

УДК 662.62

Е.Б. Устименко, Л.Н. Шиман, Л.И. Подкаменная

ГП НПО «Павлоградский химический завод», Павлоград

## ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

*По результатам выполненных расчетных и экспериментальных исследований определены энергетические, реологические и внутрибаллистические характеристики композиций пастообразных топлив для применения их в ракетных двигателях и газогенераторах с регулируемым режимом работы.*

**Ключевые слова:** пастообразные ракетные топлива, регулируемые ракетные двигатели, тяговые параметры, расходные параметры.

### Введение

Одним из направлений развития современной ракетной техники является создание ракетных двигателей (РД) и газогенераторов (ГГ) с регулируемым режимом работы, где в качестве энергетической композиции рассматривается применение гелеобразных (ГРТ) и пастообразных (ПРТ) ракетных топлив. Конструкции РД и ГГ с регулируемым режимом работы позволяют управлять тяговыми характеристиками и вектором движения ракет. Тем самым обеспечивается эффективность применения ракет для которых предполагается маневрирование по траектории полета, а также многообразие запуска и выключения РД и ГГ [1].

Известные ГРТ для регулируемых РД представляют собой бинарные композиции из горючей и окислительной фазы, которые подаются в камеру сгорания РД отдельно. Такие ГРТ появились как одно из направлений дальнейшего развития жидкостных РД, т.к. для их применения используются основные элементы и компоненты аналогичные как для жидкостных РД. Первые разработки ГРТ начались в 50-х годах прошлого века на основе загущенных углеводородных топлив, таких как керосин, с добавками металлических порошков алюминия, бора или магния, которые использовались в качестве горючей фазы. Следующее поколение ГРТ включало вместо углеводородного горючего – гидразин и его производные (НА, UDMH, MMN) или нитрометан (NM). При этом в качестве окислителя использовалась азотная кислота, в том числе насыщенная окислами азота (IRFNA) или перекись водорода или пентафторид хлора. В качестве загущающих компонентов в горючей фазе таких топлив нашли применение производные эфиров целлюлозы, дисперсный оксид кремния (аэросил), соли жирных кислот и другие [2, 3].

Гелеобразная структура ГРТ позволяет уменьшить испаряемость компонентов и обеспечить стабильность работы вытеснительной системы при подаче компонентов в камеру сгорания РД или ГГ. При своих высоких энергетических параметрах бинарные композиции ГРТ обладают рядом недостатков, ограничивающих их широкое применение. Так,

для них необходимо использование двух изолированных баков и систем подачи компонентов смеси в камеру сгорания, а высокая коррозионная активность и токсичность применяемых компонентов топлива требуют использования дорогостоящих конструкционных материалов и специальных правил безопасного обращения. Поэтому, такие ГРТ применяются в основном в крупногабаритных РД и ГГ аппаратов космического назначения.

Для исключения указанных недостатков в 70 – 80-х годах прошлого века были разработаны унитарные ГРТ на основе жидких нитросоединений (нитрометан, нитроэтан и др.) которые не требуют наличия двух баков и двух систем подачи горючей и окислительной фазы в камеру сгорания РД, т.к. эти составляющие входят в состав композиции такого ГРТ. Подача такого унитарного ГРТ в камеру сгорания осуществляется единой вытеснительной системой, которая обеспечивает регулирование его расходных характеристик и соответственно внутрибаллистических параметров РД и ГГ. Однако, унитарные ГРТ, имеющие небольшие значения по плотности (менее  $1,3 \text{ г/см}^3$ ) и теплоте сгорания – до  $6200 \text{ кДж/кг}$ , обладают ограниченными объемными энергетическими характеристиками. Соответственно, унитарные ГРТ находят применение в низкоимпульсных РД, а также двигателях коррекции, и в ГГ с нетоксичным выхлопом продуктов сгорания.

Исследования, проведенные в 80-х годах прошлого века, по возможности использования неотвержденных композиций, применяемых для изготовления твердых РТ (ТРТ), в качестве топлив для регулируемых РД и ГГ позволили определить новое направление РТ, так называемых пастообразных топлив (ПРТ). Такие ПРТ относятся к унитарным РТ и представляют собой гетерогенную смесь дисперсной фазы окислителя и энергетических добавок в среде жидкого неотверждаемого полимера. В качестве окислителя в ПРТ нашли применение перхлораты и нитраты аммония и щелочных металлов, которые широко применяются в составах ТРТ. Энергетические добавки ПРТ, в виде порошков алюминия, бора, титана, также заимствованы из технологий ТРТ. В отличие от унитарных ГРТ пастообраз-

ные РТ обладают большей плотностью (до  $1,7 \text{ г/см}^3$ ) и большей величиной теплоты сгорания – до  $10500 \text{ кДж/кг}$ . Кроме того, ПРТ не содержат высокотоксичных, испаряющихся компонентов и не обладают высокой коррозионной активностью. Указанные положительные свойства ПРТ делают их наиболее предпочтительными для использования в регулируемых РД и ГГ широкого спектра назначения.

Регулирование внутрибаллистических характеристик и, соответственно, тяговых параметров регулируемых РД и ГГ, при использовании ПРТ, осуществляется путем изменения расходных характеристик при подаче его в камеру сгорания. Подача ПРТ в камеру сгорания производится методом вытеснения его из камеры снаряжения через фильтреную решетку. Таким образом, немаловажное значение для эффективной работы вытеснительной системы имеет обладание композицией ПРТ необходимых свойств текучести. Масса ПРТ должна сохранять структурную однородность и тиксотропность, но при этом вытесняться в камеру сгорания с определенным расходом при небольшом избыточном давлении. Высокие энергетические параметры и адаптированность ПРТ к существующим технологическим процессам изготовления, вызывают необходимость в проведении оценки различных его характеристик для выработки требований к регулируемым РД и ГГ.

**Целью работы** является изучение энергетических, реологических и внутрибаллистических характеристик модельных композиций ПРТ для применения их в регулируемых РД и ГГ.

### Основной раздел

РД являются тепловыми машинами, в которых энергия РТ преобразуется в движущую силу продуктов сгорания. Известно, что тяга РД определяется как:  $R = I_{уд} * G$ , где  $I_{уд}$  – удельный импульс тяги, м/с,  $G$  – массовый расход продуктов сгорания, кг/с. Удельный импульс тяги характеризуется энергетическими параметрами ПРТ и напрямую зависит от теплоты его сгорания и физических свойств образующихся молекулярных продуктов сгорания. Массовый расход продуктов сгорания зависит от скорости горения ПРТ и поверхности горения слоя ПРТ. Таким образом, для регулируемых РД, снаряженных однородным ПРТ с одинаковой теплотой сгорания (т.е.  $I_{уд} = const$ ), динамическое регулирование величины тяги возможно за счет изменения величины расхода продуктов сгорания ( $G$ ). Это достигается путем интенсификации или замедления подачи ПРТ в камеру сгорания в процессе работы РД. Схематично конструкция РД с регулируемой подачей ПРТ изображена на рис. 1, где из вытеснительной камеры (ВК), под действием избыточного давления ( $P$ ), ПРТ подается в камеру сгорания (КС) через фильтреную решетку, исключая переход зоны горения из камеры сгорания в вытеснительную камеру.

В качестве модельного ПРТ регулируемых РД и ГГ для исследования энергетических, реологиче-

ских и внутрибаллистических характеристик была взята гетерогенная композиция на основе углеводородного горючего-связующего, в виде неотверждаемого жидкого каучука, и окислителя, в виде порошкообразного перхлората аммония. Для получения композиций с повышенной теплотой сгорания использовали добавку алюминиевого порошка.

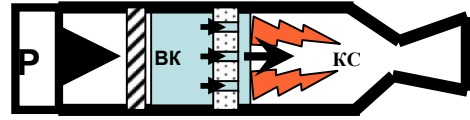


Рис. 1. Схема работы регулируемого РД

В ходе проведенных исследований выполнена расчетная и экспериментальная оценка энергетических и реологических характеристик для некоторых композиций ПРТ, с использованием метода симплекс решетчатого планирования и диаграмм Шеффе. Оценка энергетических характеристик проводилась по величине удельного импульса тяги, вычисленной по программе термодинамических расчетов REAL при соотношении  $P_k / P_a = 40 / 1$ . Полученные зависимости для величины удельного импульса тяги, представленные на рис. 2, показывают, что композиции ПРТ, при содержании перхлората аммония (Пр. А) более 75 %, обладают удельным импульсом более  $1950 \text{ м/с}$ . При добавлении в композицию ПРТ алюминиевого порошка (Пр. Al) в количестве до 10 % величина удельного импульса может быть получена на уровне  $2200 - 2400 \text{ м/с}$ .

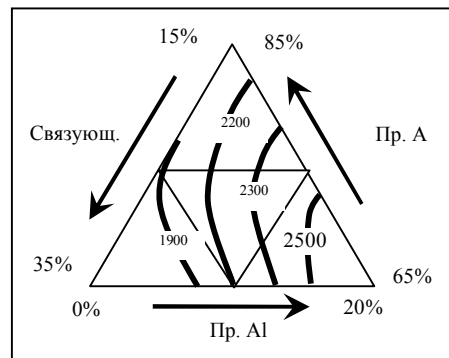


Рис. 2. Диаграмма «состав-свойство» для величины удельного импульса тяги, м/с

Оценка реологических параметров модельных композиций ПРТ проводилась по величине минимального давления ( $F_T$ ), достаточного для начала установившегося течения массы ПРТ через фильтренное устройство. Представленные на рис. 3 зависимости показывают, что при содержании перхлората аммония в модельных композициях ПРТ более 75 %, процесс установившегося течения топливной массы начинается при приложении избыточного давления не менее  $0,4 - 0,8 \text{ МПа}$ . При добавлении в композицию ПРТ алюминиевого порошка в количестве до 10 % величина такого избыточного давления для начала процесса течения массы возрастает до  $1,2 - 1,6 \text{ МПа}$ , при содержании связующего 18 – 25%, и возрастает до  $2,2 - 2,6 \text{ МПа}$  при содержании связующего менее 18%.

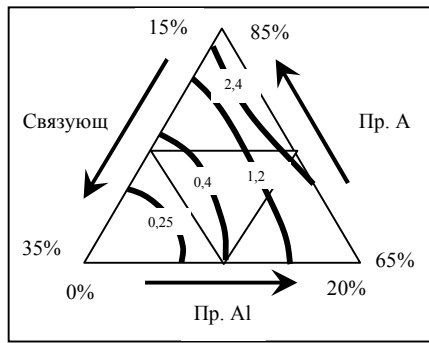


Рис. 3. Диаграмм «состав-свойство» для величины минимального избыточного давления течения ( $F_t$ ), МПа

Следует отметить, что величина минимального давления установившегося течения выше 2,0 МПа является конкурирующей с уровнем давления в камере сгорания и поэтому композиции с такой характеристикой не будут эффективными для использования в РД и ГГ с регулируемым режимом работы. Для определения расходных характеристик были выбраны две композиции ПРТ с содержанием связующего 18% – композиция 1, которая не содержит алюминиевый порошок и композиция 2 с содержанием 10% алюминиевого порошка. Представленные на рис. 4 зависимости относительных расходных характеристик ( $G_p/G_0$ ) от минимального давления установившегося течения показывают, что для композиции 1 (обозначена цифрой 1) при изменении давления в вытеснительной камере РД от 0,5 до 1,5 МПа массовый расход ПРТ при подаче в камеру сгорания увеличивается почти в 50 раз. Соответственно, во столько же раз возможно изменение тяговых характеристик РД. Для композиции 2 (обозначена цифрой 2), вследствие достаточно высоких значений давления, необходимого для начала установившегося течения топливной массы через фильерное устройство (рис. 3), в диапазоне изменения давления от 0,5 до 1,5 МПа, изменение величины массового расхода меньше чем для композиции 1 и составляет только в 8 раз.

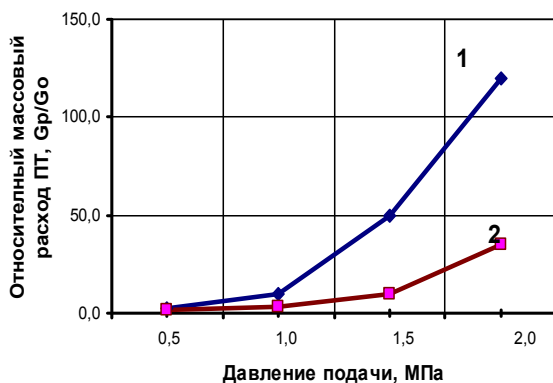


Рис. 4. Изменение относительного массового расхода композиций ПРТ от давления установившегося течения

Учитывая возможность глубокого регулирования РД с использованием ПРТ, важной характеристикой является устойчивость процесса горения ПРТ в условиях низких давлений в камере сгорания, что происходит при снижении подачи топливной массы в камеру сгорания РД.

Представленная на рис. 5 зависимость скорости горения композиции 1 ПРТ от давления показывает, что она стабильно сгорает в диапазоне давлений от 0,5 до 5,5 МПа без затуханий и пульсаций. При этом зависимость скорости горения ( $U_T$ ) от давления ( $P_K$ ) в указанном диапазоне может быть выражена зависимостью:  $U_T = 2,5 * (P_K)^{0,4}$ .

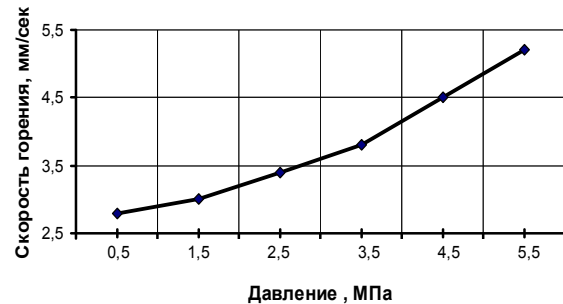


Рис. 5. Зависимость скорости горения композиции 1 от давления в камере сгорания

## Выводы

Таким образом, в ходе выполненных работ определены оптимальные композиции ПРТ, которые обеспечивают необходимые энергетические характеристики, устойчивость процесса горения в широком интервале изменения давления в камере РД. При этом, достигнутые параметры управляемого фильерного истечения таких композиций ПРТ позволяют регулировать подачу топливной массы в камеру сгорания с необходимым расходом и, соответственно, регулировать тяговые параметры РД. Полученные результаты показывают возможности высокоэнергетических пастообразных композиций для использования их в качестве ПРТ регулируемых РД и ГГ, а также могут быть использованы для определения параметров работы регулирующих устройств таких РД и ГГ.

## Список литературы

1. Иванченко А.Н. Состояние разработки дросселируемых ракетных двигательных установок на унитарном пастообразном топливе / А.Н. Иванченко, С.Г. Бондаренко // Проблемы высокотемпературной техники. – 2007. – С. 40-50.
2. Hodge K., Crofoot T., Nelson S. Gelled Propellants for Tactical Missile Applications // Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 1999. – 7 p.
3. Shai R., Benveniste N. The Status of Gel Propellants // Combustion of Energetic Materias. – 2000. – 24 p.

Наступила в редколлегию 27.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
И ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ**

Е.Б. Устименко, Л.Н. Шиман, Л.И. Подкаменная

*По результатам выполненных расчетных и экспериментальных исследований определены энергетические, реологические и внутривалистические характеристики композиций пастообразных топлив для применения их в ракетных двигателях и газогенераторах с регулируемым режимом работы.*

**Ключевые слова:** *пастообразные ракетные топлива, регулируемые ракетные двигатели, тяговые параметры, расходные параметры.*

**HIGH ENERGY COMPOSITIONS FOR ROCKET MOTORS  
AND GAS-GENERATORS WITH CONTROLLABLE OPERATION MODE**

E.B. Ustimenko, L.N. Shyman, L.I. Podkamennaya

*Based on results of calculated and experimental investigations, energy, rheological and internal-ballistic parameters of paste-like propellant compositions were determined for their application in rocket motors and gas-generators with controllable operation mode.*

**Keywords:** *paste-like rocket fuels, managed rocket engines, hauling parameters, expense parameters.*