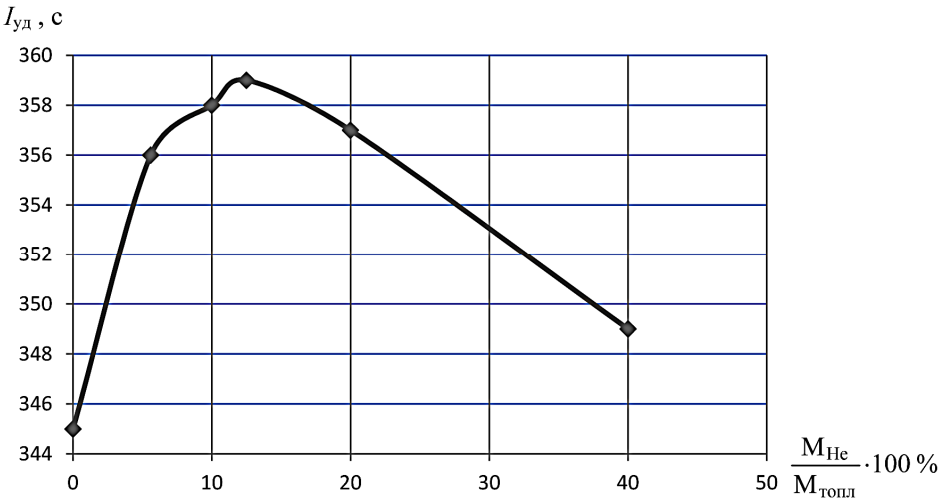


Рис. 1. Зависимость $I_{уд}$ от $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%$ для топливной пары O_2 + керосин

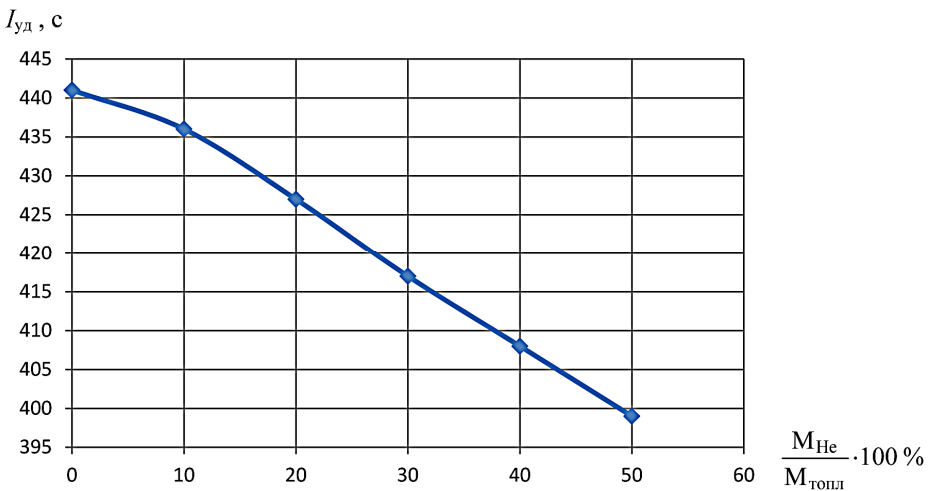


Рис. 2. Зависимость $I_{уд}$ от $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%$ для топливной пары N_2O_4 + НДМГ

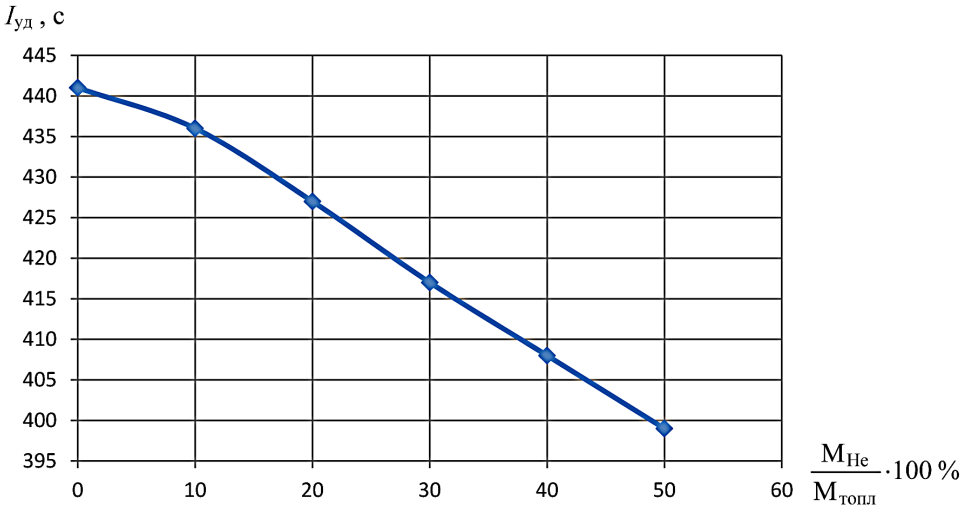


Рис. 3. Зависимость $I_{уд}$ от $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%$ для топливной пары жидкий O_2 + жидкий H_2

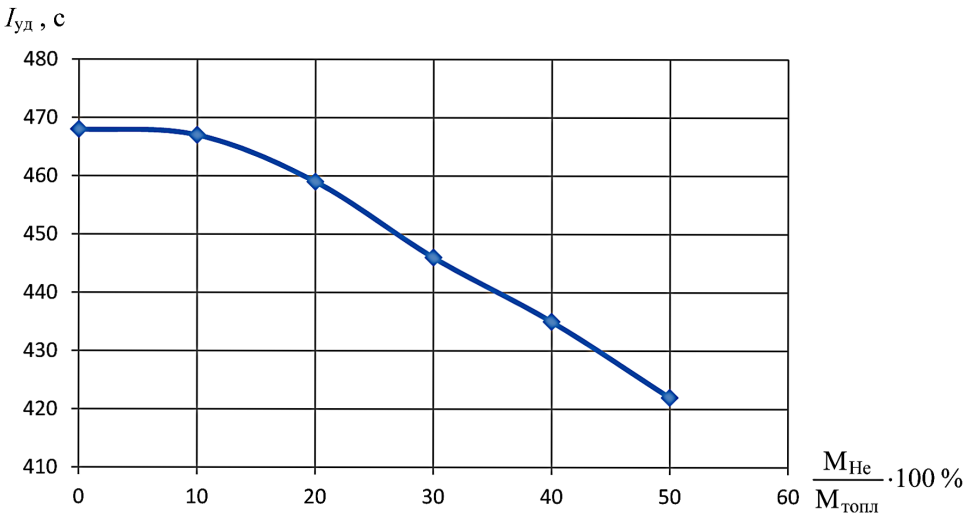


Рис. 4. Зависимость $I_{уд}$ от $\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%$ для топливной пары жидкий F_2 + жидкий H_2

Видно, что использование гелия в качестве добавки к основному топливу (для топливных пар жидкий O_2 + керосин и N_2O_4 + НДМГ) в пределах 5...40% от секундного расхода топлива дает выигрыш в удельном импульсе.

Вместе с тем, как уже указывалось, использование в качестве добавки гелия в ряде случаев может привести к появлению на борту ракеты-носителя дополнительной системы, что ухудшит массовые ха-

рактические и усложнит как всю конструкцию, так и пневмогидросхему двигательной установки.

Выводы.

1. Расчетным путем установлено, что для жидкостного ракетного двигателя, работающего на топливных парах жидкий O_2 + керосин и N_2O_4 + НДМГ, существует возможность увеличения удельного импульса посредством добавления в камеру сгорания нейтрального газа с малой молекулярной массой (гелия).

2. Установлено, что оптимум добавки гелия, который ведет к максимальному увеличению удельного импульса для топливной пары жидкий O_2 + керосин, составляет 14 % от общего секундного расхода топлива, а для топливной пары N_2O_4 + НДМГ — 10 % (рис. 5).

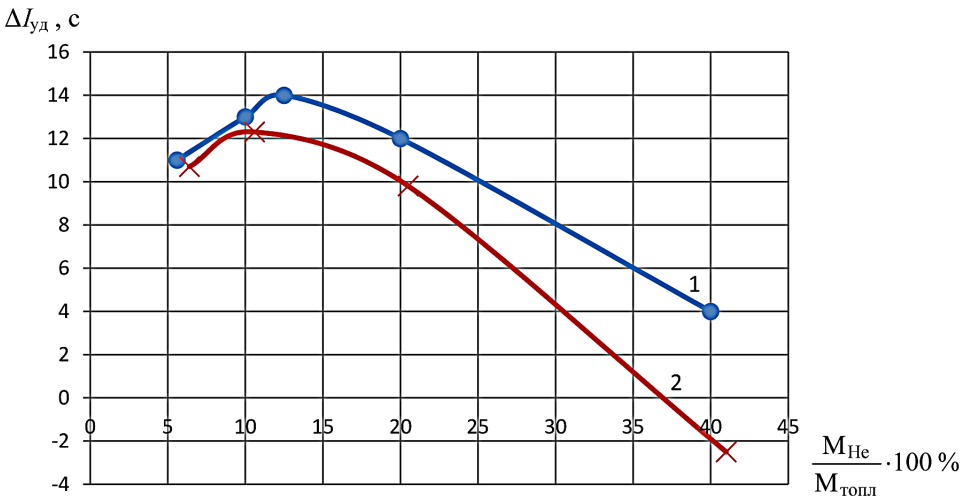


Рис. 5. Зависимость $\Delta I_{уд} = f\left(\frac{M_{He}}{M_{топл}} \cdot 100\%\right)$:

1 — жидкий O_2 + керосин; 2 — N_2O_4 + НДМГ

3. Гелий в качестве добавки целесообразнее всего использовать в случае одномоментной необходимости увеличения тяги, тогда можно воспользоваться имеющимся на борту гелием, применяемым во вспомогательных системах.

4. Добавка гелия в топливные пары жидкий O_2 + жидкий H_2 и жидкий F_2 + жидкий H_2 не дает эффекта увеличения импульса, а наоборот, приводит к его уменьшению.

Литература

[1] Гахун Г.Г., ред. *Конструкции и проектирование ЖРД*. Москва, Машиностроение, 1989. 424 с.

- [2] Чванов В.К. и др. Возможности совершенствования характеристик ЖРД при использовании гелия в качестве топливной добавки. *Тр. НПО «Энергомаш»*. Москва, 2003, № 21.
- [3] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам жидкости и газов*. Москва, Наука, 1972, 720 с.
- [4] Глушко В.П., ред. *Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник*. Москва, Наука, тт. 2, 4, 6.
- [5] Зрелов В.Н., Серегин Е.П. *Жидкие ракетные топлива*. Москва, Химия, 1975, 320 с.
- [6] Козлов А.А. и др. *Системы питания и управления ЖРДУ*. Москва, Машиностроение, 1988, 351 с.
- [7] *Двигатели 1944–2000*. Москва, АКС-Конверсант, 2000.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

С.А. Орлин. Возможность увеличения удельного импульса жидкостного ракетного двигателя при добавлении в камеру сгорания гелия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/697.html>

Орлин Сергей Андреевич родился в 1937 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г.; канд. техн. наук; работал в РКК «Энергия» в области создания космических двигателей, в настоящее время доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; научные интересы — изучение различных способов повышения удельного импульса жидкостных ракетных двигателей. e-mail: orlinsa@yandex.ru