

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА СКОРОСТИ ОПУСКАНИЯ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ПРИПОТОЛОЧНОГО ЗАДЫМЛЕННОГО НАГРЕТОГО ГАЗОВОГО СЛОЯ ПРИ ПОЖАРЕ В АТРИУМЕ

Представлены результаты расчета скорости опускания нижней границы припотолочного газового слоя в модельном атриуме с использованием различных зонных подходов и полевой модели. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Показано, что при использовании зонной математической модели необходимо учитывать форму конвективной колонки, образующейся над источником горения. Отмечено, что применение приближения неограниченной свободно-конвективной струи для описания параметров конвективной колонки не отражает реальную термогазодинамическую картину развития пожара (в первую очередь влияние перекрытия атриума) и может привести к недооценке или переоценке пожарной опасности атриумов.

Ключевые слова: пожар, атриум, припотолочный газовый слой, тепломассообмен, термогазодинамика, полевая математическая модель, зонная математическая модель, горение.

## Nguyen Thanh Hai (Vietnam) CALCULATION FEATURES OF VELOCITY LOWERING LOWER BOUND CEILING JET SMOKE HOT GASES LAYER IN A FIRE AT ATRIUM

The results of calculating the speed of lowering the lower boundary ceiling jet gas layer in the atrium of the model using different approaches, and the band field model. A comparison with experimental data. It is shown that by using a mathematical model of the band must be considered a form of the convective column, formed over the source of combustion. It is noted that the use of approximations of unrestricted free-convective jets to describe the parameters of the convective column themogasdynamic not reflect the real picture of a fire (especially the influence of floor atrium) and may lead to underestimation or overestimation of fire danger atriums.

Key words: fire, atrium, ceiling jet gas layer, themogasdynamic, field mathematical model, zone mathematical model, combustion.

**Введение.** Реальные физико-химические процессы, протекающие во время пожара в атриуме, являются сложными, нестационарными, трехмерными, экспериментально не изученными тепломассообменными процессами. Вопрос точности и надежности метода расчета тепломассообмена является ключевым в обеспечении безопасности людей, при выборе параметров и мест размещения датчиков систем пожаровзрывобезопасности, а также при проведении эффективных противопожарных мероприятий.

Скорость опускания припотолочного газового слоя определяется, в первую очередь, величиной массового расхода газовой смеси, поступающей из конвективной колонки в вышеуказанный слой. При этом в качестве основного допущения принимается, что конвективная колонка над источником горения является неограниченной свободно-конвективной струей. Однако влияние перекрытия, как показано в [1, 2], существенно и требует проведения дальнейших исследований.

**Зонная модель расчета тепломассообмена при пожаре.** Используется трехзонная модель, в которой объем помещения разбит на зоны конвективной колонки, припотолочного слоя и холодного воздуха [3]. В отличие от метода расчета [3], учтено, что нижняя граница припотолочного слоя может находиться ниже верхнего среза открытого проема. Аналогичный случай рассмотрен, например, в [4].

Принципиальная схема тепломассообмена в помещении для трехзонной модели имеет вид, показанный на рис. 1. Стрелками показаны направления течения газовой смеси и тепловые потоки.

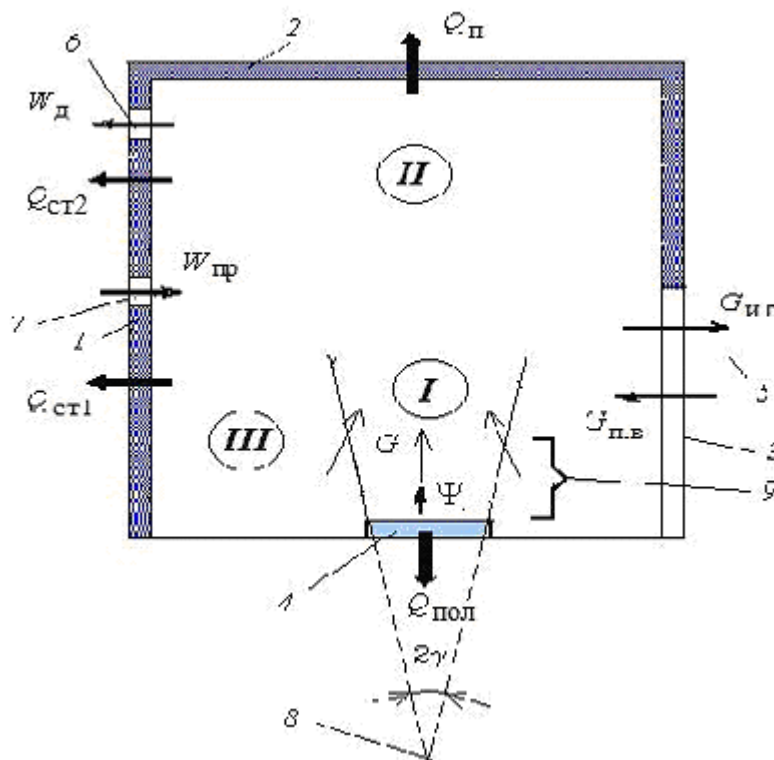


Рис. 1. Схема расчёта тепломассообмена в помещении:

- 1 – стены; 2 – перекрытие; 3 – открытый проём; 4 – горючий материал;
- 5 – нейтральная плоскость (нижняя граница припотолочного слоя);
- 6 – система дымоудаления; 7 – система приточной вентиляции;
- 8 – точечный "фиктивный" источник теплоты; 9 – высота пламенной зоны;
- I – зона конвективной колонки; II – зона нагретого задымлённого припотолочного слоя; III – зона холодного воздуха

Для определения массовых расходов и средних температур газовой смеси в поперечных сечениях конвективной колонки использованы два подхода:

- точечный источник тепловыделения находится ниже поверхности горючего материала (полуэмпирический метод расчета [3, 5]);
- распределенный источник тепловыделения находится выше поверхности горючего материала (эмпирический [6] и полуэмпирический методы [1, 2]).

В первом случае [3, 5]:

$$G = 0,21 \left[ \frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} (z + z_{\text{ф.и}})^{\frac{5}{3}}, \quad (1)$$

$$T_{\text{ср,к}} = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p G}. \quad (2)$$

При втором подходе массовый расход в сечении конвективной колонки в случае использования эмпирического метода равен [6]:

$$\text{при } z > z_{\text{пл}}: G = 0,071 \left( \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{1/3} z^{5/3} + 1,8 \cdot 10^{-6} Q_{\text{пож}}(1-\chi), \quad (3)$$

$$\text{при } z \leq z_{\text{пл}}: G = 0,032 \left( \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{3/5} z, \quad (4)$$

где  $z_{\text{пл}} = 0,166 \left( \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{2/5}$  – высота пламенной зоны, м.

При использовании полуэмпирического метода [1, 2] массовый расход находится из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{dG}{dz} = \frac{Bz(r + z\text{tg}\gamma)^4}{T_0 A G (G T_0 + Bz)} + \frac{2G\text{tg}\gamma}{r + z\text{tg}\gamma} - \frac{B}{T_0} \left( 1 - \frac{2z\text{tg}\gamma}{r + z\text{tg}\gamma} \right). \quad (5)$$

Средняя температура в сечении конвективной колонки определяется по формуле (2).

Высота нижней границы припотолочного слоя находится из решения обыкновенного дифференциального уравнения, полученного из закона сохранения энергии для припотолочного слоя:

$$\frac{dz_{\text{н.г}}}{d\tau} = - \frac{G_{\text{н.г}}}{\rho_0 F_{\text{п}}} - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 F_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Начальное условие (при  $\tau = 0$ ) имеет вид:  $z_{\text{н.г}} = H - \delta$ .

Уравнение (6) решается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Среднеобъемная температура и плотность в припотолочном слое находятся из решений дифференциального уравнения закона сохранения массы припотолочного слоя и уравнения состояния идеального газа соответственно:

$$V \frac{d\rho_2}{d\tau} = G_{н.г} - G_{и.г}, \quad (7)$$

$$p_2 \approx p_0 = \rho_2 R T_2. \quad (8)$$

**Полевая (дифференциальная) модель расчета тепломассообмена.** Используется полевой метод расчета, разработанный в [7]. Решаются трехмерные нестационарные дифференциальные уравнения Рейнольдса.

Обобщенное дифференциальное уравнение имеет вид [7]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho w\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S. \quad (9)$$

Лучистый теплоперенос определяется с помощью метода моментов (диффузионная модель). Радиационная составляющая источникового члена в уравнении энергии равна:

$$S_p = -\frac{4\pi}{3} \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

где интенсивность излучения находится из решения уравнения:

$$\frac{1}{\beta} \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \right) = 3\nu(I - I_{ч.т}). \quad (11)$$

Локальные значения коэффициентов излучения и поглощения радиационной энергии определяются с помощью локальных величин оптической плотности дыма [7].

Реакция горения рассматривается как одноступенчатая и необратимая:



Скорость реакции (12) с учетом влияния на нее турбулентности (диффузионно-вихревая модель) равна:

$$J_{p.г} = \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ 4X_{п.г}; 4 \frac{X_{O_2}}{s}; 2 \frac{X_{п.м}}{s+1} \right\}. \quad (13)$$

Начальные и граничные условия подробно приведены в [7].

Уравнения (9) и (11) решаются методом контрольных объемов [8] по неявной конечно-разностной схеме на равномерной шахматной сетке.

**Результаты численного эксперимента и их анализ.** В работе [9] представлен обзор результатов полномасштабных экспериментов по определению высоты нижней границы припотолочного газового слоя (высота незадымляемой зоны) и его среднеобъемной температуры в высоких помещениях (высота больше 6 м) при свободном развитии пожара.

На рис. 2 представлены соответственно расчетные и экспериментальные [9] зависимости высоты нижней границы припотолочного газового слоя (высота незадымляемой зоны) и его среднеобъемной температуры от времени в условно герметичном помещении размерами 30×24×26,3 м при тепловой мощности  $Q_{\text{пож}} = 1,3 \text{ МВт}$ .

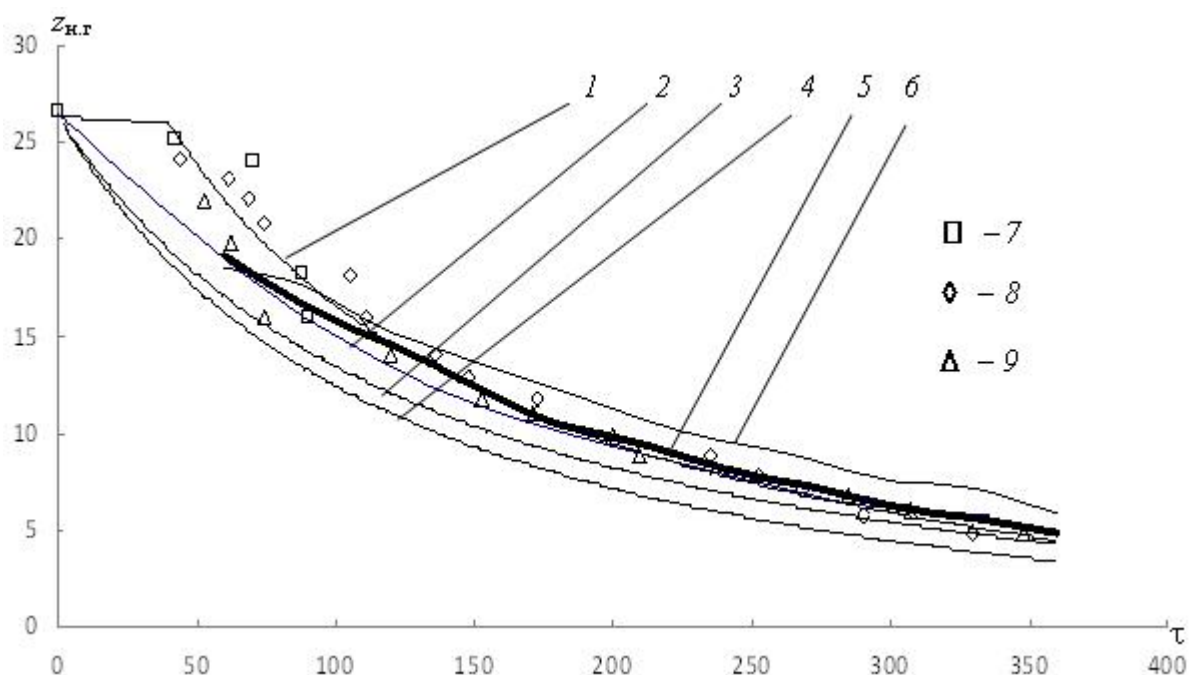


Рис. 2. Зависимости нижней границы припотолочного слоя от времени:  
 1 – уравнение (5); 2 – аппроксимация из [9]; формулы (3) и (4); 4 – формула (1);  
 5 – полевая модель ( $N = 15 \%$ ); 6 – полевая модель ( $N = 30 \%$ );  
 эксперимент [9]: 7 – определение по плотности; 8 – по температуре;  
 9 – по оптической плотности  $z_{н.г.}$ , м;  $\tau$ , с

В случае применения полевой модели использовалась равномерная конечно-разностная сетка размерами 61×49×54 точек. При этом положение нижней границы припотолочного слоя определялось из условия равенства подъема температуры  $N = 15 \%$  и  $N = 30 \%$  от максимального подъема температуры в вышеуказанном слое (правило  $N$  процентов [9]).

Характерные распределения массовых расходов, средних в сечениях конвективной колонки, по высоте помещения, показаны на рис. 3.

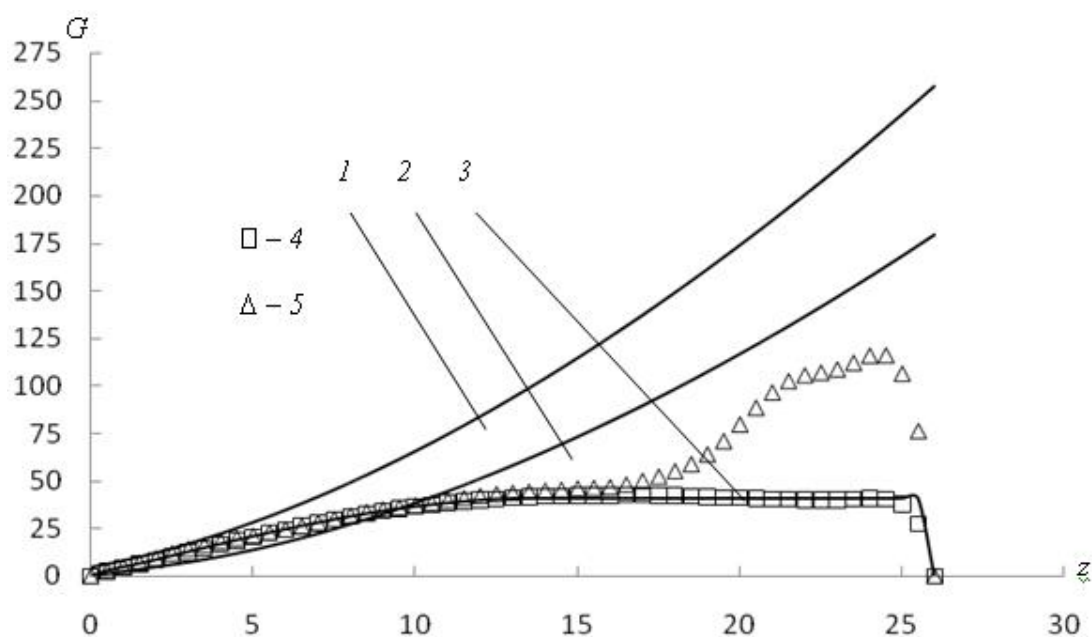


Рис. 3. Распределения массовых расходов по высоте атриума:  
 1 – формула (1); 2 – формулы (3) и (4); 3 – уравнение (5);  
 численный эксперимент (через 360 с): 4 – по поперечному сечению  
 конвективной колонки; 5 – по всему поперечному сечению атриума,  
 параллельного полу,  $G$ , кг/с;  $z$ , м

Характерные поля температур (в  $^{\circ}\text{C}$ ) и скоростей (в  $\text{м/с}$ ), а также схемы течения в продольном сечении атриума, проходящем через источник горения, через 180 с от начала пожара, показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что форма конвективной колонки, образующейся над источником горения, примерно до середины высоты помещения является конической, а выше – цилиндрической.

Из рис. 2 видно, что формулы (1), (3) и (4) (кривые 2, 3, 4) существенно, особенно на начальной стадии пожара (до 50 с от начала горения), завышают скорость опускания нижней границы припотолочного слоя, по сравнению с экспериментальными данными. Погрешность определения высоты нижней границы слоя в этом случае достигает 38 %. При этом, в соответствии с уравнением (2), температуры газовой смеси по сечению колонки из-за большего значения расходов будут меньше, чем в эксперименте. Это приведет к недооценке пожарной опасности, так как температура припотолочного газового слоя будет соответственно заниженной.

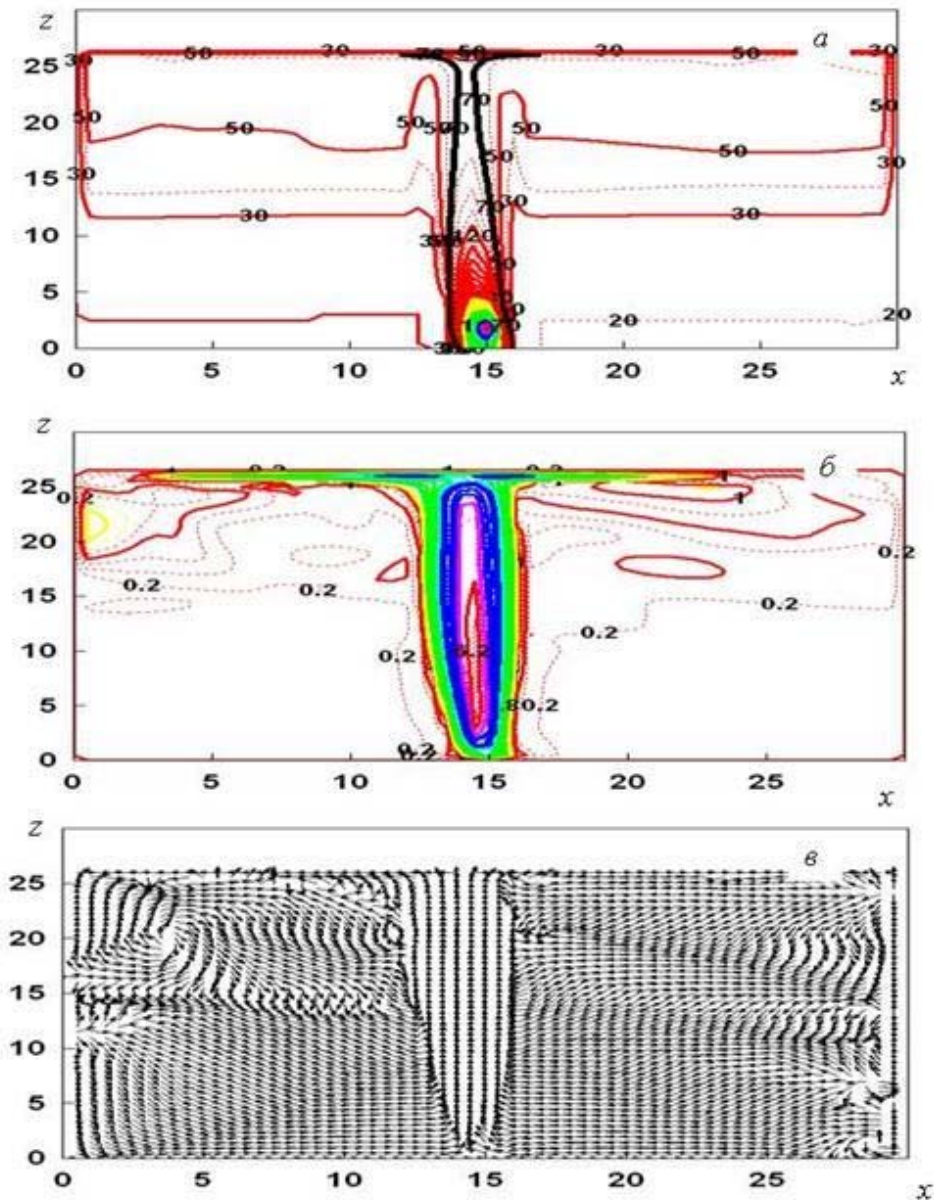


Рис. 4. Поля температур (*a*) и скоростей (*б*), а также схемы течения (*в*) в продольном сечении атриума, проходящем через источник горения, через 180 с от начала пожара,  $z$ , м;  $x$ , м

Разница между величинами расходов, определенными с использованием дифференциального уравнения (5) (кривая 3, рис. 3) и полевой модели (кривая 4, рис. 3), не превышает 3 % по всей высоте атриума.

Значения расходов, полученных с использованием формулы (1), (кривая 1, рис. 3), отличаются от соответствующих величин, полученных по полевой модели, не более чем на 19 % до высоты  $z = 5$  м. При  $z > 5$  м вышеуказанное отличие может достигать 540 %.

Использование выражений (3) и (4) (кривая 2, рис. 3) занижает по сравнению с расчетом по полевой модели, величины расходов не более чем на 42 % до  $z = 10$  м и завышает соответствующие значения до 340 % при  $z > 10$  м.

Таким образом, использование приближения неограниченной свободной конвекции при пожаре в атриуме корректно только в нижней части конвективной колонки (в рассмотренном примере – при  $\bar{z} < 0,4$  м (см. рис. 3)).

Необходимо отметить, что вне области колонки в верхней части атриума внутри припотолочного слоя существуют области, где движение газовой смеси имеет проекцию скорости, направленную вверх (см. рис. 3 (кривая 5) и рис. 4 (в)).

**Выводы.** При использовании зонного подхода к моделированию динамики опускания высоты нижней границы припотолочного газового слоя в атриумах необходимо учитывать форму конвективной колонки, образующейся над источником горения.

Использование приближения неограниченной свободно-конвективной струи для описания параметров конвективной колонки не отражает реальную термогазодинамическую картину развития пожара и может привести как к недооценке, так и переоценке пожарной опасности атриумов.

Уточнение уравнения (5) (влияние ограждающих конструкций помещения (свободная конвекция в ограниченном объеме) и потерь на турбулентное и ламинарное трение) требует проведения дополнительных численных исследований с использованием полевой модели [7] или проведения физического эксперимента.

#### Литература

1. Пузач С.В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в атриуме // Инженерно-физический журнал, 2007, Т. 80, № 2. – С. 84-89.
2. Пузач С.В., Абакумов Е.С. Модифицированная зонная модель расчета тепло-массообмена при пожаре в атриуме // Пожаровзрывобезопасность, 2007, Т. 16, № 1. – С. 53-57.
3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000.
4. Присадков В.И., Лицкевич В.В., Федоринов А.В. Численные методы исследования пожарной опасности атриумов // Пожарная безопасность, 2002, №2. – С. 64-70.
5. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1988.
6. NFPA 92B. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2005.
7. Пузач С.В. Методы расчета теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005.



8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М: Энергоатомиздат, 1984.

9. Matsuyama K., Misawa K., Wakamatsu Y.T. Closed-form Equations for Room Smoke Filling during an Initial Fire // Fire Science and Technology, 1999, Vol. 19, No 1. – Pp. 27-38.

### Обозначения в формулах (1)-(13)

$$A = \frac{T_0 R^2}{g p_0^2 \pi^2} - \text{размерный параметр, } c^2 \cdot m^5 / (kg^2 \cdot K);$$

$$B = \frac{Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{z_{\text{пл}} c_p} - \text{размерный параметр, } kg \cdot K / (m \cdot c);$$

$c_p$  – изобарная теплоемкость газовой смеси в конвективной колонке, Дж/(кг·К);

$F_{\text{п}}$  – площадь потолка атриума, м<sup>2</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$G$  – расход газов через сечение струи, отстоящее по высоте от поверхности горючего материала на расстояние  $z$ , кг/с;

$G_{\text{п.в}}$ ,  $G_{\text{н.г}}$  – массовые расходы поступающего воздуха и истекающих наружу газов при естественном газообмене, кг/с;

$G_{\text{н.г}}$  – массовый расход газовой смеси, поступающей из конвективной колонки в припотолочную зону, кг/с;

$H$  – высота помещения, м;

$I$  – интенсивность излучения, Вт/м<sup>2</sup>;

$I_{\text{ч.т}} = \sigma T^4$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;

$J_{\text{р.г}}$  – массовая скорость реакции горения в единице объема газовой среды, кг/(с·м<sup>3</sup>);

$k$  – кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$N$  – процент подъема температуры в припотолочном газовом слое от максимального подъема температуры в вышеуказанном слое;

$p_0$  – давление наружного воздуха при  $z = 0$ , Па;

$p_2$  – среднеобъемное давление в припотолочном слое, Па;

$Q_{\text{пож}}$  – скорость тепловыделения, Вт;

$Q_{\text{ст1}}$ ,  $Q_{\text{ст2}}$ ,  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\text{пол}}$  – тепловые потоки, отводящиеся в стены (ниже и выше нижней границы припотолочного слоя), потолок и пол соответственно, Вт;

$r$  – радиус поверхности горючего материала, м;

$R$  – газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К);

$s$  – коэффициент в уравнении реакции горения;

$S$  – источниковый член для  $\Phi$ ;

$S_{\text{р}}$  – радиационная составляющая источникового члена в уравнении энергии, Вт/м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, К;

$T_{\text{ср,к}}$  – средняя температура в сечении конвективной колонки, К;

$T_0$  – температура наружного воздуха, К;

$T_2$  – среднеобъемная температура в припотолочном слое, К;

$V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$w$  – скорость газовой смеси, м/с;

$W_{пр}, W_d$  – объемные расходы приточной вентиляции и дымоудаления,  $м^3/с$ ;  
 $X_{п.г}, X_{O_2}, X_{п.м}$  – массовая концентрация продуктов горения, кислорода и продуктов газификации горючего материала соответственно;  
 $x, y, z$  – координаты вдоль длины, ширины и высоты помещения соответственно,  $м$ ;  
 $z = z/H$  – относительная координата по высоте поперечного сечения колонки,  $м$ ;  
 $z_{к.ч}$  – высота конической части конвективной колонки,  $м$ ;  
 $z_{п.г}$  – высота до нижней границы припотолочного слоя от открытой поверхности горючего материала,  $м$ ;  
 $z_{пл}$  – высота пламенной зоны,  $м$ ;  
 $z_{ф.и}$  – расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горючего материала,  $м$ ;  
 $\beta$  – интегральный коэффициент ослабления излучения,  $1/м$ ;  
 $\chi = Q_{ст1} / Q_{пож}$  – доля, приходящаяся на поступающую в ограждение теплоту от выделившейся в очаге горения;  
 $\delta$  – толщина горючего материала,  $м$ ;  
 $\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности,  $м^2/с^3$ ;  
 $\Phi$  – зависимая переменная (энтальпия газовой смеси, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси ( $O_2, CO, CO_2, N_2$ , продукты газификации горючего материала), оптическая плотность дыма, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации);  
 $\Gamma$  – коэффициент диффузии для  $\Phi$ ;  
 $\gamma$  – угол полураскрытия конвективной колонки,  $рад$ ;  
 $\varphi = (Q_{ст1} + Q_{ст2} + Q_{п} + Q_{пол}) / Q_{пож}$  – коэффициент теплопотерь;  
 $\Pi$  – условная химическая формула продуктов горения;  
 $\rho$  – локальная плотность газовой смеси,  $кг/м^3$ ;  
 $\rho_0$  – плотность наружного воздуха,  $кг/м^3$ ;  
 $\rho_2$  – среднеобъемная плотность в припотолочном слое,  $кг/м^3$ ;  
 $\sigma$  – постоянная излучения абсолютно черного тела,  $Вт/(м^2 \cdot K^4)$ ;  
 $\tau$  – время,  $с$ ;  
 $T$  – условная химическая формула горючего материала;  
 $\upsilon$  – интегральный коэффициент излучения,  $1/м$ ;  
 $\Psi$  – массовая скорость газификации горючего материала,  $кг/с$ .

**Индексы:**  $O_2$  – кислород;  $d$  – дымоудаление;  $и.г$  – истекающие наружу через проем газы;  $к$  – конвективная колонка;  $к.ч$  – коническая часть конвективной колонки;  $п.г$  – нижняя граница припотолочного газового слоя;  $п$  – потолок;  $п.в$  – поступающий через проем воздух в помещение;  $п.г$  – продукты горения;  $пл$  – пламенная зона;  $п.м$  – продукты газификации горючего материала;  $пож$  – пожар;  $пол$  – пол атриума;  $пр$  – приточная вентиляция;  $р$  – радиация;  $р.г$  – реакция горения;  $ср$  – среднее значение;  $ст1$  – стены ниже нижней границы припотолочного слоя;  $ст2$  – стены выше нижней границы припотолочного слоя;  $ф.и$  – фиктивный источник теплоты;  $ч.т$  – абсолютно черное тело;  $0$  – наружный воздух;  $2$  – параметры припотолочного слоя.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 2 ноября 2009 г.