

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ПИРОСМЕСЕЙ

В.Д. Головатенко, А.В. Головатенко

DEFINITION OF INTERNAL BALLISTIC PARAMETERS OF THE FUELS BASED ON PYROTECHNICAL MIXTURES

V.D. Golovatenko, A.V. Golovatenko

Рассматриваются причины разбросов внутренних баллистических характеристик (ВБХ), полученные в экспериментах при сжигании смеси порошков алюминия и перхлората калия различной фракции. Дается теоретическое обоснование зависимости ВБХ от физико-химического состояния состава продуктов горения пиротехнической смеси в момент их образования и нахождения в камере сгорания.

Ключевые слова: алюминий, перхлорат калия, субокислы алюминия, дисмутация субокислов, нестабильность внутренних баллистических характеристик, состав продуктов горения в камере сгорания.

The reason for big variation of values of internal-ballistic parameters obtained at burning of mixture of different fractions of aluminium and sodium perchlorate are considered. Theoretical base is given for the dependence of internal-ballistic parameters on physicochemical condition of burning products at the moment of their formation and presence in the ignition chamber.

Keywords: aluminium, sodium perchlorate, aluminium sub-oxides, dismutation of sub-oxides, instability of intra-ballistic characteristics, composition of ignition products in combustion chamber.

По результатам экспериментальных работ [1] на одном и том же двигателе при горении одинаковых по массе образцов стехиометрической смеси топлива, в состав которого входит алюминиевый порошок фракции со средним диаметром от 5,38 мкм (фракция В-1) до 15,15 мкм (фракция GG-1) и перхлорат калия, исследователем Де Марки в камере сгорания получены уровни давления, отличающиеся по величине более чем в 40 раз. Проведенный этим автором анализ причин нестабильности уровня давления не в полной мере объясняет физико-химические процессы, протекающие в камере сгорания при горении смеси топлива, содержавшего компоненты $KClO_4$ и Al .

Одной из причин разброса давления, зафиксированного в экспериментальных работах [1, 2], при сгорании одной и той же массы топлива является состав продуктов горения топливной смеси: хлористый калий и оксид алюминия (если пренебречь диссоциацией хлористого калия). Оксид алюминия, как известно, в газообразном состоянии не наблюдается и таким образом не может влиять на уровень регистрируемого давления в камере. Следовательно, хлористый калий является единственным продуктом, переходящим в газообразное состояние. Для перехода хлористого калия в газообразное состояние при температуре горения состава порядка 3600 К требуется затратить около 80 % теплоты для достижения точки кипения хлористого калия, а остальные 20 % теплоты затрачиваются на нагрев газа до температуры горения смеси топлива.

В тепловом приходе возникают отклонения, обусловленные образованием соединений кислорода с алюминием [3] и тепловыми потерями на нагрев конструкции камеры сгорания, что в итоге влияет на 20 %-ную часть теплоты, которая и определяет величину давления продуктов горения, совершающих работу. А по параметру давления в основном и производят оценку физико-химической стабильности состава топлива как в рассматриваемых экспериментах работы [1], так и при отработке устройств малой мощности [4].

С точки зрения зажигательных свойств состава $KClO_4 - Al$ при горении малой массы навески изменение величины теплоприхода на 10 % является вполне допустимым отклонением в проектируемой конструкции. Однако для рассматриваемых в исследованиях [4] устройств, работа

Расчет и конструирование

в которых производится расширяющимися истекающими газами, такие отклонения однозначно неприемлемы.

Поэтапный учёт прихода и расхода энергии газа в процессе совершения работы устройством малой мощности характерен для пиротехнических систем и отличается от расчётов, выполняемых для силовых ракетных двигателей.

Соотношение давления в камере и теплоты продуктов горения можно выразить уравнением

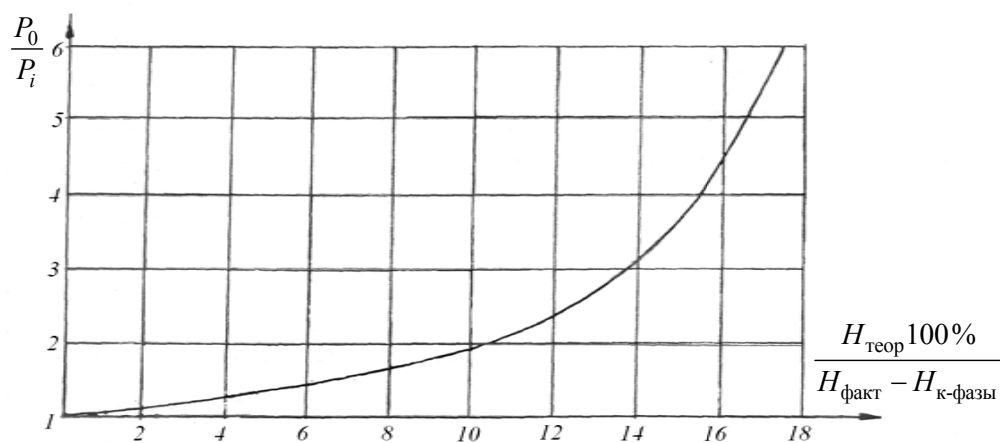
$$\frac{P_0}{P_i} = \frac{H_{\text{теор}}}{H_{\text{фак}} - H_{\text{к-фазы}}}, \quad (1)$$

где P_0 – теоретический уровень давления; P_i – фактический уровень давления; $H_{\text{теор}}$ – теоретическое значение теплосодержания продуктов горения; $H_{\text{фак}}$ – фактическое значение теплосодержания продуктов горения; $H_{\text{к-фазы}}$ – теплосодержание конденсированной фазы в продуктах горения.

Отношение $\frac{P_0}{P_i}$ характеризует изменение давления в камере.

На рисунке представлен график изменения давления в камере сгорания в зависимости от случайного отклонения в теплосодержании продуктов горения.

Вычисление произведено по уравнению (1) при пренебрежении зависимости свойств веществ от давления и температуры.



Изменение давления в камере сгорания в зависимости от случайного отклонения в теплосодержании продуктов горения

График объясняет результаты экспериментов Де Марки [1] и наглядно иллюстрирует, что достаточно случайного отклонения в теплосодержании хлористого калия до 19 % для возникновения 40-кратного разброса по давлению, а для двукратного разброса достаточно отклонения порядка 10 % в тепловыделении при горении пиротехнического состава смеси.

Другой не менее важной причиной разброса давления является отклонение в длительности процессов физико-химических превращений веществ различной фракции, влияющей на состав продуктов горения. Например, при горении образца навески с фракцией порошка алюминия В-1 время физико-химических превращений составляет 50 мс, а при горении навески с фракцией GG-1 – около 400 мс.

Уравнение (1) и график (см. рисунок) могут быть использованы для выявления химических соединений, образующихся в камере сгорания при совершении газами работы [5]. В этом случае свойства хлористого калия, как и других галогенидов щелочных металлов, могут быть использованы в качестве индикатора при определении степени изменения теплообразования продуктов горения, определяющих уровень давления в камере сгорания. Своеобразная избирательность галогенидов позволяет выявить в пламени химические соединения, отсутствующие среди конечных продуктов горения металла, но влияющие на ВБХ.

Согласно теоретическому обоснованию А.Ф. Беляева о влиянии физических свойств компо-

нентов продуктов горения на разброс давления [5], наибольшую работу, отнесенную к одному килограмму взрывчатого вещества, называемую потенциалом взрывчатого вещества, определяют по уравнению

$$E^* = E + \overline{C}_v' \cdot 298 = \overline{C}_v' \cdot T_1, \quad (2)$$

где E^* – максимально возможная удельная теплота взрыва (горения); E – удельная теплота взрыва (горения); $\overline{C}_v' \cdot 298$ – запас энергии, которым обладает один килограмм продуктов горения при стандартной температуре ($298 \text{ K} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$) калориметрических измерений и который может быть обращен в работу при беспредельном расширении и охлаждении до абсолютного нуля; T_1 – начальная (максимальная) температура взрыва.

Если в исследованиях А.Ф. Беляева [6] (за исключением смеси бертолетовой соли с алюминиевым порошком) величина $\overline{C}_v' \cdot 298$ мала по сравнению с теплотой взрыва и в расчетах обычно отбрасывается, то в случае с пиротехническими составами величина, заменённая в уравнении (2) на величину $\overline{C}_v' \cdot (T_{\text{кип}} + 273)$, уже значительна и должна учитываться в расчётах. Следовательно, уравнение (2) можно преобразовать в следующий вид:

$$E^* = \overline{C}_v' \cdot T_1 - \overline{C}_v' \cdot (T_{\text{кип}} + 273). \quad (3)$$

Следует отметить, что для поэтапного и детального расчёта прихода и расхода теплоты горения топлива, как это рекомендует и

С. Сарнер [7], необходимо знать энергетическое состояние продуктов разложения и горения в момент их образования [8].

Таким образом, причины разбросов ВБХ смеси алюминия и перхлората калия обусловлены в основном образованием субокислов алюминия. Полученные данные, основанные на факте, что время реакции дисмутации субокислов больше времени их пребывания в камере сгорания, предлагается использовать для оценки продуктов горения смесей твёрдого топлива с различными фракциями порошков металла.

Литература

1. De Marchi, V.S. *AJAA Reprint № 265-352, AJAA / V.S. De Marchi. – 2-nd Annual Meeting. – 1965. – July 26–29.*
2. Андреев, К.К. *Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев. – М.: Оборониздат, 1960.*
3. Головатенко, В.Д. *К анализу горения частицы алюминия. Условие образования высшего окисла алюминия в камере сгорания. Проектирование, производство и эффективность летательных аппаратов / В.Д. Головатенко. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.*
4. *Вспомогательные системы ракетно-космической техники. – М.: Мир, 1970.*
5. Головатенко, В.Д. *Механизмы колебательных процессов горения металлической частицы и их аналитические представления / В.Д. Головатенко, А.В. Головатенко // Полет. – 2009. – № 2.*
6. Беляев, А.Ф. *Горение, детонация и работа взрыва конденсированных веществ / А.Ф. Беляев. – М.: Наука, 1968.*
7. Сарнер, С. *Химия ракетных топлив / С. Сарнер. – М.: Мир, 1969.*
8. Головатенко, В.Д. *Состояние продуктов горения при их образовании / В.Д. Головатенко, А.В. Головатенко // Полет. – 2009. – № 1.*

Поступила в редакцию 16 июня 2011 г.

Головатенко Владислав Денисович. Заслуженный конструктор Российской Федерации, ведущий инженер-конструктор, ОАО «ОКБ «Новатор», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов – исследование импульсных процессов, протекающих при горении топлив в устройствах малой мощности систем автоматизации летательных аппаратов. Тел.: (343) 264-64-16.

Vladislav D. Golovatenko. The Honored designer of the Russian Federation, the principal designer of EMDB «Novator», St. Petersburg. The area of scientific is the analysis of impulse processes, running in low capacity mechanisms of automation systems during fuel-burn. Phone: (343) 264-64-16.

Головатенко Андрей Владиславович. Консультант, ОАО «ОКБ «Новатор», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов-методологические вопросы общей физики. Тел.: 8-904-608-7974.

Andrey V. Golovatenko. Consulting engineer of EMDB «Novator», St. Petersburg. Scientific interests-Metrological issues of general physics. Phone: 8-904-608-7974.