

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРИ СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ГОРЕНИИ ЖИДКОСТИ В ПОМЕЩЕНИИ

С.В. Пузач, Доан Вьет Мань, С.И. Науменко,
В.Г. Плющиков, Ю.Г. Фоминых

Кафедра безопасности жизнедеятельности
и управления природными и техногенными рисками
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 8/2, Москва, Россия, 117198

В статье приведены результаты анализа термогазодинамических условий проведения экспериментов по определению токсичности продуктов горения при пожаре в помещении. Рассмотрены математические модели расчета параметров теплообмена в характерных мелко- и крупномасштабных помещениях.

Ключевые слова: пожар, токсичные газы, показатель токсичности, подобие, теплообмен, коэффициент теплопотерь.

Введение. По статистике бюро судебно-медицинских экспертиз [1] в 80% случаев причинами смерти людей на пожарах явилось отравление продуктами горения.

Токсичность продуктов горения в первую очередь будет определяться тремя факторами:

- величинами удельных коэффициентов выделения токсичных газов;
- значениями парциальных плотностей токсичных газов на уровнях рабочих зон помещений;
- временем воздействия (экспозиции) токсичных газов на человека.

Количество выделяющихся токсичных газов определяется химическим составом и концентрацией газообразных продуктов газификации твердых и жидких горючих веществ и материалов, а также термогазодинамическими условиями пожара [2]. В настоящее время проблема расчета количества выделяющихся токсичных газов не решена из-за сложности процессов газификации и горения, а также неопределенности химического состава современных строительных материалов.

Научно-обоснованные методики расчета удельных коэффициентов выделения токсичных газов с учетом конкретных термогазодинамических условий пожара

(температуры, концентрации кислорода и т.д.) отсутствуют (за исключением работы [2], где предложена методика на примере образования монооксида углерода).

Актуальность рассматриваемого вопроса в настоящее время становится все более значимой в связи с расширением использования материалов и изделий на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества токсичных продуктов горения.

Удельные коэффициенты образования токсичных газов при пожаре значительно отличаются друг от друга в различных базах данных (например, в работах [3] и [4]), а сведения о теплофизических и химических показателях для многих современных материалов вообще отсутствуют.

Экспериментально найденные показатели токсичности, которые определяются величинами парциальных плотностей газов, получены, как правило, из результатов мелкомасштабных экспериментов [5; 6], которые не воспроизводят полномасштабных термогазодинамических условий протекания пожара в реальных помещениях. Из-за невозможности соблюдения положений теории подобия при переходе от мелкомасштабной модели к натурному помещению [7] необходимо установить зависимость между плотностью токсичного газа и удельным коэффициентом его образования, а также величинами остальных опасных факторов пожара (комбинированность воздействия опасных факторов пожара [3—6]) при сгорании одного и того же горючего материала в разных термогазодинамических условиях протекания пожара.

Постановка задачи. Рассмотрим две характерные схемы термогазодинамической картины пожара в условиях мелкомасштабного эксперимента и две схемы — в полномасштабном помещении.

Схема процесса горения с использованием вытяжной вентиляции для удаления продуктов горения из экспериментальной мелкомасштабной камеры в «квазистационарных» условиях (модель № 1) представлена на рис. 1а.

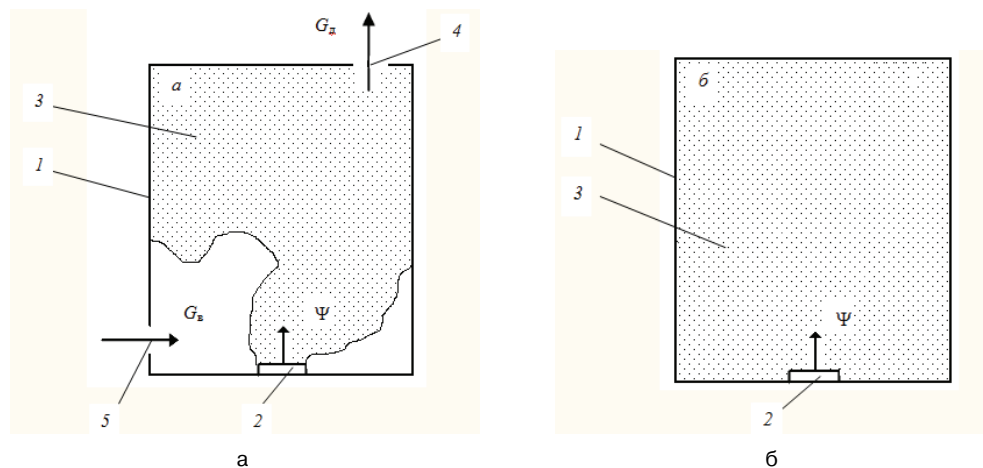


Рис. 1. Схема газообмена в мелкомасштабной камере в «квазистационарных» условиях с использованием вытяжной вентиляции (а) и в замкнутом объеме (б):

- 1 — стенки камеры; 2 — горючий материал; 3 — смесь продуктов горения и воздуха; 4 — система дымоудаления; 5 — система приточной вентиляции

Схема пожара в герметичном объеме, используемая для определения показателя токсичности при стандартных испытаниях [5; 6] (модель № 2), показана на рис. 1б.

Основное образование токсичного газа в полномасштабном помещении на начальной стадии пожара или при локальном пожаре происходит в области пламенной зоны конвективной колонки, образующейся над источником горения (модель № 3). Рассматриваемая открытая термодинамическая система приведена на рис. 2а.

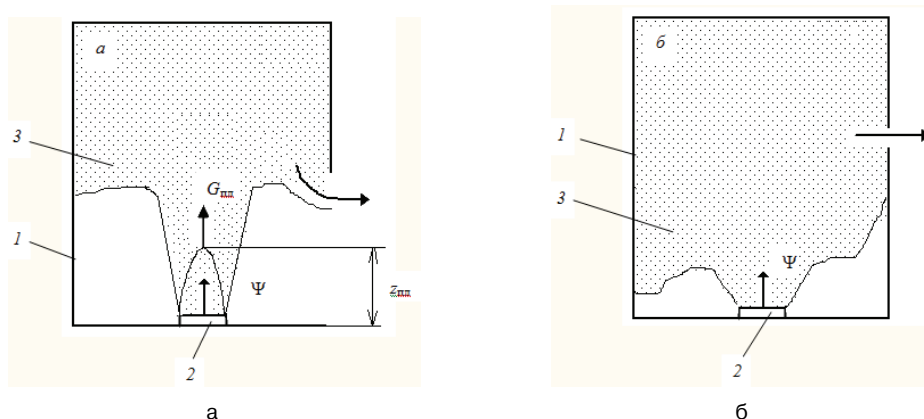


Рис. 2. Схема газообмена в полномасштабном помещении с большой (а) и малой проемностью (б):

1 — стенки помещения; 2 — горючий материал;
3 — смесь продуктов горения и воздуха

Термогазодинамическая картина пожара в полномасштабном помещении с малой проемностью или на начальной стадии пожара, когда через проемы происходит только вытеснение газовой среды помещения наружу, представлена на рис. 2б (модель № 4).

При стабилизированном горении жидкости предполагаем, что:

- скорость газификации горючего материала постоянна;
- удельный коэффициент выделения токсичного газа постоянен и не зависит от условий протекания пожара.

Образование токсичного газа будем рассматривать на примере монооксида углерода.

Математические модели определения концентрации токсичного газа в мелкомасштабном эксперименте

Модель № 1. При «квазистационарных» условиях законы сохранения массы и энергии газовой среды, а также токсичного газа внутри экспериментального объема имеют вид:

$$G_d - G_b = \Psi, \quad (1)$$

где G_d — массовый расход системы дымоудаления, кг/с; G_b — массовый расход воздуха, поступающего через проем в помещение, кг/с; Ψ — скорость газификации горючего материала, кг/с;

$$c_p (T_{cp} G_d - T_b G_b) = \eta \Psi Q_{н,р} (1 - \phi), \quad (2)$$

где c_p — удельная изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг К); T_{cp} — среднеобъемная температура газовой среды, К; G_d — массовый расход системы дымоудаления, кг/с; T_b — температура воздуха, К; G_b — массовый расход воздуха, поступающего через проем в помещение, кг/с; η — полнота сгорания; $Q_{н,р}$ — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; ϕ — коэффициент теплопотерь;

$$X_{cp} G_d = \eta \Psi L, \quad (3)$$

где X_{cp} — среднеобъемная массовая концентрация токсичного газа; L — удельный коэффициент образования токсичного газа, кг/кг.

Удельную изобарную теплоемкость принимаем одинаковой для газовой смеси и воздуха [3; 7].

При $\Psi \ll G_d$ принимаем, что $G_d = G_b$.

Тогда из уравнений (1)—(3), используя уравнение состояния идеального газа для среднеобъемных параметров [3], можно получить выражение для расчета среднеобъемной парциальной плотности токсичного газа внутри экспериментального объема:

$$\rho_{г,ср} = X_{cp} \rho_{cp} = \frac{p_{cp} c_p (T_{cp} - T_b) L}{RT_{cp} (1 - \phi) Q_{н,р}}, \quad (4)$$

где $\rho_{г,ср}$ — среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; ρ_{cp} — среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³; p_{cp} — среднеобъемное давление, Па; R — газовая постоянная смеси газов, Дж/(кг·К).

В первом приближении среднеобъемное давление принимаем равным атмосферному $p_b = 101\,300$ Па, а газовую постоянную и удельную изобарную теплоемкость — как для воздуха [3; 7]: $R = 286$ Дж/(кг·К); $c_p = 1000$ Дж/(кг К) [8].

Коэффициент пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением $L/Q_{н,р}$ в выражении (4) равен:

$$K_1 = \frac{p_{cp} c_p (T_{cp} - T_b)}{RT_{cp} (1 - \phi)}. \quad (5)$$

Подставляя в выражение (5) значения известных параметров, получаем:

$$K_1 = \frac{3,5 \cdot 10^5 (T_{cp} - T_b)}{(1 - \phi) T_{cp}}. \quad (6)$$

Модель № 2. Законы сохранения массы и энергии газовой среды, а также токсичного газа и кислорода внутри герметичного объема имеют вид:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \Psi, \quad (7)$$

где V — объем помещения, м³; τ — время, с;

$$\rho_{\text{cp}} c_v V \frac{dT_{\text{cp}}}{d\tau} = \eta \Psi Q_{\text{н,р}} (1 - \phi), \quad (8)$$

где c_v — удельная изохорная теплоемкость газа, Дж/(кг К); T_{cp} — среднеобъемная температура газовой среды, К;

$$V \frac{d\rho_{\text{г,ср}}}{d\tau} = \eta \Psi L, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{г,ср}}$ — среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; L — удельный коэффициент образования токсичного газа, кг/кг;

$$V \frac{d\rho_{\text{O}_2,\text{ср}}}{d\tau} = -\eta \Psi L_{\text{O}_2}, \quad (10)$$

где V — объем помещения, м³; $\rho_{\text{O}_2,\text{ср}}$ — среднеобъемная плотность кислорода, кг/м³; L_{O_2} — удельный коэффициент потребления кислорода.

Удельную изохорную теплоемкость принимаем одинаковой для газовой смеси и воздуха [3; 7; 8]: $c_v = 714$ Дж/(кг К).

Среднеобъемная плотность токсичного газа через промежуток времени τ от начала горения, полученная с помощью интегрирования ур. (9), составляет:

$$\rho_{\text{г,ср}} = \frac{\eta \Psi L}{V} \tau, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{г,ср}}$ — среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; V — объем помещения, м³.

Коэффициент пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением $L/Q_{\text{н,р}}$ в выражении (11) равен:

$$K_2 = \frac{\eta \Psi Q_{\text{н,р}} \tau}{V}, \quad (12)$$

где η — полнота сгорания; Ψ — скорость газификации горючего материала, кг/с; $Q_{\text{н,р}}$ — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; τ — время, с.

При $\eta \Psi \tau \ll \rho_{\text{cp}} V$ принимаем, что: $\rho_{\text{cp}} = \rho_{\text{в}}$ (изохорный процесс).

Тогда из решения ур. (8) получаем:

$$T_{\text{cp}} = T_{\text{в}} + \frac{\eta \Psi Q_{\text{н,р}} (1 - \phi) \tau}{\rho_{\text{в}} c_v V}, \quad (13)$$

где $T_{\text{в}}$ — температура воздуха, К; $Q_{\text{н,р}}$ — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; ϕ — коэффициент теплопотерь; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м³.

Среднеобъемная плотность кислорода из решения ур. (10) равна:

$$\rho_{\text{O}_2,\text{ср}} = \rho_{\text{O}_2,\text{в}} - \frac{\eta \Psi L_{\text{O}_2} \tau}{V}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{O}_2,\text{в}}$ — плотность кислорода в воздухе, кг/м³; L_{O_2} — удельный коэффициент потребления кислорода; V — объем помещения, м³.

**Математические модели
определения концентрации токсичного газа
в полномасштабном эксперименте**

Модель № 3. Для определения массовых расходов газовой смеси в области пламенной зоны конвективной колонки (при $z \leq z_{пл}$) используется зависимость [9]:

$$G_k = 0,032 \left(\frac{Q_{пож}(1-\chi)}{1000} \right)^{3/5} z, \quad (15)$$

где G_k — массовый расход газов в поперечном сечении конвективной колонки, кг/с; $Q_{пож}$ — тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения, Вт; χ — доля, приходящаяся на поступающий в ограждения тепловой поток от выделившейся в очаге горения тепловой мощности; z — координата поперечного сечения конвективной колонки, отсчитываемая от поверхности горения, м.

Температура, средняя по сечению конвективной колонки, равна [3; 9]:

$$T_k = T_B + \frac{Q_{пож}(1-\chi)}{c_p G_k}, \quad (16)$$

где T_k — температура, средняя по сечению конвективной колонки, К; c_p — удельная изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг К).

Тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения, равна [3]:

$$Q_{пож} = \eta \Psi Q_{н,р}, \quad (17)$$

где η — полнота сгорания; Ψ — скорость газификации горючего материала, кг/с.

Уравнение закона сохранения массы токсичного газа в области пламенной зоны имеет вид:

$$X_{пл} G_{пл} = \eta \Psi L, \quad (18)$$

где $X_{пл}$ — средняя массовая концентрация токсичного газа на выходе из пламенной зоны на высоте $z_{пл}$; $G_{пл}$ — массовый расход газов через поперечное сечение колонки, отстоящее по высоте от поверхности горения на расстоянии $z_{пл}$, кг/с; L — удельный коэффициент образования токсичного газа, кг/кг.

Подставляя выражения (15) и (17) в уравнение (18), получаем формулу для определения средней массовой концентрации токсичного газа на выходе из пламенной зоны на высоте $z_{пл}$:

$$X_{пл} = \frac{1,88 \cdot 10^5}{(1-\chi)} \frac{L}{Q_{н,р}}, \quad (19)$$

где $Q_{н,р}$ — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг.

Средняя плотность смеси газов на выходе из пламенной зоны равна (из уравнения состояния идеального газа):

$$\rho_{пл} = \frac{p_B}{RT_{пл}}, \quad (20)$$

где $\rho_{пл}$ — средняя плотность смеси газов на выходе из пламенной зоны, кг/м³; ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; R — газовая постоянная смеси газов, Дж/(кг·К); $T_{пл}$ — средняя температура в сечении конвективной колонки на выходе из пламенной зоны, К.

В первом приближении давление принимаем равным атмосферному, а газовую постоянную — как для воздуха [3; 7].

Тогда средняя плотность токсичного газа на выходе из пламенной зоны, полученная с использованием уравнений (19) и (20), составляет:

$$\rho_{г,пл} = X_{пл}\rho_{пл} = \frac{1,37 \cdot 10^5}{(1-\chi)} \frac{L}{Q_{н,р}}, \quad (21)$$

где $R = 286$ Дж/(кг·К) [8]; $T_{пл} = 481,3$ К (из выражения (16)).

Коэффициент пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением $L/Q_{н,р}$ в выражении (21) равен:

$$K_3 = \frac{1,37 \cdot 10^5}{(1-\chi)}. \quad (22)$$

Модель № 4. Зависимости среднеобъемной плотности токсичного газа и среднеобъемной температуры газовой среды от времени имеют вид [3]:

$$\rho_{г,ср} = \rho_{п} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Psi}{B} \tau\right) \right], \quad (23)$$

где $\rho_{г,ср}$ — среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; $\rho_{п} = \frac{c_p T_v L}{(1-\phi) Q_{н}^p} \rho_v$ — пороговая плотность, кг/м³; Ψ — скорость газификации горючего материала, кг/с; $B = \frac{c_p \rho_v T_v V}{\eta(1-\phi) Q_{н}^p}$ — размерный параметр, кг; τ — время, с;

$$T_{ср} = T_v \exp\left(\frac{\Psi \tau}{B}\right), \quad (24)$$

где $T_{ср}$ — среднеобъемная температура газовой среды, К; T_v — температура воздуха, К; $B = \frac{c_p \rho_v T_v V}{\eta(1-\phi) Q_{н}^p}$ — размерный параметр, кг.

При достижении пороговой плотности ($\tau \rightarrow \infty$) среднеобъемная плотность токсичного газа из уравнения (23) может быть представлена в виде:

$$\rho_{г,ср} = \rho_{п} = \frac{c_p \rho_v T_v}{(1-\phi)} \frac{L}{Q_{н,р}}, \quad (25)$$

где $\rho_{г,ср}$ — среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; — пороговая плотность, кг/м³; c_p — удельная изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг К); ρ_v — плотность воздуха,

кг/м³; L — удельный коэффициент образования токсичного газа, кг/кг; ϕ — коэффициент теплопотерь; $Q_{н,р}$ — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг.

Максимальное значение коэффициента пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением $L/Q_{н,р}$ в выражении (25) равно:

$$K_{4,\max} = \frac{c_p \rho_v T_v}{(1-\phi)} \quad (26)$$

или

$$K_{4,\max} = \frac{3,5 \cdot 10^5}{(1-\phi)}, \quad (27)$$

где $c_p = 1000$ Дж/(кг·К) [8]; $\rho_v T_v = p_v / R$ — из уравнения состояния идеального газа.

Коэффициент пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением $L/Q_{н,р}$ в выражении (23) равен:

$$K_4 = \frac{3,5 \cdot 10^5}{(1-\phi)} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Psi}{B} \tau\right) \right]. \quad (28)$$

Необходимо отметить, что величина $Q_{н,р}$ входит в параметр B .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Белешников И.Л.* Судебно-медицинская оценка содержания цианидов в органах и тканях людей, погибших в условиях пожара: Дисс. ... канд. мед. наук. — СПб., 1996.
- [2] *Пузач С.В., Смагин А.В., Доан Вьет Мань, Лебедченко О.С.* Оценка токсикологической обстановки при возникновении пожара в салоне самолета и помещениях аэропортов // *Тепловые процессы в технике.* — 2009. — Т. 1. — № 12. — С. 531—535.
- [3] *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М.: Академия ГПС МВД России, 2000.
- [4] *Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Абакумов Е.С.* Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портивных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2007.
- [5] *Иличкин В.С.* Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Принципы и методы определения. — М.: Химия, 1993.
- [6] National Fire Protection Association (NFPA). Standard test method for developing toxic potency data for use in fire hazard modeling. NFPA 269. — NFPA National Fire Codes, 2003.
- [7] *Пузач С.В.* Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2005.
- [8] *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979.
- [9] NFPA 92B. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces. — 2005.

SOME PECULIARITIES OF DETERMINATION OF TOXITY INDICATOR IN CASE OF STABILIZED BURNING OF LIQUID IN A ROOM

**S.V. Puzach, Doan V'et Man', S.I. Naumenko,
V.G. Pluschikov, Yu. G. Fominykh**

Department of life safety and management
of natural and technological risks
Russian People's Friendship University
Miklukho-Maklaya str., 8/2, Moscow, Russia, 117198

Analysis of thermal gas dynamic conditions of conducting experiments to determine toxicity of combustion products in case of fire in a room was carried out. Mathematic models to calculate options of heat and mass transfer in characteristic small-scale and large-scale rooms was considered.

Key words: fire, toxic gases, toxicity indicator, similarity, heat and mass transfer, coefficient of heat loss.