

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ РДТТ С ДВУХСОСТАВНЫМИ ЗАРЯДАМИ

ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ):

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н., профессор

Николай Юрьевич Кочетков, к.т.н., старший преподаватель

Термогазодинамика двигателей на твердом топливе с двухсоставными зарядами существенно отличается от аналогичных двигателей, в составе которых используется один монолитный заряд. Этот факт обусловлен именно тем, что величина подмеса продуктов сгорания низкотемпературного топлива существенно зависит от начальной конфигурации заряда и закона совместного выгорания. Термодинамические расчеты показали немонотонность изменения основных параметров в зависимости от величины подмеса охлаждающего топлива. Для определяющих параметров зафиксированы экстремумы. Показана независимость влияния термодинамических параметров камеры сгорания и газодинамических параметров сверхзвукового сопла на величину удельного импульса тяги двигателя и дополнительных потерь, связанных с переходом на двухсоставные заряды. Показана необходимость учета динамики выгорания зарядов и особенностей термогазодинамики на профилирование сверхзвуковых сопел.

The thermogasodynamics of solid fuel engines with twocomponent charges differs significantly from similar engines, which use one monolithic charge. This fact is due precisely to the fact that the amount of the combustion products of low temperature fuel significantly depends on the initial configuration of the charge and the law of joint burnout. Thermodynamic calculations have shown the nonmonotonicity of changes in the main parameters depending on the amount of the cooling fuel admixture. Extremes are fixed for the defining parameters. The independence of the influence of the thermodynamic parameters of the combustion chamber and the gasdynamic parameters of the supersonic nozzle on the magnitude of the specific impulse of the engine thrust and additional losses associated with the transition to two component charges is shown. It is shown that it is necessary to take into account the dynamics of charge burnout and the features of thermogasodynamics for profiling supersonic nozzles.

Ключевые слова: турбулентность, термогазодинамика, двухсоставной заряд, подмес, дополнительные потери удельного импульса.

Keywords: turbulence, thermogasodynamics, twocomponent charge, suspension, additional loss of specific impulse.

Создание новых ракетных двигателей сопровождается не только появлением оригинальных конструктивных решений, но и ростом энергетических характеристик твердых топлив. В результате температура продуктов сгорания (ПС) приближается к 4000 К. Этот уровень природные материалы не выдерживают, в связи с чем нужны новые конструктивные решения [1]. Производители топлив интенсивно работают над созданием новых рецептов с повышенной энергетикой. За рубежом появляются новые, так называемые "тяжелые окислители" типа CL, у которых прогнозируются более высокие температуры продуктов сгорания.

Сегодня современная прикладная химия может предложить синтезированные топлива с высокими энергетическими характеристиками, сопоставимыми с топливами современных ЖРД, работающими на компонентах кислород+керосин, кислород+метан и, в перспективе, кислород+водород. Но при создании таким путем топлив на новом качественном уровне, сопоставимом с уровнем ЖРД, возникает ряд трудностей. Продукты сгорания приобретают новые свойства. Новые химически активные элементы более интенсивно воздействуют на детали конструкции и разрушают их.

Детали соплового блока РДТТ в основном состоят из углеродных композиций и графитов [2]. Так, например, в дозвуковой части утолщенного сопла применяются углепластики. В трансзвуковой части и непосредственно в критике + углерод+углеродные композиционные материалы (УУКМ) с пространственным плетением каркаса и плотные графиты. В сверхзвуковой части + сверхлегкие и сверхпрочные УУКМ. Эти материалы надежно работают при температурах не более 3700 К [3]. При достижении температуры ~4000 К и давления у поверхности материала $P_k \sim 100$ атм, углерод переходит в состояние характерное для тройной точки, когда материал одновременно существует как твердое вещество, жидкость и газ. Для конструкции такое состояние недопустимо. Повышение температуры до названных величин приводит к появлению новых механизмов разрушения стенок деталей соплового блока из углеродных материалов:

1. Интенсифицируется химический унос углерода из-за допол-

нительного взаимодействия с компонентами (H_2 и N_2).

2. Добавляется новая составляющая уноса стенок, связанная с испарением углерода.

3. В связи с большими температурными перепадами в тонком слое материала, омываемого продуктами сгорания, возникает поверхностное трещинообразование, что приводит к поверхностному шелушению.

4. Возможен механизм сдувания жидкого слоя под воздействием высоконапорного потока, особенно в области критического сечения.

Конструкторские решения

Для решения проблемы стойкости материальной части соплового блока были предложены двухсоставные заряды, состоящие из высокотемпературного и низкотемпературного топлив. Низкотемпературное топливо, расположенное вблизи соплового блока, создает более холодную область из продуктов сгорания + газовую завесу.

Известно несколько патентов на тему о двухсоставных зарядах. Например, в патенте на конструкцию РДТТ [4] для защиты конструкции утолщенной части сопла от воздействия продуктов сгорания твердого топлива служит теплозащитный элемент из графита или из абляционного материала на основе фенольной смолы, размещенный над утолщенной частью сопла и разрушающийся при нагреве. Недостатком такой конструкции является низкий коэффициент использования уносимого материала, что приводит к увеличенной пассивной массе конструкции и снижению эквивалентного удельного импульса тяги.

Известен патент на ракетный двигатель [5], содержащий камеру сгорания, сопло и заряд из двух частей, одно из топлив которого имеет пониженное содержание окислителя в продуктах сгорания. Это необходимо для сохранения углеродного сопла от химического воздействия. Недостаток данной конструкции в том, что не предусмотрено снижение температуры продуктов сгорания, что исключает тепловую составляющую при разрушении

углеродного сопла.

Известен также патент [6], где предлагается решить задачу снижения уносов за счет двухсоставного заряда из низкотемпературного топлива. При этом основной заряд из высокотемпературного топлива с продуктами сгорания >4000 К закрывается низкотемпературным, расположенным вблизи омываемой части сопла и создающим "холодную" завесу (рис. 1).

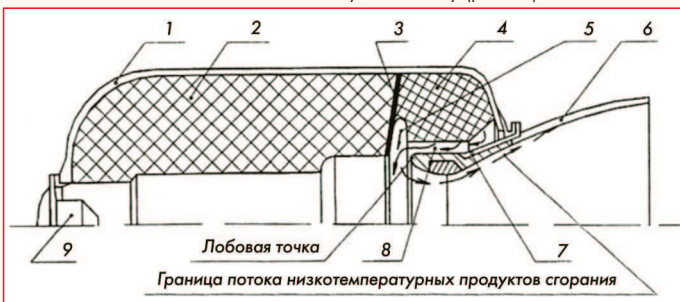


Рис. 1 Вариант конструкции двухсоставного заряда: 1 - камера сгорания; 2 и 4 - заряды; 3 - эластичная мембрана; 5 - проточка; 6 - сопло; 7 - уплотненная область течения; 8 - проточный канал; 9 - воспламенитель

Недостатком такой конструкции может оказаться одновременное увеличение окислительного потенциала B_m продуктов сгорания, поскольку современные твердотопливные составы обладают таким свойством, что снижение температуры ПС приводит к увеличению окислительного потенциала и, собственно, к увеличению уносов со стенок углеграфитовых конструкций.

Термодинамические расчеты

Последний факт был тщательно проанализирован в работе [7] на примере термодинамических расчетов пары топлив высокотемпературного (основного) и подмешанного к нему низкотемпературного (дополнительного) топлив. Расчеты проводились по программе АСТРА для условного топлива и различных процентных соотношений подмеса. Было показано, что с увеличением величины подмеса G температура заметно падает (рис. 2), а величина окислительного потенциала растет (рис. 3). Это означает,

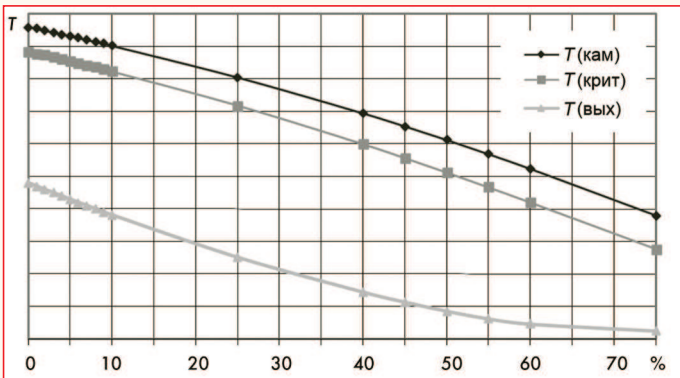


Рис. 2 Зависимость температуры от содержания низкотемпературного топлива

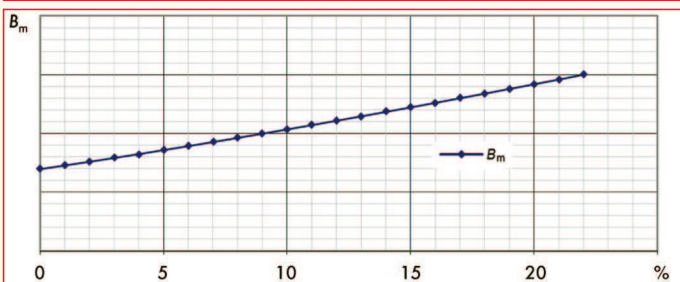


Рис. 3 Изменение значений окислительного потенциала

что в соответствии с формулой И.В. Бояринцева [8] величина линейного уноса материала конструкции может практически не изменяться после мероприятий, связанных с заменой монозаряда на двухсоставной. При этом был отмечен любопытный факт.

Изменение значения удельного импульса тяги с увеличением подмеса ведет себя немонотонно и не всегда падает. Вначале оно растет, достигает своего максимального значения и только потом снижается (рис. 4).

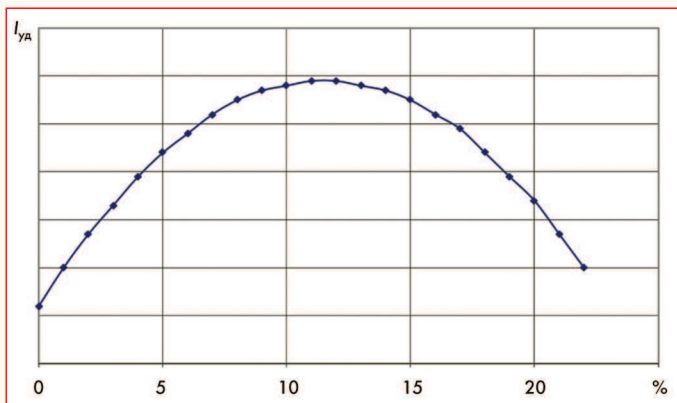


Рис. 4 Изменение удельного импульса тяги в зависимости от содержания охлаждающего топлива, %

Он максимален при оптимальном значении, которое для выбранной пары "основное + дополнительное" топливо составляет величину порядка 11 % подмеса в основное высокотемпературное топливо. Любопытным оказалось и то, что и коэффициент теплообмена тоже имеет минимум в том же месте (рис. 5).

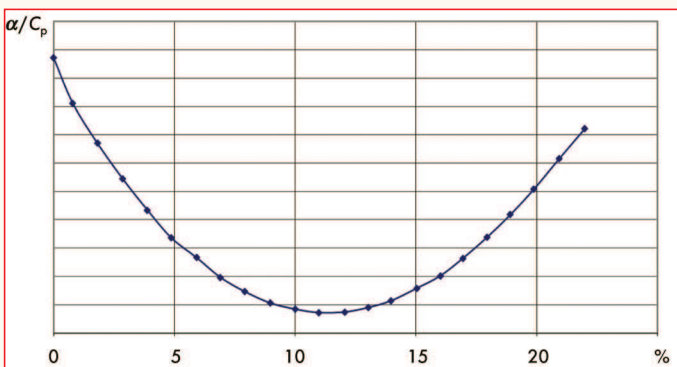


Рис. 5 Изменение значений коэффициента теплообмена в зависимости от содержания охлаждающего топлива

Аналогично ведет себя коэффициент теплопроводности (рис. 6), расходный комплекс β , плотность продуктов сгорания, и другие параметры.

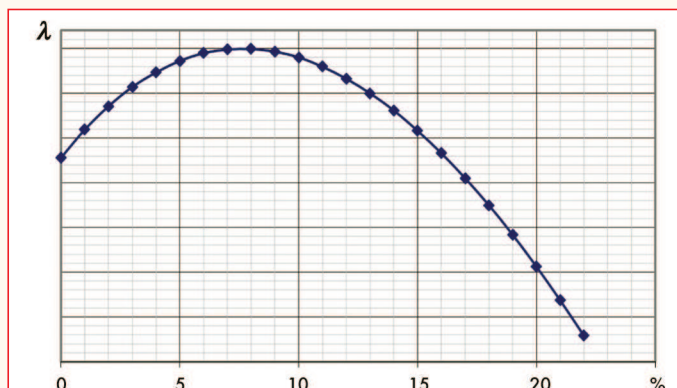


Рис. 6 Изменение значений коэффициента теплопроводности в зависимости от содержания охлаждающего топлива

Этот ранее неизвестный факт можно объяснить тем, что при совместном сгорании высокотемпературного металлизированного твердого топлива и небольшого процента безметалльного низкотемпературного, происходит дополнительное тепловыделение благодаря более полному сгоранию частиц металла в среде продуктов сгорания низкотемпературного топлива, которое

имеет большой окислительный потенциал. Оно дополнительно окисляет высокотемпературное топливо. С увеличением величины процента подмеса начинают существенно проявляться свойства низкотемпературного топлива.

Соотношения для удельного импульса тяги

Величину пустотного удельного импульса тяги записывают в виде:

$$I_{удп} = W_a + \frac{F_a \cdot P_k}{G} \cdot \frac{P_a}{P_k}$$

Для сопла со степенью расширения на выходе $r = r_a/r_{кр} = 1$, формула принимает вид:

$$I_{удпкр} = W_{кр} + \frac{F_{кр} \cdot P_k}{G} \cdot \pi_{кр}$$

или $I_{удпкр} = W_{кр} + \beta \cdot \pi_{кр}$.
После подстановки

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \cdot RT_{кр} \quad \beta = \sqrt{\frac{RT_k}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \quad \text{и} \quad \pi_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

получаем

$$I_{удпкр} = \alpha_{кр} \left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Или, выражая через параметр β , получим $I_{удпкр} = \beta \cdot (k+1) \cdot \pi_{кр}$.

Далее преобразуем уравнение для пустотного удельного импульса обычного сверхзвукового сопла, домножив и поделив его на величину удельного импульса сопла со степенью расширения 1:

$$I_{удп} = \beta \cdot (k+1) \cdot \pi_{кр} \cdot \frac{W_a + \frac{P_a \cdot F_a}{G}}{\alpha_{кр} \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

После преобразований окончательно получим:

$$I_{удп} = \beta \cdot (k \cdot \pi_{кр} \cdot \lambda_a + \pi_a \cdot r_a^2)$$

Полученная газодинамическая функция, стоящая в скобках справа от комплекса β , не зависит от давления в камере. Её значение изменяется от величины $(k+1)\pi_{кр}$ при $\lambda = 1$ до бесконечности при $\lambda = \lambda_{пред}$.

Эта функция $\zeta = R_{удп}/\beta = k \cdot \pi_{кр} \cdot \lambda_a + \pi_a \cdot r_a^2$ представленная на рис. 7, отражает изменение удельного импульса тяги в зависимости от степени расширения сопла [9].

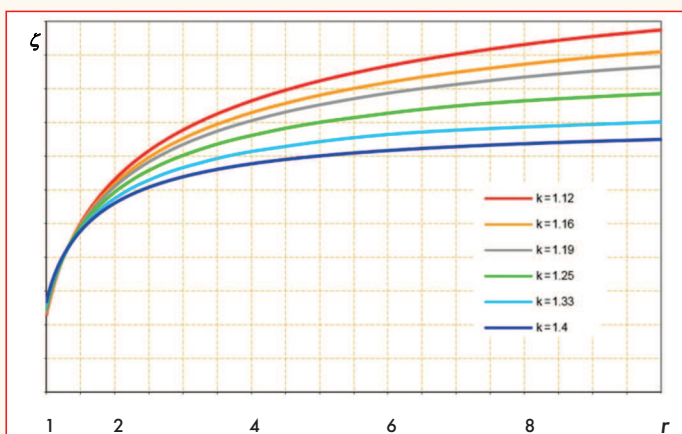


Рис. 7 Изменение коэффициента удельного импульса тяги в зависимости от степени расширения сопла

Видно, что она возрастает с увеличением степени расширения сопла r_a , и интересно, что в точке $r_a \approx 1,3$ функция не зависит от коэффициента адиабаты k . Этот факт можно использовать при моделировании процессов РДТТ с помощью, например, воздушных продувок.

Термодинамические расчеты показывают немонотонную зависимость расходного комплекса с максимумом от величины

подмеса (рис. 8), который при выгорании двухсоставного заряда одновременно будет зависеть и от времени работы двигателя.

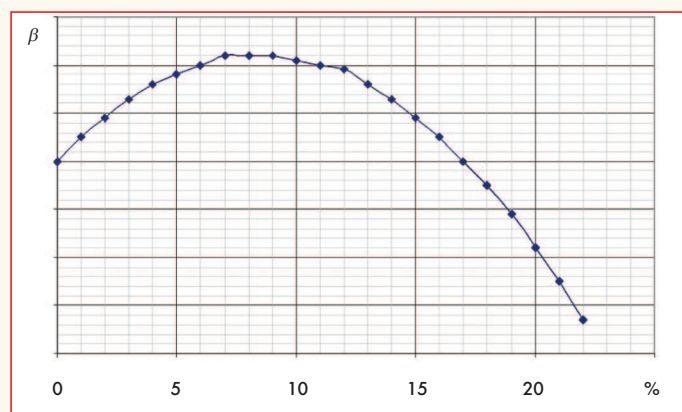


Рис. 8 Изменение параметра beta в зависимости от содержания охладителя в составе общей массы топлива

Сама же зависимость для удельного импульса тяги состоит из произведения двух разделяющихся независимых переменных: расходного комплекса, отвечающего за камеру сгорания и газодинамической функции, отвечающей за сверхзвуковое сопло.

Величина расходного комплекса - чисто термодинамическая, а функция дзета - чисто газодинамическая, и поэтому расчеты интегральных величин можно проводить независимо для камеры и сопла. Покажем это на примере потерь удельного импульса тяги для двигателей с двухсоставными зарядами.

Они представляют собой три вида потерь:

- дополнительные потери удельного импульса тяги из-за несовершенства формы заряда;
- потери удельного импульса тяги при частичной замене основного высокотемпературного топлива на низкотемпературное;
- потери из-за несовершенства профилирования сверхзвуковой части сопла РДТТ с двухсоставными зарядами.

Дополнительные потери удельного импульса тяги из-за несовершенства формы заряда

Функция $\zeta(k, \lambda_a)$ в случае конкретного сопла принимает постоянное значение и тогда величина пустотного удельного импульса тяги становится пропорциональной параметру β : $R_{удп} \sim \beta$.

Воспользовавшись этим фактом, отметим появление нового вида дополнительных потерь удельного импульса тяги, обусловленного несовершенством заряда твердого топлива. Под несовершенным зарядом будем понимать такой заряд, осциллограмма давления которого при работе отличается от заданного постоянного значения давления или значений, соответствующих заданному закону выгорания. Этот вид потерь удельного импульса тяги может быть записан в следующем виде:

$$\xi_{нз} = \frac{\beta_{тз} - \beta(\tau)}{\beta_{тз}}$$

Величина $\beta_{тз} = f(P_{к ном})$ определяется в соответствии с заданной величиной номинального давления $P_{ном}$. Текущие значения $\beta(\tau)$ рассчитываются в соответствии с кривой выгорания $P(\tau)$ по программе для расчета термодинамики с учетом значений подмеса \bar{G} , полученных при расчете выгорания заряда, например, по программе на стадии проектирования значения. Значения $P(\tau)$ могут быть определены по программе FILIKON [10]. В соответствии с этим на рис. 9 представлена зависимость $\beta(P_k)$.

Из графика видно, что при больших уровнях давления в камере сгорания зависимость $\beta(P_k)$ достаточно слабая, тогда очевидно и потери на небольшое несовершенство заряда будут незначительны. Но при отдельных условиях, когда абсолютный уровень давлений низкий $P_k < 50$ атм или когда разность в давлениях существенна, например область глубокого спада, эти потери могут быть заметными. Они могут достигать долей и даже единиц процентов удельного импульса тяги.

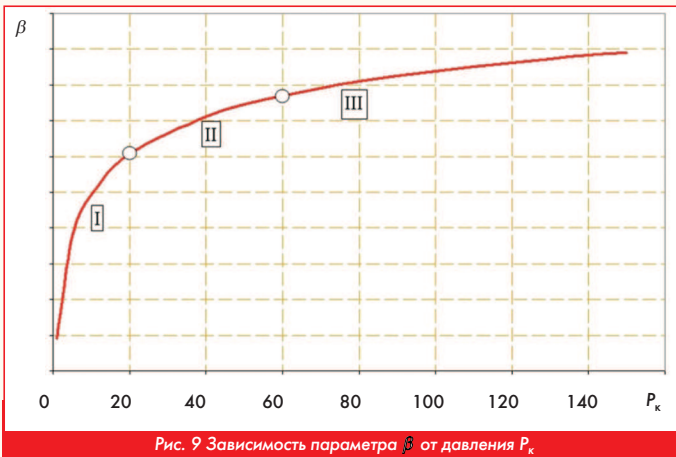


Рис. 9 Зависимость параметра β от давления P_k

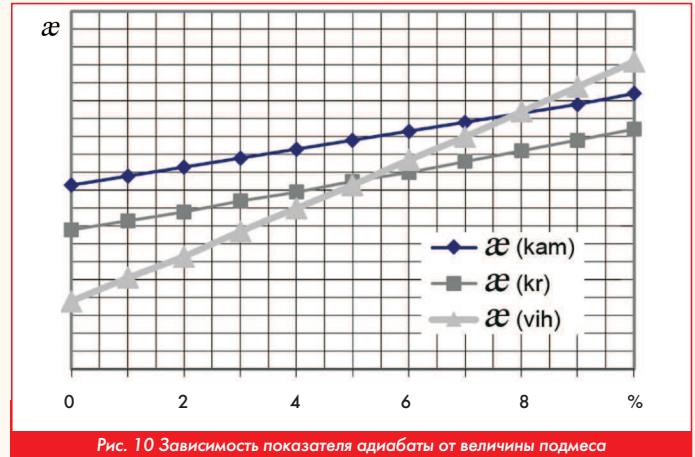


Рис. 10 Зависимость показателя адиабаты от величины подмеса

Потери удельного импульса тяги при частичной замене основного высокотемпературного топлива на низкотемпературное

При использовании двухсоставных зарядов температура продуктов сгорания снижается. В предельном случае, когда потоки перемешались полностью, температура снижается до величины $T_{см}$. Этой температуре соответствует удельный импульс тяги $R_{уд-см}$, отличный от удельного пустотного импульса монотоплива $R_{уд-м}$. В этом случае дополнительные потери составляют:

$$\xi_2 = \frac{R_{уд-м} - R_{уд-см}}{R_{уд-м}} \text{ или } \xi_2 = \frac{\beta_m - \beta_{см}}{\beta_m}.$$

Здесь β_m - текущий параметр β для РДТТ с монозарядом; $\beta_{см}$ - величина β для смеси продуктов сгорания двигателя с двухсоставным зарядом. Величина $\beta_{см}$ определяется в каждый момент времени для конкретной величины подмеса. При оптимальном выборе массового соотношения основного и дополнительного зарядов вместо потерь может реализоваться приобретение удельного импульса тяги.

Потери из-за несовершенства профилирования сверхзвуковой части сопла РДТТ с двухсоставными зарядами

Из изложенного в предыдущей главе материала следует, что есть ещё потери, связанные с несовершенством профилирования сверхзвуковой части сопла РДТТ с двухсоставным зарядом. Действительно, если в процессе выгорания заряда формируется состав продуктов сгорания, существенно зависящий от величины подмеса, то и основной параметр, по которому производится расчет профиля сверхзвукового сопла - коэффициент адиабаты α , также будет зависеть от величины подмеса. Это означает, что при неравномерном выгорании двухсоставного заряда сопло, рассчитанное на минимальный режим, будет недодавать удельного импульса тяги в соответствии с изменением величины подмеса. Оно будет работать периодически в условиях либо перерасширения, либо недорасширения. Степень нерасчетности сопла будет определяться зависимостью $\alpha(\bar{G})$ при постоянной величине M_0 - числа Маха на срезе сопла. Характерная зависимость коэффициента адиабаты от величины подмеса низкотемпературного топлива $\alpha(\bar{G})$ представлена на рис.10.

Из рисунка видно, что с увеличением подмеса значение ко-

эффициента адиабаты заметно возрастает, что говорит о возможном и достаточно существенном изменении формы профиля сверхзвуковой части сопла. Формально потери из-за несовершенства профилирования сопла РДТТ с двухсоставным зарядом могут быть записаны через газодинамическую функцию $\zeta(\alpha, \tau)$, которая зависит от режимов выгорания и, в первую очередь, от величины подмеса.

Из изложенного выше следует прямая зависимость термодинамических параметров от величины подмеса продуктов сгорания низкотемпературного топлива в РДТТ с двухсоставными зарядами, величину которого можно определить с помощью специально созданных для этого программ по расчету их выгорания [11].

Литература

1. Ахмадеев В.Ф., Бурский Г.В., Филимонов М.Л. и др. Внутренняя баллистика РДТТ, М. Машиностроение, 2007 г.
2. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе. Под редакцией Л.Н. Лаврова. М. Машиностроение, 1993 г.
3. Губертов А.М., Кочетков Ю.М., Филимонов М.Л. и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М. Машиностроение, 2004 г.
4. Патент США № 3648461, МПК F 02 K 1/00.
5. Патент США № 6226979, МПК F 02 K 9/28.
6. Патент РФ № 2225524, С1, RU.
7. Н.Ю. Кочетков. Разработка математического аппарата для расчета двухсоставных зарядов перспективных твердотопливных двигательных установок космического назначения. ж. РКТ ч. 1. Расчет, проектирование, конструирование и испытание космических систем № 1, 2010 г.
8. В.И. Бояринцев, Ю.В. Звягин. Исследования разрушения углеродистых материалов при высоких температурах. Ж. Теплофизика высоких температур 13, N5, 1975 г.
9. Н.Ю. Кочетков. Энергетика и профилирование сверхзвуковых сопел РДТТ с двухсоставными зарядами // Двигатель № 1, 2010 г.
10. Н.Ю. Кочетков. Точное проектирование моно- и двухсоставных зарядов РДТТ // Двигатель № 5, 2009 г.
11. Н.Ю. Кочетков. Математическое моделирование выгорания двухсоставных зарядов // Двигатель № 4, 2009 г.

Связь с авторами: swgeorgy@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ. Электродвигатель из 3D-принтера

Английскими инженерами создан первый в мире электрический двигатель, изготовленный при помощи технологии трехмерной печати (3D-ЭД). На первом этапе отработывалась технология трехмерной печати корпуса электродвигателя с каналами охлаждения. Затем была разработана технология и изготовлены другие основные компоненты. В итоге получился 3D-ЭД с удельной

мощностью, превышающей традиционные двигатели сопоставимых габаритов, для изготовления которых требуется много различного оборудования и... ручной труд. Необходимо отметить значительное уменьшение массы нового двигателя.

В настоящее время проводится оптимизация технологии для обеспечения массового производства 3D-ЭД.

