ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ОГНЕТУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

С.Н. Бондаренко
(представлено докт. техн. наук Ю.А. Абрамовым)

В статье рассмотрен один из подходов в определении времени работы генератора огнетушащего аэрозоля путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих его работу, с последующим аналитическим решением системы нелинейных уравнений.

Проблема создания простой, эффективной, надежной и экологически безопасной установки объемного пожаротушения стоит достаточно остро. В последние годы разработано принципиально новое средство объемного тушения – аэрозолеобразующие огнетушащие составы. Получают их с помощью специальных устройств – генераторов огнетушащего аэрозоля (ГОА). В настоящее время не существует математической модели, достоверно описывающей рабочие процессы в ГОА. Задача создания такой модели является актуальной. Наличие математической модели позволит разработать методику, с помощью которой можно осуществить проектирование ГОА с наперед заданными техническими характеристиками.

Один из путей решения данной задачи предложен в работе [1], где получена система из трех дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих рабочие процессы протекающие в камере ГОА для случая торцевого горения аэрозолеобразующего заряда и докритического режима истечения газо-аэрозольного состава из камеры генератора:

$$\begin{cases} \dfrac{d\overline{T}}{dt} = \dfrac{R \cdot \overline{T}}{\overline{p} \cdot V_K}\left[\rho_T S_3 u_1 \cdot \left(\dfrac{\overline{p}}{p_{ATM}}\right)^{\nu} \cdot \left(\chi k \overline{T}_\Gamma - \overline{T}\right) + \overline{T} \cdot (1-k) \cdot m_*(\overline{p}, \overline{T})\right]; \\ \dfrac{d\overline{p}}{dt} = \dfrac{R}{V_K}\left[\rho_T S_3 u_1 \cdot \left(\dfrac{\overline{p}}{p_{ATM}}\right)^{\nu} \chi k \overline{T}_\Gamma - m_*(\overline{p}, \overline{T}) k \overline{T}\right]; \\ \dfrac{dV_K}{dt} = S_3 u_1 \cdot \left(\dfrac{\overline{p}}{p_{ATM}}\right)^{\nu}; \end{cases} \qquad (1),$$

где $\overline{T}, \overline{p}$ – среднеобъемные температура и давление газоаэрозольной смеси; V_K – свободный объем камеры генератора; p_{ATM} –

атмосферное давление; k – показатель адиабаты; ρ_T – плотность аэрозолеобразующего заряда; $S_з$ – площадь поперечного сечения заряда; $\overline{T}_Г$ – средняя температура горения заряда; χ – коэффициент тепловых потерь в камере генератора; R – газовая постоянная; u_1, ν – температурный коэффициент и показатель степени в законе горения аэрозолеобразующего заряда; $m_*(\overline{p},\overline{T})$ – массовый расход при докритическом режиме истечения газоаэрозольной смеси через выходное отверстие ГОА, который определяется следующим выражением:

$$m_*(\overline{p},\overline{T})=\mu\cdot S_c\cdot\sqrt{\frac{2\cdot k}{k-1}\cdot\frac{\overline{p}^2}{R\cdot\overline{T}}\cdot\left(\frac{p_{АТМ}}{\overline{p}}\right)^{\frac{2}{k}}\left(1-\left(\frac{p_{АТМ}}{\overline{p}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \qquad (2)$$

где S_C – площадь поперечного сечения выходного отверстия ГОА; μ – коэффициент потерь через выходное отверстие.

Интегрирование системы (1) методом Рунге-Кутта 4-го порядка с шагом 0.0001, при начальных условиях: $\overline{T}(0)$=288 °K, $\overline{p}(0)=1.05\cdot10^5$ Па, $V_К=1.257\cdot10^{-5}$ м^3 и при следующих значениях параметров: $\overline{T}_г$ =1597 °K; $\rho_Г$=1800 кг·м$^{-3}$; χ=0.9; μ=0.97; R=287 кДж·(К·моль)$^{-1}$; ν=0.286 $p_{АТМ}=1.05\cdot10^5$ Па; k=1.4; $S_З=1.257\cdot10^{-3}$ м^2; $S_C=7.54\cdot10^{-5}$ м^2; u_1=0.005 К$^{-1}$; μ=0.97, позволило получить зависимости среднеобъемных температуры и давления в камере ГОА, а также свободного объема камеры от времени.

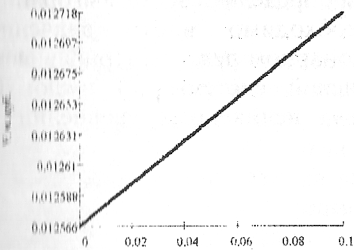

Рисунок 1 – График изменения свободного объема камеры ГОА во времени.

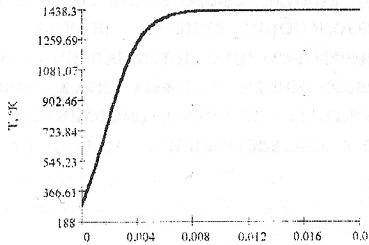

Рисунок 2 – График изменения среднеобъемной температуры во времени

Анализ графиков свидетельствует о существовании установившегося режима, когда среднеобъемные значения давления, температуры и массового расхода через выходное отверстие генератора остаются неизменными во времени, а свободный объем камеры ГОА (рисунок 1) изменяется по линейному закону.

Следовательно, производная от свободного объема камеры по времени есть величина постоянная. Из третьего уравнения системы (1) получим:

$$\frac{dV_K}{dt} = S_з u_1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^{\nu}, \qquad (3)$$

где p_{CT} – среднеобъемное давление на стационарном режиме работы ГОА.

Исходя из геометрического смысла первой производной, изменение свободного объема камеры можно представить:

$$\frac{dV_K}{dt} = \frac{V_K - V_K^0}{t_P} = \frac{V_{ЗАР}}{t_P} = \frac{l \cdot S_з}{t_P}, \qquad (4)$$

где $V_{ЗАР}$ – объем твердотопливного заряда; $t_р$ – время выгорания заряда; l – длина шашки аэрозолеобразующего заряда.

Сопоставляя выражения (3) и (4) получим зависимость, позволяющую оценить время работы генератора:

$$t_P = \frac{l}{u_1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^{\nu}}. \qquad (5)$$

Таким образом, для того чтобы определить время выгорания аэрозолеобразующего заряда, необходимо найти значение среднеобъемного давления на стационарном режиме. Приравняем правые части первых двух уравнений системы (1) нулю. В результате получим систему из двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными p_{CT} и T_{CT}:

$$\begin{cases} \rho_T S_з u_1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^{\nu} \cdot \left(\chi k \overline{T}_Г - T_{CT}\right) + \\ + T_{CT} \cdot (1-k) \cdot \mu \cdot S_c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_{CT}^2}{R \cdot T_{CT}} \cdot \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} = 0; \\ \rho_T S_з u_1 \cdot \left(\frac{p_{CT}}{p_{ATM}}\right)^{\nu} \chi k \overline{T}_Г - \mu \cdot S_c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_{CT}^2}{R \cdot T_{CT}} \cdot \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{p_{ATM}}{p_{CT}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \, k T_{CT} = 0. \end{cases} \qquad (6)$$

где $T_{ст}$ – среднеобъемная температура на стационарном режиме работы генератора.

Выразив из второго уравнения системы (6) $T_{ст}$, подставляем это значение в первое уравнение. Затем решая второе уравнение с учетом найденного значения $T_{ст}$, для случая когда

$$\nu = \frac{k-1}{k} \tag{7}$$

получим:

$$p_{СТ} = \left(\frac{2 \cdot k \cdot (\mu \cdot S_C \cdot p_{АТМ})^2}{2 \cdot k \cdot (\mu \cdot S_C \cdot p_{АТМ})^2 - (\rho_T \cdot S_3 \cdot u_1)^2 \cdot \chi \cdot T_Г \cdot R \cdot (k-1)} \right)^{\frac{1}{\nu}} p_{АТМ}. \tag{8}$$

Подставляя выражение (8) в формулу (5) получим зависимость для определения времени работы ГОА:

$$t_p = \frac{l \cdot \left(2 \cdot k \cdot (\mu \cdot S_C \cdot p_{АТМ})^2 - (\rho_T \cdot S_3 \cdot u_1)^2 \chi \cdot T_Г \cdot R(k-1)\right)}{2 \cdot u_1 \cdot k \cdot (\mu \cdot S_C \cdot p_{АТМ})^2}. \tag{9}$$

Для проверки адекватности полученных выражений был взят генератор марки АПГ ввиду того что, во-первых, генераторы этой марки сертифицированы на территории Украины, во-вторых, геометрические характеристики корпуса генераторов данной марки совпадают с принятыми в теоретической модели, в-третьих, процесс горения топлива, используемого в ГОА этой марки, может вполне адекватно описан степенной моделью процесса горения.

Проведенный численный эксперимент со значениями параметров, соответствующих техническим характеристикам генератора марки АПГ-3, позволил получить расчетное значение времени работы ГОА, отличающееся от паспортного на 5 %. Также установлено, что на вычисленный параметр значительное влияние оказывают геометрические размеры камеры и характеристики топлива u_1.

ЛИТЕРАТУРА

1 Бондаренко С.Н. Упрощенная математическая модель процессов в камере генератора огнетушащего аэрозоля. // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. – Вып. 5. – Харьков: ХИПБ, 1999. – С. 50 – 53.