

УДК 614.841

О РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА ПРИ ЕГО ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ

Кузьмицкий В.А.

Проанализированы ведущие уравнения интегральной модели пожара для помещения при его значительной продолжительности. Отмечено, что экспоненциальная зависимость температуры от массы пожарной нагрузки, отнесенной к массе воздуха в помещении, m , используемая для начальной стадии пожара, дает слишком быстрый рост даже на этой стадии и не может быть экстраполирована на продолжительное время пожара – большее нескольких минут. Учет этого обстоятельства необходим, в частности, для моделирования динамики развития опасных факторов пожара в помещениях, смежных с помещением с пожаром. Уравнение для временной динамики относительной плотности газовой среды ρ/ρ_0 сформулировано в терминах параметров m' , q и p , задающих скорость выгорания пожарной нагрузки, теплоту сгорания и комбинацию геометрических размеров проема и помещения, соответственно. Для его решения использована программа, написанная в системе Mathematica 9. Разработанная программа может служить основой для расчетов ОФП в горящем помещении, а также в помещениях, смежных с ним.

Ключевые слова: пожар в помещении; интегральная модель; программа в системе Mathematica

(Поступила в редакцию 26 мая 2016 г.)

Введение. Определение опасных факторов пожара (ОФП), необходимое для эвакуации людей из зданий и сооружений, предусматривает расчеты на основе интегральной, зонной и дифференциальной модели пожара, что закреплено в законодательных документах Республики Беларусь и Российской Федерации [1,2]. Интегральная модель, хотя и уступает по своей точности дифференциальным и зонным моделям, тем не менее, обладает рядом достоинств, главное из которых сравнительная простота. В ее основу положены дифференциальные уравнения баланса для физических характеристик состояния газовой среды в помещении, усредненных по его объему [3-7]. Моделирование динамики развития пожара с привлечением интегральной модели актуально также с точки зрения развития практических, инженерных методик расчета ОФП.

Необходимо отметить, что ряд используемых соотношений интегральной модели справедлив в течение короткого времени от начала. Между тем, реальный пожар может продолжаться в течение достаточно большого времени, и сведения о состоянии газовой среды могут быть необходимы для значительных промежутков времени от начала горения. Такая ситуация достаточно актуальна, например, при рассмотрении ОФП в помещениях, смежных с помещением с пожаром [8-11]. При этом можно предполагать, что горение материалов в таких помещениях еще не наступило, и источником ОФП для них являются горячие газы, поступающие из помещения с пожаром [8].

В настоящей работе проанализированы ведущие уравнения интегральной модели для значительной продолжительности пожара. Представлена вычислительная программа, написанная в среде Mathematica 9, с помощью которой возможно проведение расчетов температуры как ОФП. На основе разработанной программы возможен также расчет иных ОФП, таких как задымленность, пониженное содержание кислорода, концентрация токсических газов и др.

Основная часть. Ведущая система уравнений интегральной модели пожара отражает законы сохранения массы и энергии газовой среды. Она может быть записана следующим образом (см. [3-7]):

$$V \frac{d\rho}{dt} = \psi - G_{\Gamma} + G_{\text{В}}, \quad (1)$$

$$\frac{V}{\gamma - 1} \cdot \frac{dP}{dt} = \psi \cdot \eta \cdot (1 - \varphi) \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{р}} - G_{\Gamma} c_p T + G_{\text{В}c_p} T_0. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) использованы следующие обозначения: ρ и P – среднеобъемная плотность и давление газовой среды помещения с объемом V ; ψ – массовая скорость выгорания (газификации) горючего материала (пожарная «нагрузка»); G_{Γ} – массовый расход горячих газов с температурой T , уходящих через проем во внешнее окружение; $G_{\text{В}}$ – массовый расход холодного воздуха с температурой T_0 , поступающего через проем в помещение с пожаром; $\gamma = c_p/c_v = 1,4$ – показатель адиабаты идеального газа, c_p, c_v – его удельные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме; η – коэффициент полноты сгорания, $Q_{\text{Н}}$ – удельная низшая теплота сгорания; ϕ – коэффициент теплопотерь в окружающие ограждения. Уравнения (1), (2) должны быть решены при условии, что заданы начальные значения среднеобъемных параметров газовой среды $\rho(t=0) = \rho_0$, $T(t=0) = T_0$, $P(t=0) = P_0$; обычно ρ_0, T_0, P_0 – плотность, температура и давление газовой среды при нормальных условиях.

В общем виде решение системы уравнений (1), (2) неизвестно. Однако в литературе представлено приближенное решение этих уравнений (так называемое нулевое приближение). Оно использует два главных допущения, основанных на эмпирических наблюдениях:

(i) Из-за наличия открытых проемов давление в помещении изменяется в течение всего пожара лишь в небольших пределах – около 0,01 % от давления атмосферного, т. е. ΔP составляет ~ 10 Па (см. обсуждение в [12]).

(ii) На начальной стадии пожара, в течение некоторого промежутка времени можно пренебречь поступлением холодного воздуха (см. [4] и ссылки там).

В соответствии с малостью изменения давления ΔP производная $\frac{dP}{dt}$ в уравнении (2) приравнивается нулю и (2) превращается в алгебраическое уравнение. С учетом этого дифференциальное уравнение (1) можно преобразовать к виду

$$\frac{df}{dt} = -q \cdot m' \cdot f + m' + g_{\text{В}} \cdot (1 - f), \quad (3)$$

здесь $f = \rho/\rho_0$ – относительная плотность газовой среды, $q = [\eta \cdot (1 - \phi) \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}] / (c_p T_0)$, $g_{\text{В}} = G_{\text{В}}/M_{\text{Возд}}$, $M_{\text{Возд}} = V\rho_0$ – начальная масса воздуха в помещении. Что касается величины m' , то необходимо отметить следующее. По своему смыслу пожарная нагрузка ψ – это масса горючего вещества, выгоревшего за единицу времени, т. е. производная от массы нагрузки $M_{\text{НАГР}}(t)$, выгоревшей к моменту времени t . Если $m = M_{\text{НАГР}}(t)/M_{\text{Возд}}$ – масса горючего материала, отнесенная к массе воздуха в помещении $M_{\text{Возд}}$, то $m' = \frac{dm}{dt} = \frac{1}{M_{\text{Возд}}} \frac{dM_{\text{НАГР}}}{dt}$ –

массовая скорость выгорания горючего материала, вновь отнесенная к массе воздуха $M_{\text{Возд}}$. Размерность $[m'] = 1/\text{с}$, размерность $[g_{\text{В}}] = (\text{кг}/\text{с})/\text{кг} = 1/\text{с}$, величины f и q – безразмерные.

В нулевом приближении, т. е. при использовании как первого ($\Delta P = 0$), так и второго допущений ($g_{\text{В}} = 0$), уравнение (3) приобретает вид

$$\frac{df}{dt} = -m' \cdot q \cdot f + m'. \quad (4)$$

Решить уравнение (4) не составляет труда. Без учета второго члена оно имеет вид

$$\frac{df}{dt} = -m' \cdot q \cdot f, \quad (5)$$

т. е. (5) является однородным уравнением по отношению к неоднородному (4).

С учетом

$$m(t) = \int_0^t m' dt \quad (6)$$

решение однородного уравнения (5) имеет вид простой экспоненциальной зависимости от приведенной массы нагрузки $m = m(t)$, выгоревшей к моменту времени t , что дает простую зависимость для плотности газовой среды, а также для температуры (из $\Delta P = 0$ следует $\rho T = \rho_0 T_0$):

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp[-q \cdot m(t)], \quad (7)$$

$$T = T_0 \cdot \exp[q \cdot m(t)]. \quad (8)$$

Неоднородное уравнение (4) обычно не рассматривается [3-7], хотя его решение легко получить хорошо известным методом варьирования постоянной, дающим

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp(-q \cdot m) + \rho_0 \cdot [1 - \exp(-q \cdot m)]/q. \quad (9)$$

Основанием для рассмотрения $\rho(t)$ только в виде (7) служит то, что параметр $q \gg 1$. Действительно, например, для типичной пожарной нагрузки вида «мебель + бытовые изделия» численные величины необходимых параметров равны: $Q_H^p = 1,38 \cdot 10^7$ Дж/кг [5], и $c_p = 1006,23$ Дж/(кг·К), $T_0 = 293$ К; при $\eta \sim 1$ и $\varphi \sim 0,1 \div 0,6$ [4-6] получаем, что диапазон $q \sim 20 \div 40$. Аналогичным образом, за итоговое решение для температуры берется выражение (8).

В дифференциальном уравнении (5) для плотности газовой среды f помещения (и тем самым его температуры) существенна зависимость от m' , т. е. от пожарной нагрузки $\psi(t)$. Обычно принимается следующие выражения для временной зависимости $\psi(t)$ [3-5].

При газификации твердого материала:

$$\psi(t) = \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma}. \quad (10)$$

При газификации горючей жидкости:

$$\psi(t) = \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma} \sqrt{t/t_{ст}}, \text{ при } t \leq t_{cm}, \quad (11)$$

$$\psi(t) = \psi_{уд} \cdot F_{\Gamma}, \text{ при } t \leq t_{cm}. \quad (12)$$

В формулах (10)–(12) F_{Γ} – площадь поверхности горения; для твердого материала F_{Γ} принимается равной:

$$F_{\Gamma} = \pi(v_{лt})^2 - \text{круговое распространение горения}, \quad (13)$$

$$F_{\Gamma} = bv_{лt} - \text{линейное распространение горения}. \quad (14)$$

Другие обозначения в формулах (10) – (14): $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость газификации; $t_{ст}$ – время стабилизации горения жидкости; $v_{л}$ – линейная скорость распространения пламени по поверхности твердого материала; b – ширина фронта пламени.

Как представляется, время стабилизации при горении жидкости $t_{ст}$ должно быть достаточно малым, так что горение за короткий промежуток времени охватывает всю площадь ее разлива. С учетом этого в дальнейшем будем полагать, что нагрузка $\psi(t)$ либо не зависит от времени (для горения жидкости), либо пропорциональна первой или второй степени времени:

$$\psi(t) = a_n t^{n-1}, \quad n = 1, 2, 3. \quad (15)$$

С учетом (15) уравнения (7,8) можно представить также в виде

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{t_{n-1}} \right)^n \right], \quad (16)$$

$$T(t) = T_0 \cdot \exp \left[\left(\frac{t}{\tau_{n-1}} \right)^n \right], \quad (17)$$

где

$$\tau_{n-1} = \left(\frac{nM_{возд}}{a_n q} \right)^{1/n}. \quad (18)$$

Оценим τ_{n-1} , например, для кругового распространения горения нагрузки в виде «мебель + бытовые изделия». Для объема помещения $V = 50$ м³ получаем $\tau_2 \cong 95$ с, а для объема $V = 400$ м³ – $\tau_2 \cong 190$ с (положено $\varphi \sim 0,1$ и $\rho_0 = 1,29$ кг/м³).

Таким образом, «нулевое приближение» справедливо в течение времени в несколько минут, а продолжительность реального пожара может быть гораздо большей. Это обстоятельство важно и с точки зрения моделирования динамики развития ОФП в помещениях, смежных с помещением с пожаром [8-11]. При этом можно предполагать, что горение ма-

териалов в таких помещениях еще не наступило, тогда источником ОФП для них будут горячие газы, поступающие из помещения с пожаром [8].

Необходимо отметить, что простая экстраполяция уравнения (8) на достаточно большое время развития пожара неприемлема, так как это соответствовало бы неограниченному, а также слишком быстрому росту температуры. В связи с этим требуется, прежде всего, пересмотр задания скорости горения пожарной нагрузки $\psi(t)$. Ее схематический вид представлен на рисунке 1, из которого видно, что горение можно разбить на три стадии: начальную I, характеризующуюся ростом скорости газификации (для $\psi(t) = \psi_I(t)$ приемлемо использование уравнений (10)-(14)); стадию стационарного горения II, при которой $\psi(t) = \psi_{II} = \text{const}$; стадию затухания, для которой $\psi(t) = \psi_{III}(t)$, и подходящим модельным выражением для $\psi_{III}(t)$ может быть $\psi_{III}(t) = \psi_{II} \cdot \exp(-\alpha_{\text{зат}}(t_{\text{зат}} - t))$. Здесь же можно отметить, что зависимость, аналогичную $\psi_{III}(t)$, можно использовать для учета тушения пожара при условии, что оно начинается в момент времени $t_{\text{туш}}$, $\psi(t) = \psi(t_{\text{туш}}) \cdot \exp(-\alpha_{\text{туш}}(t_{\text{туш}} - t))$, так что смысл $\psi(t_{\text{туш}}) \cdot \exp(-\alpha_{\text{туш}}(t_{\text{туш}} - t))$ состоит в том, что это скорость газификации материала при действии огнетушащих веществ.

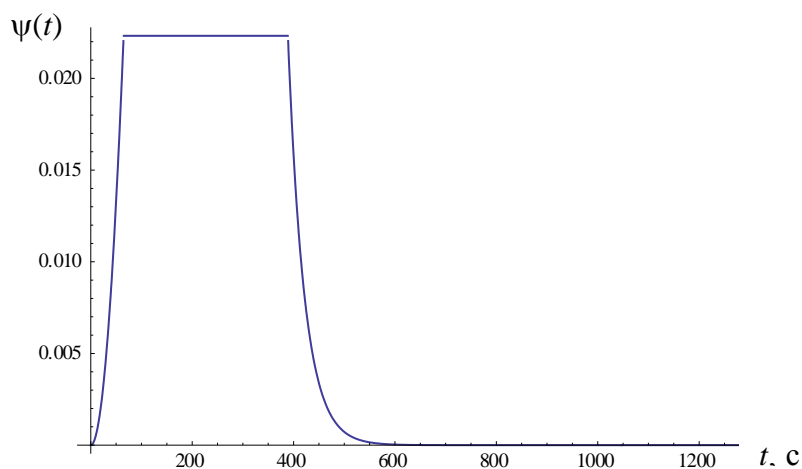


Рисунок 1 – Зависимость скорости горения пожарной нагрузки $\psi(t)$ на трех режимах (см. текст)

Можно отметить также, что масса нагрузки, выгоревшей к бесконечному (достаточно большому) моменту времени (см. формулу (6)) при вышеприведенном уточнении скорости газификации остается конечной. Численно она равна площади фигуры под кривой $\psi(t)$ на рисунке 1 и представляет собой суммарную массу пожарной нагрузки. Использование формулы (6) теперь дает конечную температуру при $t \rightarrow \infty$, однако она остается сильно завышенной из-за большой величины q для реальных помещений, в которых хранится материал, потенциально склонный к горению.

Учтем теперь еще то обстоятельство, что слагаемое $m' + g_{\text{в}} \cdot (1 - f)$ в правой части уравнения (3) положительно. Это означает, что его учет делает производную большей, чем $-m' \cdot q \cdot f$, что для f дает меньшее падение со временем, чем в (7), а, следовательно, меньший подъем температуры, чем в (8).

В дальнейшем мы будем предполагать, что для потока холодного воздуха $G_{\text{в}}$, входящего через дверной проем в помещение справедлива формула (см. [3-7])

$$G_{\text{в}} = \lambda \cdot \rho_0 \cdot (1 - \rho/\rho_0)^{1/2}. \quad (19)$$

В формуле (19)

$$\lambda = 2/3 \xi_{\text{в}} b_{\text{пр}} (h_{\text{пр}})^{3/2} (2g)^{1/2}, \quad (20)$$

где $\xi_{\text{в}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, $b_{\text{пр}}$ – ширина проема, $h_{\text{пр}}$ – полувысота помещения, g – ускорение свободного падения. Размерность $[\lambda] = \text{м}^3/\text{с}$. Предполагается, что плоскость равных давлений для дверного проема в соответствии с наблюдениями [10] находится на уровне полувысоты помещения $h_{\text{пр}}$.

С учетом (19, 20) уравнение (3) можно преобразовать к виду

$$\frac{df}{dt} = -m' \cdot q \cdot f + m' + p (1 - f)^{3/2}, \quad (21)$$

где $m' = \psi/M_{\text{возд}}$, $p = \lambda/V$ – коэффициент, в котором скомбинированы геометрические размеры проема и помещения. Размерность $[p]=\text{с}^{-1}$ и для данного помещения $p = \text{const}$.

Для решения уравнения (21) была составлена программа с использованием пакета компьютерной алгебры Mathematica 9.

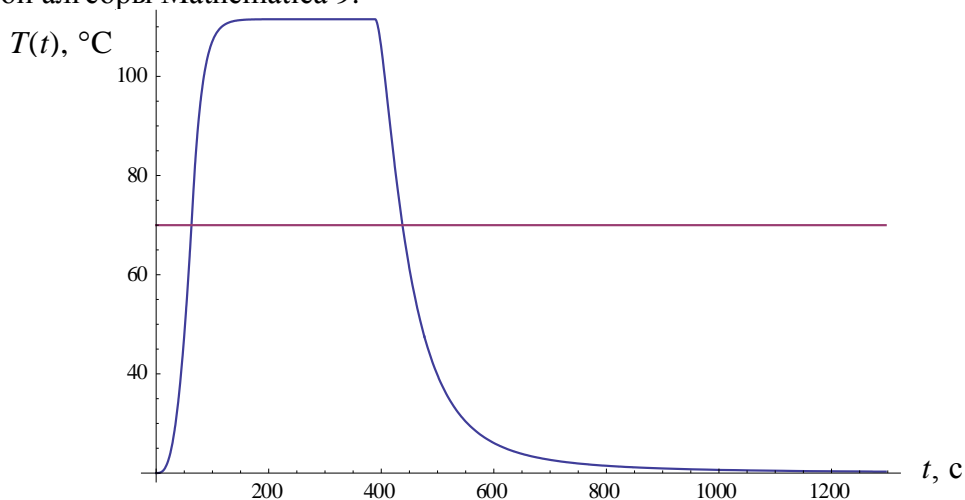


Рисунок 2 – Рассчитанная температура газовой среды при учете скорости горения пожарной нагрузки $\psi(t)$ на трех режимах. Горизонтальная линия на графике отвечает ОФП по температуре $T = 70^\circ\text{C}$

На рисунке 2 представлен пример расчета среднеобъемной температуры $T(t)$ в горящем помещении с начальной температурой 20°C . Параметры помещения взяты следующими: объем $V = X \cdot Y \cdot Z$ при длине $X = 6,7$ м, ширине $Y = 3,9$ м и высоте $Z = 2,55$ м. Рассмотрена нагрузка типа «мебель + бытовые изделия», характеризуемая параметрами $Q_H = 1,38 \cdot 10^7$ Дж/кг, $\eta = 0,9$, $\phi = 0,1$. Предполагалось, что имеет место круговое распространение пламени до максимального радиуса $R_{\text{нагр}} = 0,7$ м с линейной скоростью $v_{\text{л}} = 0,0108$ м/с, удельная массовая скорость газификации $\psi_{\text{уд}} = 0,0145$ кг³/(м²·с) [5]. Общий вид скорости выгорания задан в соответствии с рисунком 1.

Для начальной стадии пожара расчетные данные для среднеобъемной температуры $T(t)$ качественно правильно воспроизводят рост температуры, полученный в эксперименте [10], а также в расчетах FDS с помощью полевой модели [11]. В целом, однако, рост температуры на рисунке 2 представляется излишне быстрым.

Заключение. В настоящей статье рассмотрены ведущие уравнения интегральной модели пожара для помещения с пожаром, отражающие законы сохранения массы и энергии газовой среды. Уравнение для временной зависимости относительной плотности газовой среды $f = \rho/\rho_0$ сформулировано с помощью параметров m' , q и p , задающих скорость выгорания пожарной нагрузки, теплоту сгорания и комбинацию геометрических размеров проема и помещения, соответственно (см. выражения (3) и (21)). В «нулевом» приближении температура $T = T_0 \cdot \exp[q \cdot m(t)]$ дает слишком быстрый рост даже на начальной стадии пожара. Такая зависимость не может быть экстраполирована на времена, большее нескольких минут, что необходимо учитывать, в частности, для моделирования динамики ОФП в помещениях, смежных с помещением с пожаром. Для решения уравнения (21) написана вычислительная программа, использующая пакет компьютерной алгебры Mathematica 9. В качестве примера выполнен расчет среднеобъемной температуры $T(t)$ в горящем помещении, результаты которого на качественном уровне правильно соответствуют экспериментальным данным и расчетам FDS по полевой модели. Разработанная программа может служить основой для выполнения расчетов ОФП в горящем помещении, а также в смежных помещениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 01.07.92. – М: Комитет стандартизации и метрологии СССР: Министерство внутренних дел СССР, Министерство химической промышленности СССР, 1996. – 83 с.
2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС

- России, 30 июня 2009 г., № 382: В ред. Приказа МЧС от 12.12.2011 г. № 749 // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru>. – Дата доступа: 02.03.2015.
3. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
 4. Кошмаров, Ю.А. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара // Ю.А. Кошмаров, В.В.Рубцов. – М.: МИПБ МВД РФ, 1999. – 89 с.
 5. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
 6. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
 7. Пузач, С.В. Новые представления о расчетах необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах / С.В. Пузач, А.В. Смагин, О.С. Лебедченко, Е.С. Абакумов; под ред. С.В. Пузача. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.
 8. Кузьмицкий, В.А. Опасные факторы пожара на начальной стадии в смежном помещении в рамках интегральной модели / В.А. Кузьмицкий, И.И. Полевода, В.А. Осяев // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 1 (13). – С. 105–109.
 9. Кошмаров, Ю.А. Динамика ОФП в помещении, смежном с очагом с пожаром / Ю.А. Кошмаров, С.С. Лапшин, Д.В. Тараканов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009. – № 1. – С. 67–75.
 10. Осяев, В.А. Характеристики газообмена через проем между двумя помещениями на начальной стадии пожара / В.А.Осяев // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь – 2013. – № 2 (18) – С. 105–109.
 11. Осяев, В.А. Расчеты с помощью программного комплекса FDS динамики пожара на начальной стадии для двух смежных помещений: сопоставление с экспериментальными данными / В.А. Осяев, В.А. Кузьмицкий, В.А. Кудряшов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. –2015. – № 1(37) – С. 87–95.
 12. Кузьмицкий, В.А. Газообмен через проем при учете распределения температуры в помещении с пожаром / В.А. Кузьмицкий, В.А. Осяев, И.И. Полевода // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь. – 2009. – № 2 (10). – С. 86–95.

SOLVING OF THE INTEGRAL MODEL EQUATIONS OF FIRE AT ITS PROLONGED DURATION

Valery Kuzmitsky, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The aim of the paper is to analyze the leading equations of the integral model of the fire in the compartment for prolonged time.

Methods. The approaches for solving of the ordinary differential equation were used.

Findings. It has been noted that the exponential dependence of the temperature on the mass of the fire load (divide to air mass in the compartment), m , which is used for the initial stage of the fire, gives too rapid rise already at this stage and cannot be extrapolated to prolonged fire for time more than some minutes. The equation for dynamics of relative gas medium density ρ/ρ_0 has been formulated in terms of the parameters m' , q , and p which represent the rate of fire load burning, combustion heat and a combination of the geometric dimensions of the compartment and opening, respectively.

Application field of research. The obtained results can be used for calculation of fire hazards both in the compartment with fire and adjacent compartment.

Conclusions. The leading equations of the integral model of fire in the compartment for prolonged stage have been analyzed. A program to solve corresponding equation using Mathematica 9 system has been written.

Key words: compartment fire, integral model of fire, program in the system Mathematica.

(The date of submitting: May 26, 2016)

REFERENCES

1. *GOST 12.1.004–91. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaja bezopasnost'. Obshhie trebovaniya* [Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements] Introduced 01.07.92. Moscow. Komitet standartizacii i metrologii SSSR: Ministerstvo vnutrennih del SSSR, Ministerstvo himicheskoy promyshlennosti SSSR, 1996. 83 p. (rus)
2. *Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzheniyah i stroeniyah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti* [On approval of the methodology for determining the estimated value of fire risk in buildings, construction and structures of various classes of functional fire hazard]: *Prikaz MChS Rossii, 30 iyunja 2009 g., № 382: V red. Prikaza MChS ot 12.12.2011 g. № 749*, available at <http://www.mchs.gov.ru> (accessed: March 02, 2015) (rus)
3. Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Molchadskiy I.S., Shevlyakov A.N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Thermogasdynamics of fires in rooms]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 448 p. (rus)
4. Koshmarov Yu.A., Rubcov V.V. *Processy narastaniya opasnyh faktorov pozhara v proizvodstvennyh pomeshheniyah i raschet kriticheskoy prodolzhitel'nosti pozhara* [Processes increase fire hazards in the production facilities and the calculation of the critical fire duration]. Moscow: MIPB MVD RF, 1999. 89 p. (rus)
5. Koshmarov Yu.A. *Prognozirovaniye opasnyh faktorov pozhara v pomeshhenii. Uchebnoye posobie* [Prediction of fire hazards in the room. Tutorial]. Moscow: Akademija GPS MVD Rossii, 2000. 118 p. (rus)
6. Puzach S.V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshhenii i ih primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods for calculating heat and mass transfer in a fire in the room and their application in solving practical problems firefighting]. Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2005. 336 p. (rus)
7. Puzach S.V., Smagin A.V., Lebedchenko O.S., Abakumov E.S. *Novye predstavleniya o raschetah neobhodimogo vremeni jevakuacii ljudej i ob jeffektivnosti ispol'zovaniya portativnyh fil'trujushhih samospasatelej pri jevakuacii na pozharah* [New ideas about the calculation time required evacuation of people and the effectiveness of the use of portable filter self-rescuers to evacuate at fire]. Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2007. 222 p. (rus)
8. Kuz'mickij V.A., Polevoda I.I., Osjaev V.A. *Opasnye faktory pozhara na nachal'noj stadii v smezhnom pomeshhenii v ramkah integral'noj modeli* [Hazards of fire at an early stage in an adjacent room in

- framework of the integral model]. *Vestnik Komandno-inzhenerного instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2011. No 1 (13). Pp. 105-109. (rus)
9. Koshmarov Yu.A., Lapshin S.S., Tarakanov D.V. Dinamika OFP v pomeshhenii, smezhnom s ochagom s pozharom [Hazards fire dynamics in the room adjacent to the fireplace with fire]. *Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija*. 2009. No 1. Pp. 67-75. (rus)
 10. Osjaev V.A. Harakteristiki gazoobmena cherez proem mezhdvumja pomeshhenijami na nachal'noj stadii pozhara [Characteristics of gas exchange through the opening between the two rooms at the initial stage of a fire]. *Vestnik Komandno-inzhenerного instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2013. No 2(18). Pp. 105–109. (rus)
 11. Osjaev V.A., Kuz'mickij V.A., Kudrjashov V.A. Raschety s pomoshh'ju programmного kompleksa FDS dinamiki pozhara na nachal'noj stadii dlja dvuh smezhnyh pomeshhenij: sopostavlenie s jeksperimental'nymi dannymi [Calculations using the software package FDS fire dynamics in the initial stage for the two adjacent rooms: a comparison with experimental data]. *Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidacija*. 2015. No 1(37). Pp. 87-95. (rus)
 12. Kuz'mickij V.A. Osjaev V.A., Polevoda I.I. Gazoobmen cherez proem pri uchete raspredelenija temperatury v pomeshhenii s pozharom [Gas exchange through the opening with the account of the temperature distribution in the room with the fire]. *Vestnik Komandno-inzhenerного instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2009. No. 2 (10). Pp. 86-95. (rus)