

С.Н. Бондаренко, преподаватель, АПБУ

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЗАРЯДОВ

(представлено д-ром техн. наук Ю.А. Абрамовым)

Проведен анализ существующих моделей скорости горения твердотопливных зарядов и предложена модель скорости горения применительно к зарядам генераторов огнетушащего аэрозоля.

Скорость горения — важный показатель эффективности и безопасности применения зарядов АОС, так как характеризует скорость образования огнетушащего аэрозоля и его подачу в защищаемый объем для тушения.

Знание величины скорости горения состава позволяет определять расход аэрозоля и закон его изменения, время подачи аэрозоля, выбрать требуемый способ инициирования, конфигурацию заряда, позволяет оценить допустимые значения давления и температуры в корпусе работающего генератора.

Различают два типа количественных характеристик скорости горения заряда АОС: линейную скорость U_L и массовую скорость U_M .

Под линейной скоростью горения твердого топлива понимают скорость перемещения поверхности горения в глубь заряда. Поскольку топлива горят параллельными слоями, направление скорости горения всегда совпадает с нормалью к поверхности горения.

Проведенный анализ [1, 2, 3] показал, что скорость горения твердотопливных составов АОС зависит от многих факторов, из которых основными являются следующие:

1) физико-химические свойства компонентов АОС и их соотношение. Чем больше сродство горючего к кислороду и чем быстрее идет процесс разложения окислителя, тем выше скорость горения. Чем меньше теплота образования исходных веществ и чем больше теплота образования продуктов сгорания, тем выше скорость горения состава;

2) степень измельчения и перемешивания компонентов. Чем выше дисперсность компонентов и чем равномернее перемешаны компоненты, тем выше скорость горения состава. Чаще всего наибольшее влияние на скорость горения составов оказывает величина дисперсности окислителя;

3) плотность прессованных зарядов ρ_T . С повышением давления прессования скорость горения увеличивается до определенного значения и практически не превышает его;

4) влажность составов θ . При ее повышении скорость горения снижается;

5) начальная температура составов T_H . С повышением температуры скорость горения увеличивается (для различных составов степень влияния начальной температуры в различных температурных диапазонах может изменяться);

6) начальное давление. Чаще всего с повышением давления скорость горения увеличивается;

7) катализаторы (флегматизаторы) горения. Введение катализаторов (чаще небольших добавок 1-5 % масс.) способствует (без заметной перекомпоновки рецептур) увеличению скорости горения;

8) давление в камере сгорания генератора и скорость его изменения \dot{p} .

Влияние первого и третьего факторов особо выражено для так называемых баллиститных зарядов, второй фактор сильнее проявляется у смесевых зарядов, которые изготавливаются способом свободного литья или литья под давлением. Как показывает анализ [4,5], введение катализаторов приводит к существенным изменениям скорости горения для обоих видов зарядов.

Под законом горения понимают функциональную связь между линейной скоростью горения и параметрами заряда.

В настоящее время не существует строгих теоретических методов для расчета скорости горения твердотопливных зарядов. Создание таких методов затруднено сложностью описания процесса горения, его многостадийностью, наличием большого количества физических и химических факторов. Поэтому при расчете параметров рабочего процесса в частности, используют следующую зависимость

$$u = f_1(p) \cdot f_2(T_H) \cdot f_3(\dot{p}), \quad (1)$$

где u – линейная скорость горения, а функции f_1 , f_2 и f_3 обычно предполагают независимыми друг от друга и определяются экспериментально.

Рассмотрим зависимость скорости горения от давления $u = f_1(p)$

Для зарядов, выполненных методом прессования в диапазоне низких давлений, согласно [4] зависимость между скоростью горения и давлением выражается формулой

$$u = u_1 \cdot p^v, \quad (2)$$

где u_1 – единичная скорость горения, значение которой зависит от состава заряда; v – безразмерный параметр.

С ростом давления степенная зависимость переходит в линейную

$$u = u_1 \cdot (1 + b \cdot p), \quad (3)$$

где b – термохимическая константа.

Закон горения литевых зарядов обычно выражают формулами такого же вида, как и для баллистических. Взятые для отдельных интервалов давления, они с приемлемой точностью аппроксимируют экспериментальную кривую.

Величина параметра v для современных зарядов, согласно [1], может меняться в пределах 0,36 – 0,5. Более высокие значения v характерны для прессованных зарядов. Для зарядов, изготавливаемых методом литья, скорость горения в меньшей степени зависит от давления.

В [5] предложена зависимость скорости горения от давления в следующем виде:

$$u = u_1 \cdot \left(\frac{p}{p_{\text{атм}}} \right)^v, \quad (4)$$

для степенного закона горения,

$$u = u_1 \cdot \left(b \cdot \frac{p}{p_{\text{атм}}} + 1 \right) \quad (5)$$

для линейного закона горения. Здесь $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

В зависимостях (4)–(5) вместо абсолютного давления p введено отношение этого давления к атмосферному давлению на уровне моря.

Зависимость скорости горения от начальной температуры заряда T_H , предложенная в [5], определяется формулой

$$u = u_{\text{ном}} \cdot \frac{B}{B - (T_H - 20)}, \quad (6)$$

где B – термохимическая константа заряда, $u_{\text{ном}}$ – единичная скорость при стандартной температуре.

В работе [2] рассматриваются зависимости скорости горения от температуры, которые выражаются одной из следующих формул:

$$\frac{u_1(T_H)}{u_1(T_0)} = 1 + D \cdot (T_H - T_0); \quad (7)$$

$$\frac{u_1(T_H)}{u_1(T_0)} = \exp(D \cdot (T_H - T_0)). \quad (8)$$

Здесь $u_1(T_H), u_1(T_0)$ – единичные скорости горения при текущей T_H и стандартной температуре T_0 , при этом принято $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Константа $D \approx 1/B = (1+5) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, большие её значения относятся к прессованным зарядам, а меньшие – к литьевым.

Зависимость скорости горения от температуры при постоянном давлении описывается выражением:

$$u(T_H) = u(T_0) \cdot [1 + (\pi_u)_p \cdot (T_H - T_0)] \quad (9)$$

Здесь $(\pi_u)_p = \left(\frac{\partial \ln u}{\partial T_H} \right)_p$ – температурный коэффициент, который

принимает значения $(0.001+0.005) \text{ K}^{-1}$, причем большие значения соответствуют прессованным зарядам.

Рассмотренные зависимости применимы только в условиях стационарного горения. Во время работы генератора наблюдаются режимы, когда горение заряда протекает при изменяющемся давлении, следовательно, скорость горения носит нестационарный характер. Наиболее фундаментальные исследования в области горения твердотопливных зарядов при переменном давлении принадлежат Я.Б. Зельдовичу. Основные его идеи применены к расчету давления и скорости горения в переходном режиме. Б.В. Новожилов, исходя из предположения о линейной зависимости скорости горения от начальной температуры заряда, приходит к следующему выражению для нестационарной скорости горения:

$$u = u_1 \cdot p^v \cdot \frac{1 + b_T \cdot T_0}{2} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot b_T \cdot \chi}{(1 + b_T \cdot T_0) \cdot u_1 \cdot p^v} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_0} \right] \quad (10)$$

где b_T – термохимический коэффициент, зависящий от состава заряда; χ – коэффициент тепловых потерь; y – толщина прогретого слоя заряда.

Скорость горения в условиях быстроменяющегося давления отличается от стационарного значения, это изменение может быть приближенно описано, например, зависимостью

$$\frac{u(\dot{p})}{u(0)} = 1 + \phi \cdot \left(\frac{\alpha \cdot v}{u^2 \cdot p} \right) \cdot \dot{p}, \quad (11)$$

где $\phi = (0.5+2)$; α – коэффициент температуропроводности заряда.

Вместе с тем, как показали исследования [5], при диаметре заряда порядка десятков сантиметров, что характерно для большинства модификаций генераторов, эффект нестационарности горения должен проявляться слабо. Это справедливо в пределах предположения, что продукты горения воспламенительного состава не реагируют с продуктами газификации заряда и что температура газовой смеси в камере близка к температуре горения основного заряда при данном давлении. В период переходных процессов, когда давление изменяется плавно, теория нестационарного горения предсказывает пренебрежимо малое отличие квазистационарной от нестационарной скорости горения. Будем считать, что при изменении давления скорость горения изменяется квазистационарным образом. Подставляя в (1) выражение (4) с учетом (8) получим зависимость скорости горения заряда от давления в камере и начальной температуры заряда в виде

$$u = u_a \cdot \left(\frac{p}{p_{\text{атм}}} \right)^{\nu} e^{\beta T_0}, \quad (12)$$

где u_a – скорость горения заряда АОС при атмосферном давлении; p – среднее по горячей поверхности давление; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; T_0 – начальная температура заряда АОС; β – постоянная, зависящая от начальной температуры заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1 Агафонов В.В., Копылов Н.П. Установки аэрозольного пожаро-тушения: Элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. – М.: ВНИИПО, 1999. – 232 с.

2 Шишков А.А. и др. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

3 Беляев Н.М., Уваров Е.И. Расчет и проектирование реактивных систем управления космических летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.

4 Волков Е.В., Сырицин Т.А., Мазинг Г.Ю. Статика и динамика ракетных двигательных установок. Ч.1 – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.

5 Райзберг Б.А., Ерохин Б.Г. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. – М.: Машиностроение, 1972. – 473 с.

Статья поступила в редакцию 22.10.2002 г.