УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ ГЕНЕРАТОРА ОГНЕТУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

С.Н. Бондаренко
(представлено докт. техн. наук В.М. Комяк)

В статье описаны процессы горения твердотопливного заряда, протекающие в камере генератора огнетушащего аэрозоля во времени. Получена система дифференциальных уравнений первого порядка.

Рост числа объектов, на территории которых размещены значительные материальные ценности, например, автосалоны, салоны бытовой и оргтехники, хранилища ценных бумаг и серверных банков,, заставляет уделять больше внимания вопросам противопожарной защиты этих объектов. Так как эти объекты представляют собой помещения с малой степенью негерметичности, то целесообразно в качестве способа тушения применять объемный способ. Из всех известных огнетушащих веществ, применяемых при таком тушении, наибольшей эффективностью и наименьшей стоимостью обладают аэрозольные огнетушащие составы. Они получаются непосредственно во время пожара, с помощью специальных устройств – так называемых генераторов огнетушащего аэрозоля (ГОА).

В настоящее время различными производителями в России и на Украине выпускаются более восьмидесяти моделей ГОА, которые предназначены для выполнения широкого круга задач. Отличие их состоит в форме корпуса, массе заряда и различных рецептурах зарядов. Для того чтобы установить связь между характеристиками генератора и параметрами заряда необходимо математически описать процессы протекающие внутри генератора при его работе, то есть создать математическую модель ГОА.

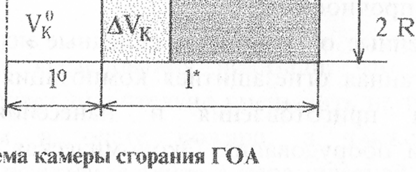

Рисунок 1 – Схема камеры сгорания ГОА

В основу такой модели положим известные из газодинамики уравнения сохранения массы и энергии. Применим к этим уравнениям метод осреднения по свободному объему камеры генератора, который позволит установить зависимость средних по объему величин давления $\overline{p}$, температуры $\overline{T}$ и плотности $\overline{\rho}$ газовой среды от времени.

Примем, что корпус генератора представляет собой полый круговой цилиндр, внутри которого размещается твердотопливный заряд (ТТЗ) из специальных пиротехнических составов. ТТЗ имеет форму цилиндрической шашки забронированной с боковой поверхности и горящей по торцу. Таким образом, геометрические характеристики камеры и заряда описываются с помощью известных соотношений:

$$V_{к}^{0} = \pi R^{2} l^{0}, \tag{1}$$

где $V_{к}^{0}$ – свободный объем камеры генератора в нулевой момент времени; R – радиус шашки заряда, равный радиусу камеры; l^{0} – длина свободного объема камеры,

$$S_{з} = \pi R^{2}, \tag{2}$$

где $S_{з}$ – площадь поверхности торца шашки,

$$l = l^{0} + l^{*}, \tag{3}$$

где l – общая длина камеры генератора, l^{*} – длина шашки ТТЗ.

Закон изменения скорости горения представим в виде зависимости:

$$\overline{u} = \overline{u}(\overline{p}_{s}, T_{з}), \tag{4}$$

где p_{s} – среднее по поверхности горения давление, $T_{з}$ – начальная температура ТТЗ.

Проинтегрируем указанные выше уравнения по длине заряда от l^{0} до l.

В результате уравнения сохранения массы запишется в виде:

$$\frac{d}{dt}\left(\overline{\rho}\, V_{K}\right) = \rho_{T}\, S_{з}\, \overline{u} - m_{*}\left(\overline{p}_{l^{0}}\right), \tag{5}$$

уравнение сохранения энергии для средних по свободному объему параметров продуктов сгорания после интегрирования будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d}{dt}\left(\overline{E}\,\overline{\rho}\,V_K\right)=\rho_T\,S_3\,\overline{u}\,\chi\,\overline{H}_г-m_*(\overline{p}_{l^0})\,c_p\,\overline{T}_{l^0}\,, \tag{6}$$

где $\overline{T}_{l^0}$ – средняя температура в передней части камеры генератора, $m_*(\overline{p}_{l^0})$ – массовый расход продуктов сгорания через сопловые отверстия.

Уравнение, характеризующее изменение свободного объема V_K камеры генератора во времени

$$\frac{dV_K}{dt}=S_3\,\overline{u}\,. \tag{7}$$

Интегрирование по свободному объему V_K уравнения состояния идеального газа даст зависимость:

$$\overline{p}_v=R\,\overline{\rho}\,\overline{T}\,. \tag{8}$$

Уравнения (4)-(8) образуют систему, описывающую изменение средних по объему физических параметров продуктов сгорания ТТЗ. Но данная система незамкнута, так как число неизвестных в ней больше числа уравнений. Поэтому необходимо сделать ряд упрощений, которые допустимы в случаях когда относительные перепады давления и температуры продуктов, заполняющих свободный объем, невелики.

Отождествим среднее по объему давление $\overline{p}_v$,среднее по горящей поверхности давление $\overline{p}_s$ и давление торможения в передней части камеры генератора $\overline{p}_{l^0}$

$$\overline{p}=\overline{p}_v=\overline{p}_s=\overline{p}_{l^0}\,. \tag{9}$$

Также средняя температура продуктов в камере $\overline{T}$ тождественна со средней температурой в передней части камеры $\overline{T}_{l^0}$

$$\overline{T}=\overline{T}_{l^0}\,. \tag{10}$$

Если продукты сгорания в камере генератора считать идеальным газом, то внутренняя энергия и теплосодержание единицы массы продуктов сгорания можно записать

$$\overline{E}=c_v\,\overline{T}\,,\qquad \overline{H}_г=c_p\,\overline{T}_г\,. \tag{11}$$

С учетом выражений (9)-(11):

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\overline{\rho}\, V_K\right) = \rho_T\, S_3\, \overline{u} - m_*(\overline{p}) \\ \dfrac{d}{dt}\left(c_v\, \overline{\rho}\, \overline{T}\, V_K\right) = \rho_T\, S_3\, \overline{u}\, \chi\, c_p\, \overline{T}_г - m_*(\overline{p})\, c_p\, \overline{T}. \\ \dfrac{d V_K}{dt} = S_3\, \overline{u} \qquad \overline{u} = \overline{u}(\overline{p}, \overline{T}) \qquad \overline{p} = \overline{\rho} R \overline{T} \end{cases} \tag{12}$$

Если пренебречь внутренней энергией $\overline{\rho}\, S_3\, \overline{u}\, c_v\, \overline{T}$ газов, заполняющих освободившийся в процессе горения ТТЗ объем ΔV_K, по сравнению с теплосодержанием газов образующихся при горении и учитывая, что масса газа, заполняющего объем ΔV_K мала по сравнению с массой всего образовавшегося в результате горения газа, тогда при $c_v = \mathrm{const}$ система примет вид:

$$\begin{cases} V_K \dfrac{d\overline{\rho}}{dt} = \rho_T\, S_3\, \overline{u} - m_*(\overline{p}) \\ V_K \dfrac{d}{dt}\left(\overline{\rho}\, \overline{T}\right) = \rho_T\, S_3\, \overline{u}\, \chi\, k\, \overline{T}_г - m_*(\overline{p})\, k\, \overline{T} \\ \dfrac{d V_K}{dt} = S_3\, \overline{u} \quad \overline{u} = \overline{u}(\overline{p}, \overline{T}) \quad \overline{p} = \overline{\rho} R \overline{T} \quad k = \dfrac{c_p}{c_v} \end{cases} \tag{13}$$

Используя уравнение состояния идеального газа и избавляясь от сомножителей в левых частях уравнений приводим систему к виду Коши:

$$\begin{cases} \dfrac{d\overline{\rho}}{dt} = \dfrac{1}{V_K}\left[\rho_T\, S_3\, \overline{u} - m_*(\overline{p})\right] \\ \dfrac{d\overline{p}}{dt} = \dfrac{1}{V_K}\left[\rho_T\, R\, S_3\, \overline{u}\, \chi\, k\, \overline{T}_г - m_*(\overline{p})\, k\, R\, \overline{T}\right]. \\ \dfrac{d V_K}{dt} = S_3\, \overline{u} \end{cases} \tag{14}$$

Интегрирование системы (14) каким-либо численным методом дает возможность получить зависимости среднеобъемных значений давления, температуры и плотности газовой среды в камере генератора от времени.