

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ГИБРИДНЫХ РАЗНОФАЗНЫХ ТОПЛИВАХ

Рассмотрены энергетические характеристики комбинированных ракетных двигателей (КРД) на гибридных разнофазных топливах (ГРТ); приведена система уравнений, описывающая их внутреннюю баллистику. Представлены результаты теоретического определения внутрибаллистических и энергетических характеристик этих двигателей. Проведен анализ полученных результатов. Теоретически показана возможность повышения на 3...12 % удельного импульса КРД на ГРТ.

E-mail: maccimov.s@mail.ru; petra-physik@mail.ru

Ключевые слова: *двигатель комбинированный ракетный, реактивный (средний), топливо разнофазное гибридное, горючее твердое (металлизируемое), камера сгорания двухзонная, импульс удельный, комплекс расходный, комплекс тяговый, соотношение компонентов оптимальное, эффективность энергетическая.*

В настоящее время в России и за рубежом ведутся работы по созданию комбинированных ракетных (реактивных) двигателей (КРД), использующих в качестве компонентов топлива высокоэнергетические твердотопливные составы в совокупности с жидкими или газообразными компонентами, которые классифицируют как гибридные разнофазные топлива, сокращенно ГРТ [1]. Актуальность применения ГРТ связана с перспективой повышения энергетики топлива, снижения массы конструкции, технологичностью, улучшенными эксплуатационными показателями и надежностью, а также простотой создания регулируемых двигателей благодаря наличию жидкого компонента, что позволяет избежать сложностей регулирования подачи твердых компонентов [2–4].

С целью повышения энергетических показателей КРД в состав их твердотопливных композиций могут вводить металлические горючие, что позволяет обеспечить устойчивый рабочий процесс в камере сгорания при компактном размещении топлива в составе КРД. В качестве жидких окислителей можно использовать азотную кислоту, кислород, азотный тетроксид.

Использование окружающей среды, например воздуха [5], воды или метана из атмосфер планет типа Юпитер в качестве жидких (газообразных) компонентов топлива, позволяет существенно повысить удельный импульс за счет сокращения массы топлива на борту лета-

где $\dot{m}_{\text{пр}}$ — массовый приход компонентов топлива в камеру сгорания; $\dot{m}_{\text{ТВ}}$ — массовый приход продуктов выгорания твердого топлива, содержащегося на борту; $\dot{m}_{\text{ж}}$ — массовый приход продуктов горения жидкого компонента топлива;

$$\dot{m}_{\text{ТВ}} = F_{\text{ТВ}} \rho_{\text{ТВ}} U_{\text{ТВ}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ТВ}}$ — площадь поверхности горения твердого топлива; $\rho_{\text{ТВ}}$ — плотность твердого компонента топлива; $U_{\text{ТВ}}$ — скорость горения твердого компонента топлива;

уравнение выгорания твердого топлива

$$U_{\text{ТВ}} = A_{\text{T}} p_{\text{к}}^{\nu}, \quad (3)$$

где A_{T} — скорость горения твердого топлива при нормальных условиях; $p_{\text{к}}$ — давление в камере сгорания; ν — показатель степени в законе горения твердого топлива;

$$\dot{m}_{\text{ж}} = \mu F_{\text{ф}} \sqrt{2 \Delta p_{\text{ф}} \rho_{\text{ж}}}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент расхода; $F_{\text{ф}}$ — площадь форсунок; $\Delta p_{\text{ф}}$ — перепад давления на форсунках жидкого топлива; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкого компонента;

$$\Delta p_{\text{ф}} = p_{\text{под}} - p_{\text{к}}, \quad (5)$$

где $p_{\text{под}}$ — давление подачи жидкого компонента;

$$p_{\text{под}} = \rho_{\text{ж}} \frac{v^2}{2} + p_{\text{н}} - K_{\text{T}} \dot{m}_{\text{ж}}^2, \quad (6)$$

где v — скорость движения рассматриваемого среднего аппарата; $p_{\text{н}}$ — статическое давление окружающей среды; K_{T} — коэффициент, учитывающий гидравлические потери;

массовое соотношение компонентов топлива, находящихся на борту и забираемых из окружающей среды,

$$K_{\text{м}} = \frac{\dot{m}_{\text{ТВ}}}{\dot{m}_{\text{ж}}}; \quad (7)$$

уравнение истечения продуктов сгорания через сопло

$$m_{\text{yx}} = \frac{p_{\text{к}} f_{\text{кр}} A(n)}{\sqrt{RT q_{\text{T}}}}, \quad (8)$$

где $f_{\text{кр}}$ — площадь критического сечения сопла; n — условный показатель расширения; $A(n)$ — функция от условного показателя расши-

рения n ; T — температура в камере сгорания; q_r — массовая доля газообразных продуктов в продуктах сгорания; R — газовая постоянная продуктов сгорания;

$$A(n) = \sqrt{m} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{2(n-1)}}; \quad (9)$$

$$n = \left(1 - R \frac{q_r}{C_p} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где C_p — теплоемкость смеси продуктов сгорания;
уравнение давления в камере

$$p_k = \left(\frac{F_T}{F_{кр}} a_T \rho_T \beta_T \right)^{\frac{1}{1-\nu}}, \quad (11)$$

где F_T — площадь горения твердого топлива; a_T — комплекс, зависящий от термодинамических параметров продуктов сгорания; β_T — расходный комплекс;

уравнение тягового комплекса

$$K_T = f \left(\frac{p_H}{p_K}, K_m \right) = \frac{2n}{\sqrt{n^2 - 1}} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_H}{p_K} \right)^{\frac{n-1}{n}}}; \quad (12)$$

уравнение расходного комплекса среднего двигателя

$$\beta_T = \frac{p_K f_{кр}}{\dot{m}_T}; \quad (13)$$

уравнение удельного импульса средних реактивных двигателей

$$J_{уд} = \beta_T K_T - \nu \dot{m}_{ж}. \quad (14)$$

Проведя анализ уравнений (1)–(14), увидим, что влияние свойств рабочего тела на внутреннюю баллистику и удельный импульс КРД проявляется через соотношение компонентов топлива K_m , давление в камере сгорания p_k , геометрию твердого топлива и сопловой части камеры сгорания ($F_T/f_{кр}$), а также термодинамические параметры: температуру продуктов сгорания T , газовую постоянную смеси газов R , условный показатель расширения продуктов сгорания n , массовую долю газа в продуктах сгорания q_r .

Учитывая многофункциональную зависимость параметров КРД на ГРТ от значительного количества факторов и недостаточную их

изученность, методически расчет внутренней баллистики и энергетических параметров КРД на ГРТ проводили в следующей последовательности. Предварительно были выполнены термодинамические расчеты параметров продуктов сгорания твердого металлизированного горючего с жидкими окислителями в широком диапазоне изменения соотношения компонентов топлива $K_m = 1 \dots 10$ и давления в камере сгорания $p_k = 1,0 \dots 15,0$ МПа.

Указанные расчеты для ряда гибридных топлив на основе металлизированного горючего с жидкими окислителями, в качестве которых рассматривали перекись водорода, азотную кислоту и воду, показали, что для среднего двигателя теоретический удельный импульс максимален для компонентов топлива на основе металлизированного твердого горючего с водой из окружающей среды.

Результаты расчетов для комбинации топлива твердое металлизированное горючее + вода приведены на рис. 2 в виде зависимости относительного энергетического комплекса $\bar{E} = (RTq_r) / (RTq_r)_{\max}$ как функции соотношения компонентов топлива K_m и давления в камере сгорания p_k . Максимальное значение параметра $(RTq_r)_{\max}$ в расчетах соответствует величине ~ 7 МДж/кг. Проанализировав расчетные кривые (см. рис. 2), видим, что с увеличением K_m уменьшается величина произведения RTq_r . Это связано с характерным снижением температуры T , газовой постоянной R и массовой доли парогазовой фазы q_r .

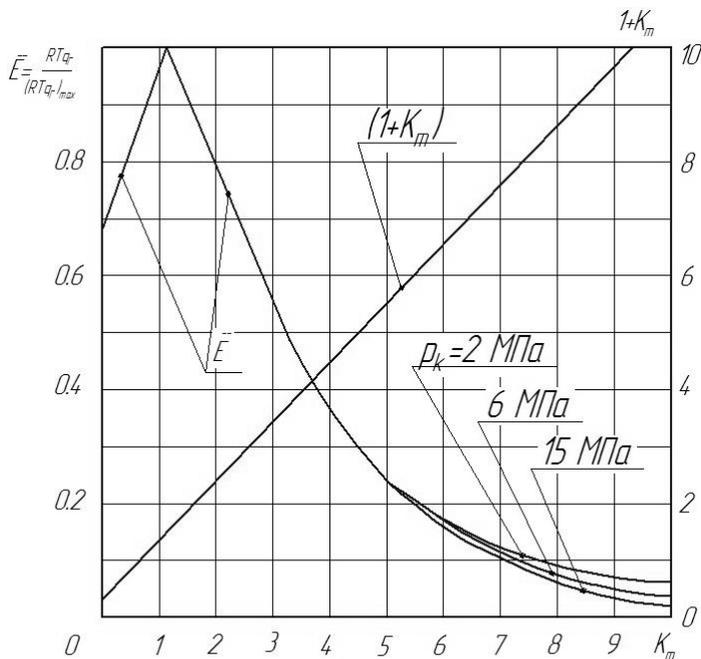


Рис. 2. Теоретическая зависимость энергетического комплекса \bar{E} от K_m и p_k

Затем с помощью системы уравнений (1)–(14) по известным термодинамическим параметрам продуктов сгорания рассчитывали внутривальностические характеристики применительно к КРД на ГРТ итерационно-параметрическим методом. Результаты расчетов давления в камере сгорания $p_k = F(K_m; F_T/f_{кр})$, расходного $\beta_T = F(K_m; p_k)$ и тягового $K_T = F(K_m; p_k/p_H)$ комплексов, а также удельного импульса $J_{уд} = F(K_m; p_k/p_H)$ для $p_H = 0,1$ МПа представлены в табл. 1–4. При проведении указанных расчетов степень расширения сопла варьировали в диапазоне отношения $p_k/p_H = 20 \dots 150$.

Таблица 1

**Давление в камере сгорания p_k , МПа,
при различных соотношениях $F_T/f_{кр}$**

K_m	$F_T/f_{кр} = 16,5$	$F_T/f_{кр} = 37$	$F_T/f_{кр} = 60,23$
1	3,527	4,531	8,243
2	4,540	5,841	11,408
3	5,158	6,507	12,517
4	5,514	6,800	12,848
5	5,695	6,888	12,864
6	5,735	6,846	12,384
7	5,673	6,690	11,380
8	5,504	6,428	10,378
9	5,228	6,103	9,656
10	4,909	5,806	8,761

Таблица 2

**Расходный комплекс β_T , м/с, при различных
давлениях в камере сгорания и соотношениях $F_T/f_{кр}$**

K_m	$p_k = 2$ МПа, $F_T/f_{кр} = 16,5$	$p_k = 6$ МПа, $F_T/f_{кр} = 37$	$p_k = 15$ МПа, $F_T/f_{кр} = 60,23$
1	2342,23	2342,23	2342,23
2	3191,38	3191,38	3191,38
3	3617,45	3617,45	3617,45
4	3703,76	3703,76	3752,30
5	3389,94	3594,59	3735,69
6	3772,78	3871,89	3594,11
7	4040,37	3951,75	3370,12
8	4194,7	3913,00	3103,19
9	4256,24	3787,12	2782,98
10	4217,62	3588,73	2433,62

Тяговый комплекс K_t , м/с, при различных соотношениях p_k/p_n

K_m	$p_k/p_n = 2$	$p_k/p_n = 6$	$p_k/p_n = 15$
1	1,410	1,624	1,733
2	1,378	1,567	1,689
3	1,353	1,521	1,655
4	1,335	1,485	1,649
5	1,345	1,521	1,716
6	1,370	1,553	1,722
7	1,391	1,577	1,806
8	1,402	1,590	1,829
9	1,406	1,595	1,844
10	1,410	1,595	1,850

Таблица 4

Удельный импульс $J_{уд.}$, м/с, при различных соотношениях p_k/p_n

K_m	$p_k/p_n = 20$	$p_k/p_n = 60$	$p_k/p_n = 150$
1	3288	4100	4565
2	4393	5204	5688
3	4871	5774	6208
4	4987	5855	6308
5	5007	5803	6155
6	5575	6183	6508
7	5830	6366	6467
8	5960	6415	6093
9	6051	6378	5376
10	6117	6194	4676

Согласно полученным результатам, расходный комплекс и удельный импульс имеют максимальные значения при разных по величине соотношениях компонентов топлива. На рис. 3 приведены зависимости оптимального соотношения компонентов топлива для максимумов удельного импульса (кривая 1) и расходного комплекса (кривая 2). Указанный эффект связан с характерным изменением тягового комплекса, уменьшающегося в области $K_m = 1 \dots 4,2$ и увеличивающегося в области $K_m = 4,2 \dots 10$. С ростом давления в камере p_k разница в величине соотношения компонентов K_m , где достигают максимумов расходного комплекса и удельного импульса, возрастает.

Анализ полученных теоретических результатов позволил обосновать способ повышения энергетической эффективности КРД на ГРТ за счет оптимизации подачи жидкого компонента в камеру сгорания с соплом. Эффект увеличения удельного импульса может быть реализован за счет подачи в камеру сгорания среднего КРД на ГРТ части жидкого компонента, обеспечивающей максимальное значение расходного комплекса, а остальная часть этого компонента должна быть подана в область за критическим сечением сопла (область сверхзвукового потока). Благодаря этому достигают максимального значения удельного импульса. Возмущающее воздействие подачи жидкости в сверхзвуковую часть сопла не приведет к изменению давления в камере сгорания и, следовательно, не повлияет на величину расходного комплекса, так как, согласно формуле (13), расходный комплекс зависит только от расхода твердого компонента топлива и не зависит от расхода жидкого компонента, забираемого из окружающей среды. При этом тяговый комплекс K_T с увеличением соотношения компонентов топлива K_m сверх требуемого для получения максимального значения β_T возрастает, стремясь к максимуму (см. табл. 3). Предельное увеличение удельного импульса (в процентах) возможно при перераспределении части окислителя из камеры сгорания в сопло (кривая 3 на рис. 3). Удельный импульс оценен по формуле (14), в которую подставлены значения, соответствующие максимальным значениям β_T и K_T . Понятно, что при реализации предложенного способа повышения энергетической эффективности КРД на ГРТ при подаче расхода в сверхзвуковую часть сопла потери в сопловой части будут возрастать, а прирост удельного импульса снизится.

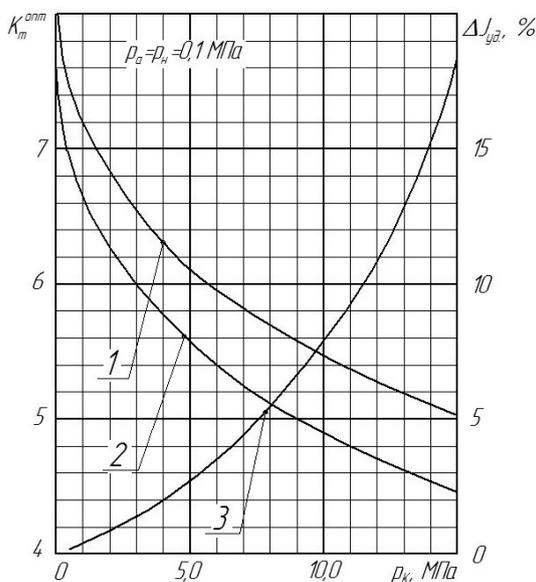


Рис. 3. Расчетные зависимости оптимального K_m^{opt} от p_k/p_n для максимальных значений β_T и $J_{уд}$ и прироста удельного импульса $\Delta J_{уд}$ от p_k/p_n

Аналогичный эффект можно получить и в ракетных двигателях. Для проведения таких оценок на рис. 4 приведены расчетные зависимости расходного комплекса и удельного импульса в функции соотношения компонентов топлива K_m для степени расширения $p_k/p_n = 60$. Максимумы расходного комплекса и удельного импульса для РД совпадают и соответствуют существенно меньшим значениям $K_m = 1 \dots 1,5$, чем для средних двигателей (см. рис. 3). Они расположены в области максимальной температуры продуктов сгорания, минимального значения доли газовой фазы, что по данным приводит к значительному снижению удельного импульса и надежности работы двигательной установки в целом. Для повышения энергетических характеристик РД на КРД в этом случае целесообразно изменить номенклатуру топлив, применив в качестве горючего жидкое топливо, а в качестве окислителя — твердое, для чего необходимо выполнить дополнительные всесторонние исследования.

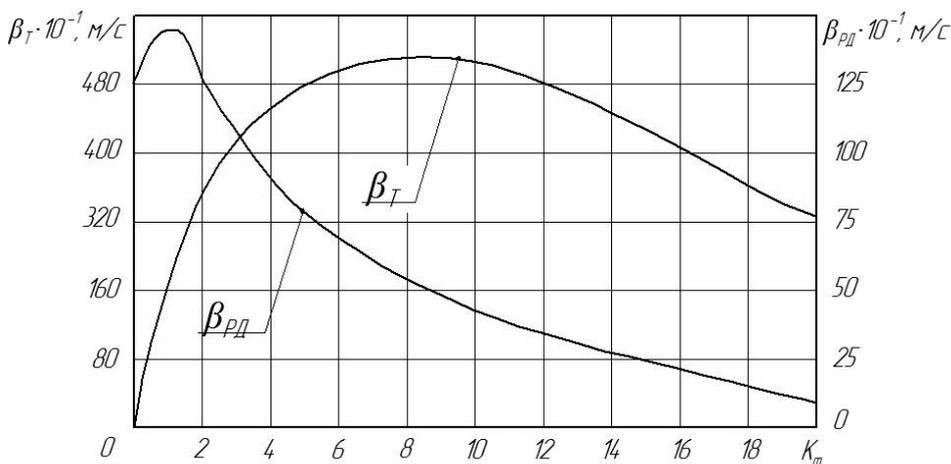


Рис. 4. Зависимость β_T и β_{RD} от K_m при $p_k = 2 \text{ МПа} = \text{const}$

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена модель для расчета внутрибаллистических и импульсно-тяговых характеристик КРД на ГРТ в широком диапазоне изменения соотношения компонентов, давления в камере сгорания, степени расширения и отношений $(F_T/f_{кр})$, в которой учтены многопараметрические связи указанных параметров с внутренними и внешними факторами.

2. Аналитически выявлены оптимальные значения соотношений компонентов топлива для максимальных значений расходного комплекса и удельного импульса средних (реактивных) и ракетных двигательных установок на твердом металлизированном горючем и жидком окислителе.

3. В результате выявленных особенностей поведения расходного и тягового комплексов в зависимости от соотношения твердого и жидкого компонентов топлива, степени расширения и давления в камере теоретически предложен способ повышения энергетических характеристик (удельного импульса среднего ГРД на ГРТ на 3...12 %) путем перераспределения подачи части жидкого компонента из камеры в сопло.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы в гибридных ракетных двигателях / А.М. Губертов, В.В. Мионов, Р.Г. Голлендер и др.; под ред. А.С. Коротеева. М.: Наука, 2008. 405 с.
2. Колпаков А.С. Резонансные режимы виброожигания порошков и их использование в технологических процессах. Екатеринбург: Промышленная теплоэнергетика, 2006.
3. Архипов В.А., Волков С.А. Регулирование РДТТ с использованием физических способов воздействия на горение ТРТ // Изв. вузов. 2004. № 4. С. 1–4.
4. Гусаченко Л.К. Режимы работы тепловых ножей // Физика горения взрыва. 2010. № 1. С. 3–13.
5. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. С. 526, 535.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012