

*А.А. Деревянко, к.т.н., доцент, нач. каф., НУГЗУ,
А.Н. Литвяк, к.т.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ*

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В УСЛОВНО ГЕРМЕТИЧНОМ ПОМЕЩЕНИИ ПРИ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРА ОГНЕТУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ

(представлено д.т.н. Комяк В.М.)

Разработана математическая модель для расчета динамики параметров газовой среды в условно герметичном помещении при работе генератора огнетушащего аэрозоля с учетом сжимаемости газа.

Ключевые слова: автоматическая система аэрозольного пожаротушения, генератор огнетушащего аэрозоля, аэрозолеобразующий состав, газозвушная среда.

Постановка проблемы. В настоящее время значительное распространение получили установки аэрозольного пожаротушения, методы расчёта которых при проектировании регламентированы нормативными документами [1]. Повышение давления при работе генераторов огнетушащего аэрозоля (ГОА), особенно с учетом длительной эксплуатации ГОА и значительного колебания сезонных температур, приводящих к образованию в аэрозолеобразующем составе (АОС) трещин, существенно влияет на скорость горения АОС и, как следствие, может привести к разрушению строительных конструкций защищаемого помещения. Наиболее актуален этот вопрос для условно герметичных помещений, параметр негерметичности которых не превышает $0,001 \text{ м}^{-1}$.

При проведении пожарно-технических экспертиз по факту пожаров в помещениях, защищаемых ГОА часто возникает необходимость получения численных оценок изменения параметров газозвушной среды для установления реальной картины развития пожара, для оценки эффективности работы аэрозольных установок пожаротушения или установления фактов их отказов. При этом необходимо учесть, что изменение скорости горения АОС, значительно изменяет динамику параметров газозвушной среды при работе ГОА, что не учитывается нормативными документами.

Таким образом, существует проблема улучшения технических данных современных ГОА.

Анализ последних исследований и публикаций. Математическая модель для расчета динамики параметров при горении АОС представлена в [2]. Там же представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния негерметичности помещения на давление, развиваемое при работе генераторов огнетушащего аэрозоля. При этом рассматривались только докритические режимы течения газа через открытые проемы и не рассматривался подсос воздуха через открытые проемы при обратных токах воздуха. В [3] рассмотрены общие закономерности изменения пара-

метров в корпусе ГОА и не рассмотрено изменение параметров газовой среды в защищаемом помещении. В [4] представлены результаты экспериментального исследования влияния массы АОС на максимальное избыточное давление и максимальную температуру в помещении. Динамика изменения параметров газовой среды не рассматривалась. В [5] рассматривается динамика взрывного сгорания газовых горючих веществ в постоянном объеме при наличии истечения.

Постановка задачи и ее решение. Задачей является расчет динамики параметров состояния газовой среды в условно герметичном помещении при работе ГОА в широком диапазоне режимов истечения через открытые проемы с учетом сжимаемости газа.

Задача решалась при следующих допущениях:

- газозвушная среда представляет собой идеальный газ;
- параметры газовой среды однородны по объему помещения;
- инерционность процессов тепло- и массопереноса в помещении мала;
- теплоемкость и плотность воздуха и газов АОС – одинакова;
- ограждающие конструкции имеют постоянную температуру.

Горение АОС сопровождается образованием газовой фазы и твердого остатка. Массовая скорость генерации газовой фазы будет

$$G_A = \beta_0 \cdot \frac{dm_A}{dt}, \quad (1)$$

где β_0 – доля массы АОС, идущая на генерацию газов; $\frac{dm_A}{dt}$ – массовая скорость горения АОС, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$. Изменение концентрации АОС в помещении [1]

$$\frac{dc_A}{dt} = \frac{1}{V_o} (G_A - \frac{c_A}{\rho} G_{\text{ОП}}), \quad (2)$$

где $G_{\text{ОП}}$ – массовая скорость уноса газовой среды через открытые проемы, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; c_A – текущее значение объемной концентрации АОС, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; ρ – текущее значение плотности газовой среды, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; V_o – объем помещения, м^3 .

Удельный тепловой поток, поступающий в помещение с газовой фазой АОС

$$Q_A = \eta_A H_A \cdot G_A, \quad (3)$$

где H_A – удельная теплотворная способность АОС, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$; η_A – коэффициент тепловыделения.

Запишем основные уравнения для нестационарного течения газа.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{dm}{dt} = G_A - G_{\text{ОП}}, \quad (4)$$

где m – масса газовой смеси в помещении, кг.

Уравнение энергии

$$\frac{dI}{dt} = H_A G_A - iG_{\text{ОП}} - \alpha \cdot F_{\text{СТ}} (T - T_{\text{СТ}}), \quad (5)$$

где I – энтальпия газовой смеси в помещении, Дж; i – удельная энтальпия газовой смеси в помещении, Дж·кг⁻¹; T – температура газовой смеси в помещении, К; $T_{\text{СТ}}$ – температура стенок ограждающих конструкций, К; $F_{\text{СТ}}$ – площадь стенок ограждающих конструкций, м²; α – коэффициент конвективного теплообмена между средой и ограждающими конструкциями, Дж·м⁻²·К⁻¹.

Уравнение состояния

$$p = \frac{RT}{V_0} m, \quad (6)$$

где p – давление газовой смеси в помещении, Па; R – газовая постоянная среды в помещении, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Учитывая, что полная энтальпия определяется по формуле

$$I = mc_p T, \quad (7)$$

где c_p – удельная адиабатная теплоемкость среды, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Тогда

$$\frac{dI}{dt} = c_p m \frac{dT}{dt} + c_p T \frac{dm}{dt}. \quad (8)$$

Решая совместно уравнения 1-8 получим

$$c_p m \frac{dT}{dt} = H_A G_A - iG_{\text{ОП}} - \alpha F_{\text{СТ}} (T - T_{\text{СТ}}) - c_p T (\beta_0 G_A - G_{\text{ОП}}). \quad (9)$$

Приведенная скорость истечения газа через ОП [6]

$$\lambda_{\text{ОП}} = \varphi \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left(1 - \pi_{\text{ОП}}^{\frac{k-1}{k}} \right)}, \quad (10)$$

где φ – коэффициент истечения из открытых проемов; k – показатель адиабаты; $\pi_{\text{ОП}} = \frac{p}{p_0}$ – перепад давлений на открытых проемах; p_0 – атмосферное давление, Па; p – давление газовой смеси, Па.

Массовый расход газовой смеси через открытые проемы можно определить по формуле [6]

$$G_{\text{ОП}} = m_{\text{г}} \frac{P}{\sqrt{T}} F_{\text{ОП}} q(\lambda_{\text{ОП}}), \quad (11)$$

где $F_{\text{ОП}}$ – площадь открытых проемов, м^2 ; $q(\lambda_{\text{ОП}})$ – приведенный расход газовой среды.

В полученной системе уравнения площадь открытых проемов определяется из выражения для параметра негерметичности

$$\delta = \frac{F_{\text{ОП}}}{V_0}. \quad (12)$$

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений (1 ÷ 12) решалась численным методом Ньютона с использованием специализированной вычислительной программы MathCad. Для проверки достоверности результатов, получаемых по разработанной модели была решена тестовая задача при горении аэрозоля Е-1 в модели помещения со следующими исходными данными [2]: $V_0=0,05\text{м}^3$ – объем модели помещения; $P_0=101330\text{Па}$ – давление окружающей среды; $T_0=288\text{К}$ – температура окружающей среды; $M_a=0,01\text{кг}$ – начальная масса АОС; $t_a=25\text{с}$ – время полного выгорания АОС; $Na=4,15\text{МДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ – удельная теплотворная способность АОС; $\beta_0=0,9$ – доля массы АОС, идущая на генерацию газов; $\alpha=26,8\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$ – коэффициент конвективного теплообмена; $\delta_1=0, \text{м}^{-1}$ – параметр негерметичности; $\delta_2=0,0002, \text{м}^{-1}$.

На рис.1 представлены результаты сравнения данных, полученных по разработанной методике с данными эксперимента [2].

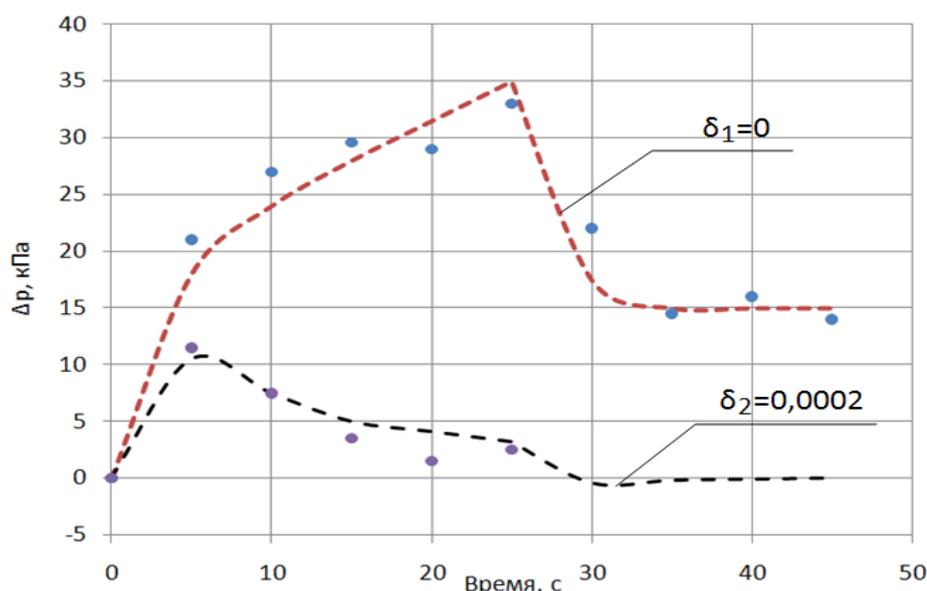


Рис. 1. Результаты расчета тестовой задачи: - - - - расчет; • – эксперимент [2]

При горении АОС в помещение подводится горячий огнетушащий аэрозоль. В результате полная энтальпия и давление в помещении увеличиваются. Для параметра негерметичности $\delta_1=0, \text{м}^{-1}$ увеличение давления сопровождается вплоть до полного выгорания АОС. Затем, в результате теплообмена с ограждающими стенками давление уменьшается. Для пара-

метра негерметичности $\delta_1=0,0002$, м^{-1} давление в помещении увеличивается до 5-й секунды, а затем начинает уменьшаться. Это объясняется увеличением расхода газовой среды через открытые проемы. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [2].

Выводы. Получена система уравнений для расчета динамики изменения параметров газовой среды в помещении при работе ГОА. Проведен сравнительный анализ результатов расчета, полученных по разработанной методике с экспериментальными данными. Получено удовлетворительное совпадение данных расчета с данными эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системи протипожежного захисту: ДБН В.2.5–56–2014 [Чинний від 2015-07-01]. Київ.: «Укрбудінформ». 2014. – 127 с.
2. Горшков В.И. Влияние негерметичности помещения на давление, развиваемое при работе генераторов огнетушащего аэрозоля. /В.И. Горшков, Ю.Н. Шебеко, В.Ю. Навценя, А.В. Трунев, А.А.Зайцев // Пожаровзрывобезопасность, 1995. – Вып.4. – С.67–70.
3. Абрамов Ю.А. Современные средства объемного пожаротушения. /Ю.А. Абрамов, С.Н. Бондаренко, В.П. Садковой] – Харьков, АГЗУ, 2005. –148с.
4. Литвяк А.Н Экспериментальное определение температуры и избыточного давления при работе генераторов огнетушащего аэрозоля. / А.Н. Литвяк, М.Н. Мурин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков, УГЗУ, 2008. – Вып 23. – С.115–119. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/492/1/08%20Litvyak%20Murin%20GOA.pdf>.
5. Kumar R.K., Dewit W.A., Greig D.R. Vented explosion of hydrogen-air mixtures in a large volume. // Combustion Science and Technology. 1989, v.68, №416, p.251-266.
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Учебное руководство для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. /Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит. 1991. – 600 с.

Получено редколлегией 03.10.2018

О.А. Дерев'янку, О.М. Литвяк

Динамічна модель газоздушного середовища в умовно герметичному приміщенні при роботі генератора вогнегасного аерозолю

Розроблено математична модель для розрахунку динаміки параметрів газоповітряного середовища в умовно герметичному приміщенні при роботі генератора вогнегасного аерозолю з урахування стисливості газу.

Ключові слова: автоматична система аерозольного пожежогасіння, генератор вогнегасного аерозолю, аерозолеутворюючий состав, газоповітряне середовище.

O. Derev'yanko, A. Litvyak

Dynamic model of the gas-air medium in a conditionally sealed room during the operation of a fire-fighting aerosol generator

A mathematical model for calculating input nozzles of powder automatic fire extinguishing systems has been developed.

Keywords: fire extinguishing powder, automatic powder fire extinguishing system, outlet nozzles, powder fire extinguishing module.