

УДК 614.841

Математическая модель критической продолжительности пожара в помещении, смежном с очагом пожара

С.С. Лапшин, преп.

На основе интегральной модели пожара с учетом неупрощенного решения уравнения материального баланса для помещения очага пожара в общем виде получено уравнение, позволяющее определить критическую продолжительность пожара в помещении, смежном с очагом пожара. Приведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: моделирование, пожар, температура.

Mathematical Model of Critical Fire Duration in Adjacent Room with Fire Source

S.S. Lapshin, Teacher

The article presents generalized equation allowing to define critical duration of fire in adjacent room. The decision is based on the integral model of fire. There is validation of the model with experimental and theoretical data. The equation is obtained with regard to not simplified solution of mass equation in a fire room.

Key words: modeling, fire, temperature.

Для решения проблемы повышения уровня безопасности людей на пожарах требуется разработка конструктивных и объемно-планировочных решений в строительстве с учетом динамики опасных факторов пожара (ОФП) [1]. Современные методы исследования динамики ОФП в помещении базируются на различных математических моделях пожара [2].

Время от возникновения пожара до наступления ОФП называется критической продолжительностью пожара (КПП). Актуальность исследования динамики ОФП в смежном с очагом пожара помещении обусловлена отсутствием в нормативных документах аналитических решений (формул) для определения критической продолжительности пожара. В настоящее время для расчета динамики ОФП в смежном с очагом пожара помещении по интегральной модели применяют численные методы. Этот подход связан с большим количеством вычислений и может быть реализован только с помощью компьютера. В программу подготовки инженера пожарной безопасности не входит изучение численных методов, в результате чего провести такой расчет самостоятельно ему будет не по силам. При использовании численных методов дифференциальные уравнения заменяются их дискретными аналогами, следовательно, нет возможности установить функциональные зависимости ОФП от условий протекания пожара в помещении. Результаты численного расчета заведомо трудно проверить, так как программы, позволяющие производить такие расчеты, в большинстве своем являются интеллектуальной собственностью их разработчиков и доступ к их исходному коду, а следовательно, к уравнениям и алгоритмам, которые они используют, закрыт [3, 4]. Специалистам, производящим расчеты по таким программам, остается полагаться на то, что руководства по данным продуктам полностью отражают все нюансы расчета, и на отсутствие ошибок в программном коде. Как правило,

для верификации таких расчетов прибегают к аналитическим методам.

Применение для таких задач полевого метода наталкивается на еще большее количество проблем. Необходимость высококвалифицированных специалистов, наличие у них большого опыта в этой области, огромное количество вычислений (машинного времени), ряд нерешенных задач газовой динамики (турбулентность), а также мнения некоторых исследователей, что полевая модель до сих пор остается «вещью в себе» [1], – все это позволяет сделать вывод, что использование полевых моделей для расчета динамики ОФП является своего рода искусством. Как правило, полевые модели применяются для расчета ОФП в помещениях сложной конфигурации, в которых невозможно использовать интегральные модели.

Ниже, используя интегральный термодинамический метод описания пожара в помещении, созданный Заслуженным деятелем науки РФ, доктором технических наук, профессором Ю.А. Кошмаровым, в общем виде получена формула для определения динамики ОФП в помещении, смежном с очагом пожара.

Рассмотрим интегральную математическую модель начальной стадии пожара (НСП). Руководствуясь работой [2], примем следующие допущения: газовая среда внутри помещения при пожаре является смесью идеальных газов; в каждой точке пространства внутри помещения в любой момент времени реализуется локальное равновесие; режим газообмена является односторонним: поступление воздуха в помещение из окружающей среды отсутствует, а продукты горения выходят через все имеющиеся проемы в смежное помещение; среднее давление среды в помещении остается практически постоянным, равным давлению наружного воздуха; отношение теплового потока в ограждения к тепловыделению есть величина постоянная,

равная своему среднему значению на рассматриваемом интервале времени.

Динамика ОФП в помещении, где расположен очаг пожара. Запишем систему уравнений интегральной математической модели НСП с учетом принятых допущений:

– уравнение материального баланса

$$V_1 \frac{d\rho_{1m}}{d\tau} = \psi L_{ГН} - G_G; \quad (1)$$

– уравнение энергетического баланса

$$\eta \psi Q_H^p (1 - \varphi_1) - C_p T_{1m} G_G = 0; \quad (2)$$

– уравнение баланса кислорода

$$V_1 \frac{d\xi_{1O_2}}{d\tau} = -\eta \psi L_{O_2} - \frac{\xi_{1O_2}}{\rho_{1m}} G_G; \quad (3)$$

– уравнение баланса токсичных продуктов горения

$$V_1 \frac{d\xi_{1ПГ}}{d\tau} = \eta \psi L_{ПГ} - \frac{\xi_{1ПГ}}{\rho_{1m}} G_G; \quad (4)$$

– уравнение баланса оптической плотности дыма

$$V_1 \frac{d\mu_1}{d\tau} = \psi D - \frac{\mu_1}{\rho_{1m}} G_G; \quad (5)$$

– уравнение состояния газовой среды

$$P_{1m} = \rho_{1m} R T_{1m}, \quad (6)$$

где V_1 – объем помещения, м³;

$\rho_{1m}, \xi_{1O_2}, \xi_{1ПГ} = \{\xi_{1CO}, \xi_{1CO_2}\}, \mu_1$ – средние значения

значения плотности газовой среды, парциальных плотностей компонентов газовой смеси и оптической плотности дыма, кг·м⁻³; ψ – скорость выгорания горючей нагрузки (ГН), кг·с⁻¹; G_G – расход газов, уходящих из помещения через проемы, кг·с⁻¹; η – коэффициент полноты сгорания ГН; Q_H^p – теплота сгорания ГН, Дж·кг⁻¹; φ – коэффициент теплопоглощения; C_p – теплоемкость среды при постоянном давлении, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; T_{1m} – среднееобъемная температура газовой среды в помещении, К; L_{O_2} – количество кислорода, необходимое для сгорания единицы массы ГН; $L_{ПГ}$ – количество токсичных газов, образующихся при сгорании единицы массы ГН; D – дымообразующая способность ГН, Нп·м²·кг⁻¹; P_{1m} – среднееобъемное давление газовой среды в помещении, Па; R – газовая постоянная, 8,31 кДж·кг⁻¹·К⁻¹.

Уравнения (3)–(5) можно обобщить:

$$V_1 \frac{d\xi_{1i}}{d\tau} = \psi L_i - \frac{\xi_{1i}}{\rho_{1m}} G_G, \quad (7)$$

где

$$\xi_{1i} = \{\xi_{1O_2}, \xi_{1ПГ}, \xi_{1ДП}, \mu_1\}, \quad (8)$$

$$L_i = \{L_{ГН}; -\eta L_{O_2}; \eta L_{CO_2}; \eta L_{CO}; \eta L_{ДП}; D\}. \quad (9)$$

Тогда, чтобы решить систему уравнений (1)–(5), необходимо и достаточно решить уравнение (7).

Исходя из принятых допущений и используя уравнение состояния (6), можно получить следующее соотношение [2]:

$$\rho_0 T_0 = \rho_{1m} T_{1m}. \quad (10)$$

Решая уравнение (7) совместно с (2), получим

$$\xi_{1i} = \frac{L_i}{a} + \left(\xi_{1i}^0 - \frac{L_i}{a} \right) \exp \left(- \frac{a}{V_1} \int_0^\tau \psi d\tau \right), \quad (11)$$

где $\xi_{1i}^0 = \{\rho_{1m}^0, \xi_{1O_2}^0, \xi_{1CO_2}^0, \xi_{1CO}^0, \xi_{1ДП}^0, \mu_1^0\}$ – значения плотности газовой среды, парциальных плотностей компонентов газовой смеси и оптической плотности дыма в момент времени $\tau = 0$;

$\xi_{1i} = \{\rho_{1m}, \xi_{1O_2}, \xi_{1CO_2}, \xi_{1CO}, \xi_{1ДП}, \mu_1\}$ – средние значения плотности газовой среды, парциальных плотностей компонентов газовой смеси и оптической плотности дыма на отрезке времени

$\tau = [\tau_0, \tau_{кр}]$; $L_i = \{L_{ГН}, -\eta L_{O_2}, \eta L_{CO_2}, \eta L_{CO}, \eta L_{ДП}, D\}$ – количество вещества, выделившегося в результате термической деструкции ГН $L_{ГН}$ и реакции горения;

$$a = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi_1)}{C_p T_0 \rho_0}.$$

Для определения КПП с учетом уровня рабочей зоны используем формулу Меркушкиной-Зотова-Тимошенко:

$$\frac{\xi_{ij} - \xi_{ij}^0}{\xi_{ij}^{ps} - \xi_{ij}^0} = \frac{2h}{y} \exp \left(-1,4 \frac{y}{2h} \right), \quad (12)$$

где ξ_{ij}^{ps} – предельно допустимое значение среднего параметра состояния в рабочей зоне; y – координата рабочей зоны, отсчитываемая от поверхности пола; h – половина высоты помещения.

Критическая продолжительность пожара с учетом высоты рабочей зоны в помещении, в котором расположен очаг пожара, составляет

$$\tau_{кр}^{ps} = \left[\frac{V_1 \ln \left(1 - \frac{\beta_i}{Z} \right)^{-1}}{aA} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (13)$$

где A и n – параметры, зависящие от условий распространения горения по твердой ГН [2, с. 62];

$$\beta_i = \frac{Z(\rho_{1m}^{кр} - \rho_0)}{\xi_{1*} - \rho_0} \quad \text{– для расчета температуры;}$$

$$\beta_i = \frac{\xi_{1j}^{ps} - \xi_{1j}^0}{\xi_{1*} - \xi_{1j}^0} \quad \text{– для расчета парциальных плотностей газовой среды.}$$

Динамика ОФП в помещении, смежном с очагом пожара. Запишем систему уравнений, при этом, как и в работе [5], сделаем допущение, что режим газообмена является односторонним, т.е. продукты горения из помещения очага пожара через общий проем выходят в смежное помещение:

– уравнение материального баланса

$$V_2 \frac{d\rho_{2m}}{d\tau} = nG_1 - G_2; \quad (14)$$

– уравнение энергетического баланса

$$C_p T_{1m} n G_1 (1 - \varphi_2) - C_p T_{2m} G_2 = 0; \quad (15)$$

– уравнение баланса кислорода

$$V_2 \frac{d\xi_{2O}}{d\tau} = n \frac{\xi_{1O}}{\rho_{1m}} G_1 - \frac{\xi_{2O}}{\rho_{2m}} G_2; \quad (16)$$

– уравнение баланса токсичных продуктов горения

$$V_2 \frac{d\xi_{2TG}}{d\tau} = n \frac{\xi_{1TG}}{\rho_{1m}} G_1 - \frac{\xi_{2TG}}{\rho_{2m}} G_2; \quad (17)$$

– уравнение баланса оптической плотности дыма

$$V_2 \frac{d\mu_2}{d\tau} = n \frac{\mu_1}{\rho_{1m}} G_1 - \frac{\mu_2}{\rho_{2m}} G_2; \quad (18)$$

– уравнение состояния газовой среды

$$P_{2m} = \rho_{2m} R T_{2m}. \quad (19)$$

Здесь G_1 – расход газов из помещения очага пожара в смежное с ним, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; G_2 – расход газов из смежного с очагом пожара помещения в атмосферу, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; ρ_{im} , ξ_{iO} , ξ_{iTG} , μ_i – средние значения плотности газовой среды, парциальных плотностей кислорода и токсичных продуктов горения, оптической плотности дыма, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; C_p – теплоемкость среды при постоянном давлении, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$; T_{im} – среднетемпература газовой среды в помещении, К ; φ_2 – коэффициент теплопоглощения; V_i – объем помещения, м^3 ; $n = F_D / (F_D + \sum F_{Dj})$ – коэффициент проемности, характеризующий газообмен помещения очага пожара и смежного с ним [6]; F_D – площадь проема между смежными помещениями, м^2 ; $\sum F_{Dj}$ – сумма площадей открытых проемов в помещении очага пожара, м^2 ; τ – время, с ; $i = 1, 2$ (индекс 1 обозначает помещение очага пожара, индекс 2 – помещение, смежное с очагом пожара).

Уравнения (14)–(18) можно записать в обобщенном виде:

$$V_2 \frac{d\zeta_{2i}}{d\tau} = n \frac{\zeta_{1i}}{\rho_{1m}} G_1 - \frac{\zeta_{2i}}{\rho_{2m}} G_2, \quad (20)$$

где $\zeta_{2i} = \{\rho_{2m}, \xi_{2O}, \xi_{2TG}, \mu_2\}$ – средние значения плотности газовой среды, парциальных плотностей токсичных компонентов газовой смеси, оптической плотности дыма на отрезке времени $\tau = [\tau_0, \tau_{кр}]$.

Решая уравнение (20), получим

$$\begin{aligned} \zeta_{2i} = & \frac{\zeta_*}{1 - \varphi_2} (1 - \exp(-Z_2(1 - \varphi_2))) + \\ & + \frac{\zeta_i^0 - \zeta_*}{1 - \varphi_2 - k} (\exp(-Z_2 k) - \exp(-Z_2(1 - \varphi_2))) + \\ & + \zeta_i^0 \exp(-Z_2(1 - \varphi_2)), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\zeta_* = \frac{C_p T_0 L_{TD}}{(1 - \varphi_1) Q_H^0} \zeta_i^0, \quad Z_2 = \frac{na}{V_2} \int_0^\tau \psi d\tau, \quad k = \frac{V_2}{nV_1}.$$

Для определения КПП рассчитываем критические значения среднеобъемных параметров пожара с учетом высоты рабочей зоны в смежном помещении:

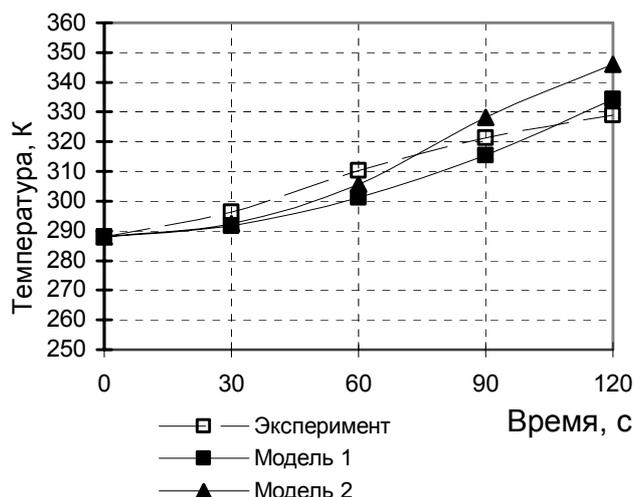
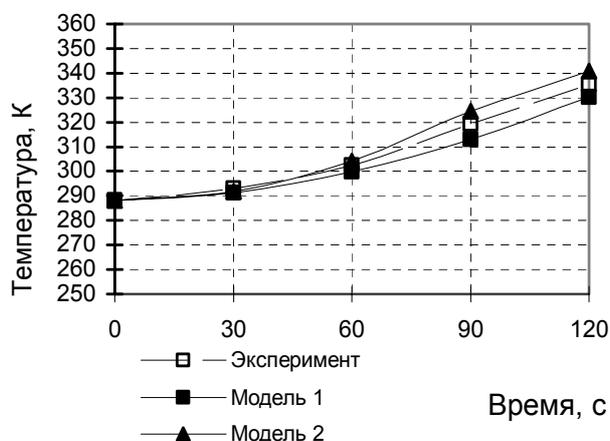
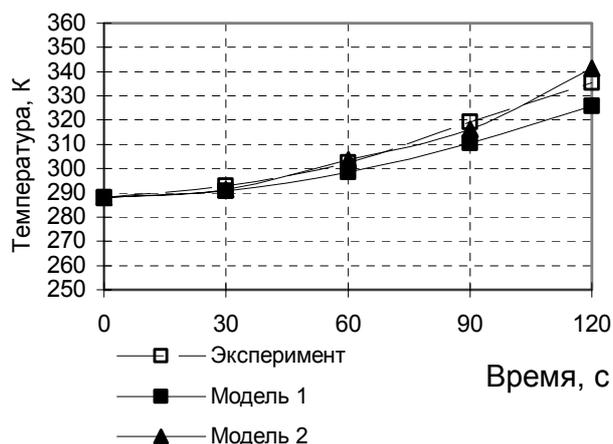
$$\zeta_{ij}^{kp} = \zeta_{ij}^0 + \frac{\zeta_{ij}^{p3} - \zeta_{ij}^0}{\frac{y}{2h} \exp\left(1,4 \frac{y}{2h}\right)}. \quad (22)$$

Критическая масса ГН есть масса ГН, при сгорании которой в рабочей зоне смежного помещения параметры пожара достигнут своих опасных для человека значений

$$\begin{aligned} \zeta_{2j}^{kp} = & \frac{\zeta_{1*}}{1 - \varphi_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{na}{V_2} M_{кр} (1 - \varphi_2)\right) \right) + \\ & + \frac{\zeta_{1i}^0 - \zeta_{1*}}{1 - \varphi_2 - k} \left(\exp\left(-\frac{na}{V_2} M_{кр} k\right) - \exp\left(-\frac{na}{V_2} M_{кр} (1 - \varphi_2)\right) \right) + \\ & + \zeta_{1i}^0 \exp\left(-\frac{na}{V_2} M_{кр} (1 - \varphi_2)\right). \end{aligned} \quad (23)$$

Уравнение (23) решается методом последовательных приближений. ОФП, наступающий первым, характеризуется наименьшей, по сравнению с другими, величиной $M_{кр}$.

Проверка адекватности модели проведена с помощью экспериментальных данных, полученных в работе [7], и теоретических расчетов работы [6]. Эксперимент был проведен на модели клуба-театра на 600 мест, выполненной в 1/6 натуральной величины и состоящей из двух помещений: сценического и зрительного зала. Для проверки теории использованы данные, полученные в двух сериях экспериментов. Первая проводилась при закрытых проемах в сценическом помещении (опыт 7). Вторая – при открытых (опыт 1). Проем между смежными помещениями был открыт во всех опытах. Более подробно описание эксперимента приведено в работе [7]. На рис. 1–3 приведены графики изменения среднеобъемной температуры, где модель 1 – значения среднеобъемной температуры, полученные с помощью уравнений, представленных выше; модель 2 – с помощью уравнений в работе [6]. Максимальные расхождения составили: модели 2 и эксперимента – 4,9 %; модели 1 и эксперимента – 3 %; модели 1 и модели 2 – 4,5 %.

Рис. 1. Изменение среднеобъемной температуры (первая серия ($n = 1$))Рис. 2. Изменение среднеобъемной температуры (вторая серия ($n = 0,9$))Рис. 3. Изменение среднеобъемной температуры (вторая серия ($n = 0,8$))

Лапшин Сергей Сергеевич,
Ивановский институт ГПС МЧС России,
преподаватель кафедры гражданской защиты,
e-mail: wfxdfx@gmail.com

Заключение

Рассмотренный подход к решению системы уравнений интегральной математической модели пожара позволяет обобщить уравнения пожара и определить критическую продолжительность пожара. Общий вид уравнения динамики среды позволит при выявлении исследователями новых опасных компонентов получить КПП, располагая данными о массовых расходах, начальных и критических значениях парциальных плотностей этих компонентов.

Полученное обобщенное решение позволяет находить среднеобъемные значения ОФП в смежном с очагом пожара помещении. Отличие температурных кривых модели 1 и модели 2 объясняется тем, что при решении уравнений модели 1 использовалось обобщенное решение уравнений интегральной модели для очага пожара, которое получено в работе [4] без упрощения балансового уравнения массы, принятого в работе [2].

Для оценки влияния этого упрощения на точность расчета ОФП, уточнения коэффициентов проемности n и теплопоглощения ϕ требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Кошмаров М.Ю. Моделирование динамики начальной стадии пожара в помещениях, зданиях и сооружениях при воспламенении горючей жидкости: дис... канд. техн. наук. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2004.
2. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000.
3. Deibjerg T., Husted B.P., Bygbjerg H., Westerman D. Argos User's Guide / Danish Institute of Fire and Security Technology, 2003.
4. Wade C.A. BRANZFIRE Technical Reference Guide BRANZ Study Report No 92. Building Research Association of New Zealand, Judgeford, 2004.
5. Лапшин С.С., Тараканов Д.В. Обобщенное решение системы уравнений начальной стадии пожара в помещении // Вестник Ивановского института ГПС МЧС России. – 2008. – №1. – С. 25–28.
6. Коршунов И.В., Кошмаров М.Ю. Математическая модель начальной стадии пожара в театре с колосниковой сценой. Ч. II: Экспериментальная проверка математической модели // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т.15. – № 2. – С. 17–23.
7. Кривошеев И.Н. Исследование начальной стадии развития пожара в зрелищных предприятиях (с целью обоснования допустимого времени эвакуации): дис... канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1973.