

УДК 614.849

**Колодяжный С.А.** – кандидат технических наук, профессор, ректор

E-mail: rector@vgasu.vrn.ru

**Переславцева И.И.** – старший преподаватель

E-mail: u00105@vgasu.vrn.ru

**Воронежский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

**Математическое моделирование динамики основных опасных факторов  
в начальной стадии пожара****Аннотация**

На любом объекте должна быть обеспечена безопасная эвакуация людей до наступления опасными факторами пожара своих предельно-допустимых значений. Массовая эвакуация людей из помещений горящего здания проводится на начальной стадии развития пожара. Определяющим фактором критического времени эвакуации на данной стадии является задымленность помещений.

Данная работа рассматривает интегральную математическую модель пожара, состоящую из пяти дифференциальных уравнений и конечного равенства. Из условия начальной стадии пожара были приняты некоторые допущения. В результате этого получены аналитические формулы для определения времени достижения предельных значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов в помещении с очагом пожара, а также формула для определения критического времени эвакуации по потере видимости в помещениях, смежных с очагом пожара.

**Ключевые слова:** опасный фактор пожара, интегральная модель пожара, начальная стадия пожара, критическое время эвакуации.

**Введение.** Одной из главных составляющих частей системы безопасности зданий и сооружений является обеспечение безопасной эвакуации людей в случае возникновения пожара. Этот вопрос в нашей стране остается до конца не решенным. Данные Центра пожарной статистики (Center of Fire Statistics of CTIF) [1], который располагает информацией о 85 странах и более чем 100 крупнейших городах мира, утверждают, что Россия стоит на первом месте в мире по числу погибших при пожарах. Основной причиной гибели людей при пожарах является отравление продуктами горения, то есть большое количество погибших в большинстве случаев обусловлено тем, что люди не успевают эвакуироваться из здания [2]. При возникновении пожара опасными факторами помимо непосредственно пламени и искр являются тепловой поток, снижение видимости в дыму, повышение температуры окружающей среды, понижение концентрации кислорода и повышение концентраций токсичных продуктов горения и термического разложения [3]. В условиях протекания пожара определяющими могут быть одни или другие факторы, однако при пожаре на человека одновременно воздействуют все опасные факторы. В методике [4] приведены предельно допустимые значения опасных факторов пожара. Предельное значение по повышенной температуре составляет 70<sup>0</sup>С. По тепловому потоку – 1400 Вт/м<sup>2</sup>. Нормальное содержание кислорода в воздухе составляет 0,226 кг/м<sup>3</sup>. При понижении этого значения вдвое нарушается деятельность легочной и сердечно-сосудистой систем человека, а при понижении в 3 раза дыхание останавливается и прекращает работу сердце. По каждому из токсичных газообразных продуктов горения приведены свои предельно допустимые значения: для диоксида углерода – 0,11 кг/м<sup>3</sup>; для оксида углерода – 1,16·10<sup>-3</sup> кг/м<sup>3</sup>; для хлороводорода – 23·10<sup>-6</sup> кг/м<sup>3</sup>. Предельно допустимое значение оптической плотности дыма определяется из уравнения:

$$\mu_{кр} = 2,38/l_{кр}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – оптическая плотность дыма, Нп/м;

$l_{кр}$  – расстояние критической видимости, м.

Для определения времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара необходимо рассчитать время достижения каждым опасным фактором пожара своего предельно допустимого значения на путях эвакуации. В помещениях общественных зданий при возникновении пожара, который не сопровождается взрывом, основная эвакуация людей проводится на начальной стадии развития пожара. Характерным для данной стадии является то, что в этот период резких изменений таких опасных для человека факторов, как температура, концентрация токсичных газов и кислорода не происходит. Особенно это касается помещений, смежных с тем, где непосредственно находится очаг пожара. В этом случае время эффективной эвакуации людей из здания будет определяться временем достижения предельно допустимого значения плотности дыма в помещениях, из которых проводится эвакуация. Это связано с тем, что данный фактор оказывает значительное психологическое воздействие на человека вплоть до паники, а также в большинстве случаев затрудняет ориентацию при определении путей эвакуации из здания [5, 6].

### Разрешающая система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Изменения во времени параметров состояния воздушной среды в помещении с очагом возгорания описываются различными математическими моделями. Наиболее распространенным является интегральный подход, разработанный профессором Кошмаровым Ю.А. [7, 8] и получивший дальнейшее развитие в работах его учеников. Интегральный подход, описывающий состояния среды, дает возможность не рассматривать отдельные неоднородные поля с различающимися термодинамическими параметрами состояния, при этом состояние газовой среды описывается в самом общем виде. Интегральная модель пожара рассматривает изменение во времени средних значений параметров состояния среды в помещении:  $p_{cp}$  – среднеобъемное давление, Н·м<sup>2</sup>;  $T_{cp}$  – среднemasсовая температура, К;  $\rho_{cp}$  – среднеобъемная плотность газовой среды в целом, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{cp}^{O_2}$  – среднеобъемная плотность кислорода, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{cp}^{m.z.}$  – среднеобъемная плотность токсичных газов, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{cp}$  – среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м.

Разрешающая система в соответствии с принятой интегральной моделью пожара состоит из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений и одного конечного равенства.

Из закона сохранения массы для газовой среды вытекает первое уравнение: изменение массы газовой среды в помещении за единицу времени равно алгебраической сумме масс поступающих и уходящих потоков. Уравнение материального баланса для газовой среды в помещении имеет вид:

$$\frac{d(\rho_{cp}V)}{d\tau} = \psi + G_{вх} - G_{вых}, \quad (2)$$

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

$\rho_{cp}V$  – масса газа, заполняющего объем  $V$ , кг;

$\psi$  – скорость выгорания (количество сгорающего за единицу времени горючего материала), кг/с;

$G_{вх}$ ,  $G_{вых}$  – расходы входящего воздуха и выходящих из помещения газов в рассматриваемый момент времени соответственно, кг/с.

Уравнение энергии пожара (второе уравнение) выводится на основе первого закона термодинамики. При этом предполагаем, что термодинамической системой работа расширения не совершает. Кинетическая энергия движения газовой среды в помещении по отношению к ее потенциальной энергии сравнительно мала. При прохождении потоков через проемы удельная кинетическая энергия газа пренебрежимо мала в сравнении с удельной энтальпией. В результате получаем уравнение:

$$\frac{1}{k-1} \frac{d(p_{cp}V)}{d\tau} = \eta Q_n \psi + i_3 \psi + c_{pвх} T_{вх} G_{вх} - c_p k_{вых} T_{cp} G_{вых} - Q_{o.k.}, \quad (3)$$

где  $k = c_p/c_v$  – показатель адиабаты, отношение изobarной и изохорной теплоемкостей идеального газа;

$Q_n^p$  – теплота сгорания, Дж/кг;

$i_3$  – энтальпия продуктов газификации горючего материала, Дж/кг;

$c_{p_{вх}}$ ,  $c_p$  – изobarные теплоемкости поступающего воздуха и идеального газа соответственно, Дж/кг·К;

$T_{вх}$  – температура входящего воздуха, К;

$k_{вх}$  – коэффициент, учитывающий отличие изobarной теплоемкости уходящих газов от идеального;

$Q_{о.к.}$  – тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы, Дж/с.

Дифференциальные уравнения баланса оптического количества дыма, баланса токсичных продуктов горения и баланса массы кислорода записываются аналогично уравнению (2).

Уравнение баланса оптического количества дыма:

$$\frac{d(\mu_{cp}V)}{d\tau} = D\psi - \frac{\mu_{cp}k_d}{\rho_{cp}} G_{вх} - k_c S_{о.к.}, \quad (4)$$

где  $D$  – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м<sup>2</sup>/кг;

$D\psi$  – оптическое количество дыма, Нп·м<sup>2</sup>/с;

$k_d$  – коэффициент, учитывающий отличие оптической концентрации дыма в уходящих газах от  $\mu_{cp}$ ;

$k_c$  – коэффициент седиментации частиц дыма на поверхности ограждающих конструкций, Нп/с;

$S_{о.к.}$  – площадь поверхности ограждающих конструкций (стен, потолка, пола), м<sup>2</sup>.

Уравнение баланса токсического продукта горения:

$$\frac{d(\rho_{cp}^{m.z.}V)}{d\tau} = k_{cm}^{m.z.} \psi \eta - k_{m.z.} \frac{\rho_{cp}^{m.z.}}{\rho_{cp}} G_{вх}, \quad (5)$$

где  $k_{cm}^{m.z.}$  – стехиометрический коэффициент для продуктов горения, который определяет количество выделяемых токсичных газов при сгорании единицы массы горючего материала, кг/кг;

$k_{m.z.}$  – коэффициент, учитывающий отличие концентрации токсичных продуктов горения в уходящих газах от среднеобъемной концентрации токсичных газов  $\rho_{cp}^{m.z.}$ .

Отношение  $\rho_{cp}^{m.z.}/\rho_{cp}$  определяет среднюю массовую долю токсичного газа в помещении.

Уравнение баланса массы кислорода:

$$\frac{d(\rho_{cp}^{O_2}V)}{d\tau} = \frac{\rho^{O_2}}{\rho} G_{вх} - k_{O_2} \frac{\rho_{cp}^{O_2}}{\rho_{cp}} G_{вх} - k_{cm}^{O_2} \psi \eta, \quad (6)$$

где  $\rho^{O_2}/\rho$  – средняя массовая доля кислорода в поступающем воздухе;

$\rho_{cp}^{O_2}/\rho_{cp}$  – средняя массовая доля кислорода в помещении;

$k_{O_2}$  – коэффициент, учитывающий отличие концентрации кислорода в уходящих газах от среднеобъемной концентрации кислорода  $\rho_{cp}^{O_2}$ ;

$k_{cm}^{O_2}$  – стехиометрический коэффициент для кислорода, определяющий необходимое количество кислорода для сгорания массы горючего материала, кг/кг;

$\eta$  – коэффициент полноты сгорания.

Система пяти дифференциальных уравнений (2)-(6) относительно шести неизвестных функций  $\rho_{cp}(\tau)$ ,  $T_{cp}(\tau)$ ,  $T_{cp}(\tau)$ ,  $\mu_{cp}(\tau)$ ,  $\rho_{cp}^{O_2}(\tau)$ ,  $\rho_{cp}^{m.z.}(\tau)$  замыкается усредненным алгебраическим уравнением состояния газовой среды в помещении

$$p_{cp} = \rho_{cp} R T_{cp}, \quad (7)$$

где  $R$  – газовая постоянная, Дж/кг·К.

Данное уравнение связывает между собой три усредненных параметра состояния газовой среды аналогично тому, как связывает уравнение Клайперона локальные значения основных термодинамических параметров состояния: температуру, давление, плотность.

Константы интегрирования дифференциальных уравнений (2)-(6) определяются из начальных условий до развития пожара в помещении:

$$\rho_{cp}(0) = \rho_0, p_{cp}(0) = p_0, \mu_{cp}(0) = 0, \rho_{cp}^{O_2}(0) = \rho_0^{O_2}, \rho_{cp}^{m.z.}(0) = 0. \quad (8)$$

Некоторые параметры, входящие в уравнения (2)-(7) такие, как площадь ограждающих элементов  $S_{o.k.}$ ; объем помещения  $V$ ; стехиометрические коэффициенты  $k_{cm}^{O_2}$ ,  $k_{cm}^{m.z.}$ ; теплота сгорания горючего материала  $Q_n^p$ , его дымообразующая способность  $D$  и энтальпия продуктов газификации  $i$ , однозначно являются определенными физическими величинами. Другие, входящих в те же уравнения величины: массовый расход входящего воздуха  $G_{вх}$ ; массовый расход выходящих из помещения газов  $G_{вых}$ ; тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы  $Q_{o.k.}$ ; коэффициент  $\eta$  полноты сгорания; скорость выгорания  $\psi$  зависят от параметров состояния среды в помещении. С целью вычисления значений этих физических величин необходимо привлечение дополнительных уравнений из теорий горения, конвективного и лучистого теплообмена, газообмена между смежными помещениями.

**Упрощение уравнений интегральной математической модели в начальной стадии пожара.** Массовая эвакуация людей в случае возникновения пожара проходит в его начальной стадии. В это время в помещениях при относительно небольшом количестве проемов поступление воздуха из окружающей среды практически отсутствует, а значит, газообмен происходит, как правило, в одном направлении. Следовательно, для дифференциальных уравнений (2)-(6) можно положить  $G_{вх}=0$ . В свою очередь, в помещениях общественных зданий даже при наличии небольшого количества проемов среднее давление среды практически не меняется и равно давлению наружного воздуха. Тогда, из формулы (7):

$$\rho_{cp} T_{cp} = \rho_0 T_0 = const; dp_{cp} / d\tau = 0,$$

где  $\rho_0, T_0$  – плотность и температура среды до начала пожара.

Кроме этого, концентрация кислорода и средняя температура в помещениях в начальной стадии пожара изменяются незначительно. Соответственно, дымообразующую способность горючего материала  $D$  и коэффициент полноты сгорания  $\eta$  в данный период можно считать постоянными. Объем охваченного пожаром помещения,  $V = const$ ; коэффициенты  $k_o=1$ ,  $k_{O_2}=1$ ,  $k_{m.z.}=1$ ,  $k_{вых}=1$ .

Ввиду вышеперечисленных допущений уравнения пожара (2)-(6) принимают вид:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \psi - G_{вых}, \quad (9)$$

$$\eta Q_n^p \psi + i_3 \psi - c_p T_{cp} G_{вых} - Q_{o.k.} = 0, \quad (10)$$

$$V \frac{d\mu_{cp}}{d\tau} = D \psi - \frac{\mu_{cp}}{\rho_{cp}} G_{вых} - k_c S_{o.k.}, \quad (11)$$

$$V \frac{d\rho_{cp}^{O_2}}{d\tau} = - \frac{\rho_{cp}^{O_2}}{\rho_{cp}} G_{вых} - k_{cm}^{O_2} \psi \eta, \quad (12)$$

$$V \frac{d\rho_{cp}^{m.z.}}{d\tau} = k_{cm}^{m.z.} \psi \eta - \frac{\rho_{cp}^{m.z.}}{\rho_{cp}} G_{вых}. \quad (13)$$

Алгебраическое уравнение энергии пожара (10), выведенное в результате упрощений, позволяет получить формулу расхода выходящих из помещения газов в рассматриваемый момент времени. В свою очередь в течение времени, относящегося к начальной стадии пожара, можно положить, что отношение теплового потока, поглощаемого ограждающими конструкциями и излучаемого через проемы, к тепловыделению в процессе горения есть величина постоянная:

$$\frac{Q_{o.k.}}{\eta Q_n^p \psi} = \varphi = const.$$

Величина  $\varphi$  в соответствии с [4] называется коэффициентом теплопотерь. Тогда уравнение (1.10) примет вид:

$$\eta Q_n^p \psi (1 - \varphi) + i_3 \psi - c_p T_{cp} G_{вых} = 0.$$

Откуда получим выражение для секундного расхода вытесняемых при горении газов:

$$G_{вых} = \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p T_{cp}}. \quad (14)$$

Учитывая условие  $\rho_{cp} T_{cp} = \rho_0 T_0$ , принятое выше, равенство (14) можно записать в виде:

$$G_{вых} = \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p \rho_0 T_0} \rho_{cp}. \quad (15)$$

С учетом равенства (15) уравнения (9) и (11)-(13) принимают вид:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \psi \left[ 1 - \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p \rho_0 T_0} \rho_{cp} \right], \quad (16)$$

$$V \frac{d\mu_{cp}}{d\tau} = \psi \left[ D - \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p \rho_0 T_0} \mu_{cp} \right] - k_c S_{o.к.}, \quad (17)$$

$$V \frac{d\rho_{cp}^{O_2}}{d\tau} = -\psi \eta \left[ k_{cm}^{O_2} + \frac{Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p \rho_0 T_0} \rho_{cp}^{O_2} \right], \quad (18)$$

$$V \frac{d\rho_{cp}^{m.z.}}{d\tau} = \psi \eta \left[ k_{cm}^{m.z.} - \frac{Q_n^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_p \rho_0 T_0} \rho_{cp}^{m.z.} \right]. \quad (19)$$

В результате получена система дифференциальных уравнений, которая не является связанной, поэтому возможно решение каждого из этих уравнений искать отдельно.

Функция  $\psi$ , имеющаяся в уравнениях (15)-(19) может иметь различный вид в зависимости от того, как распространяется пожар [8].

В случае, когда пожар распространяется по поверхности твердых горючих материалов по кругу:

$$\psi = \pi \psi_{y\partial} v_l^2 \tau^2, \quad (20)$$

где  $\psi_{y\partial}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/м<sup>2</sup>·с;

$v_l$  – линейная скорость распространения пламени, м/с.

Масса горючих материалов, сгоревших к моменту времени  $\tau$  при этом будет равна:

$$M_\tau = \int_0^\tau \psi d\tau = \frac{\pi}{3} \psi_{y\partial} v_l^2 \tau^3. \quad (21)$$

Если пламя распространяется по полосе шириной  $b$  м:

$$\psi = b \psi_{y\partial} v_l \tau, \quad (22)$$

$$M_\tau = \int_0^\tau \psi d\tau = \frac{b}{2} \psi_{y\partial} v_l \tau^2. \quad (23)$$

Представляя одним равенством формулы (21) и (23), получим:

$$M_\tau = A \tau^n, \quad (24)$$

где  $A = \frac{\pi}{3} \psi_{y\partial} v_l^2$ ,  $n = 3$  – при круговом распространении пламени;

$A = b \psi_{y\partial} v_l$ ,  $n = 2$  – при распространении пламени полосой.

**Определение времени достижения предельных значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов.** Уравнения с разделяющимися переменными (16), (18), (19) позволяют определить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания по условиям достижения такими опасными факторами пожара, как температуры, концентраций кислорода и токсичных газов своих предельно допустимых значений.

Введем следующее формальное обозначение:

$$C = \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3}{c_p \rho_0 T_0}. \quad (25)$$

Тогда уравнение (16) примет вид:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \psi [1 - C\rho_{cp}]. \quad (26)$$

Разделяя переменные и интегрируя части равенства в соответствующих пределах, учитывая равенство (24) получим:

$$\int_{\rho_0}^{\rho_{cp}} \frac{d\rho_{cp}}{1 - C\rho_{cp}} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{A}{V} \tau^n. \quad (27)$$

В итоге закон изменения средней плотности газовой среды в целом примет вид:

$$\rho_{cp} = \frac{1}{C} - \left( \frac{1}{C} - \rho_0 \right) \cdot e^{-\frac{AC}{V} \tau^n}. \quad (28)$$

Отсюда, учитывая равенство  $\rho_{cp} T_{cp} = \rho_0 T_0$ , принятое выше, получаем уравнение, описывающее изменение средней температуры от времени:

$$T_{cp} = \frac{C\rho_0 T_0}{1 - (1 - C\rho_0) \cdot e^{-\frac{AC}{V} \tau^n}}. \quad (29)$$

Из уравнения (29) можно получить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания при достижении предельно допустимого значения по температуре  $T_{кр}$ :

$$\tau_{кр}^T = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \frac{T_{кр} (1 - C\rho_0)}{T_{кр} - C\rho_0 T_0}}. \quad (30)$$

Учитывая равенство (24), разделяем переменные и интегрируем в соответствующих пределах левую и правую части уравнения (18):

$$\int_{\rho_0^{O_2}}^{\rho_{cp}^{O_2}} \frac{d\rho_{cp}^{O_2}}{k_{см}^{O_2} + C\rho_{cp}^{O_2}} = -\frac{\eta}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = -\frac{\eta A}{V} \tau^n. \quad (31)$$

Откуда получаем закон изменения среднеобъемной концентрации кислорода в помещении от времени:

$$\rho_{cp}^{O_2} = \frac{1}{C} \left[ \left( k_{см}^{O_2} + C\rho_0^{O_2} \right) \cdot e^{-\frac{AC\eta}{V} \tau^n} - k_{см}^{O_2} \right]. \quad (32)$$

Из уравнения (32) определим критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания при достижении предельно допустимого значения концентрации по кислороду  $\rho_{кр}^{O_2}$ :

$$\tau_{кр}^{O_2} = \left[ \frac{V}{AC\eta} \ln \left( \frac{k_{см}^{O_2} + C\rho_0^{O_2}}{k_{см}^{O_2} + C\rho_{кр}^{O_2}} \right) \right]^{1/n}. \quad (33)$$

Разделим переменные и проинтегрируем в соответствующих пределах с учетом уравнения (24) левую и правую части уравнения (19):

$$\int_0^{\rho_{cp}^{m.z.}} \frac{d\rho_{cp}^{m.z.}}{k_{см}^{m.z.} - C\rho_{cp}^{m.z.}} = \frac{\eta}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{\eta A}{V} \tau^n. \quad (34)$$

Откуда получаем закон изменения концентрации токсичных газов в помещении от времени:

$$\rho_{cp}^{m.z.} = \frac{k_{см}^{m.z.}}{C} \left[ 1 - e^{-\frac{AC\eta}{V} \tau^n} \right]. \quad (35)$$

Из уравнения (35) определяем критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания при достижении предельно допустимого значения по концентрации токсичных газов  $\rho_{кр}^{m.z.}$ :

$$\tau_{кр}^{m.z.} = \left[ \frac{V}{AC\eta} \ln \left( \frac{k_{см}^{m.z.}}{k_{см}^{m.z.} - C\rho_{кр}^{m.z.}} \right) \right]^{1/n}. \quad (36)$$

Полученные законы (28), (29), (32), (35) изменения соответствующих величин от времени и моменты времени (30), (33), (36) при достижении критических значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов являются действительными для помещения объемом  $V$ , в котором непосредственно находится очаг пожара. Для других помещений необходимо рассматривать процесс газообмена с учетом перепада давлений из-за различной плотности газовой среды в помещении с очагом пожара и смежных с ним.

**Определение критического времени эвакуации по потере видимости.** Часто задымленность помещений является определяющим фактором при определении критического времени эвакуации людей при пожаре. Период времени, в течение которого достигается критическое количество дыма в помещении с очагом пожара и смежных с ним помещениях, условно можно разделить на два интервала. Первый интервал характеризуется достижением критической концентрации дыма в помещении с очагом пожара, а второй – заполнением смежных с очагом пожара помещений насыщенной газовой смесью от потолка до определенной критической высоты от уровня пола.

Используя уравнение (17) можно определить время достижения критической концентрации дыма в помещении с очагом пожара. Отличие данного уравнения от уравнений (16), (18), (19) в том, что переменные в нем не разделяются из-за присутствия в правой части последнего члена –  $k_c S_{o.k.}$ . Для получения аналитического решения положим, что все частицы поступают в газовую смесь и не осаждаются на ограждающие конструкции, то есть коэффициент седиментации частиц дыма на поверхности ограждающих конструкций  $k_c = 0$ . Получим уравнение с разделяющимися переменными:

$$V \frac{d\mu_{cp}}{d\tau} = \psi \left[ D - \frac{\eta Q_n^p (1-\varphi) + i_3}{c_p \rho_0 T_0} \mu_{cp} \right]. \quad (37)$$

Используя принятое обозначение (25), разделим переменные и проинтегрируем полученное уравнение в соответствующих пределах с учетом равенства (24):

$$\int_0^{\mu_{cp}} \frac{d\mu_{cp}}{D - C\mu_{cp}} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{A}{V} \tau^n. \quad (38)$$

Откуда получим закон изменения во времени плотности дыма:

$$\mu_{cp} = \frac{D}{C} \left[ 1 - e^{-\frac{AC}{V} \tau^n} \right]. \quad (39)$$

Из уравнения (39) можем определить период времени, за который в помещении с очагом пожара плотность дыма достигнет своего критического значения  $\mu_{кр}$ :

$$\tau_{кр}^{\partial} = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left( \frac{D}{D - C\mu_{кр}} \right)}. \quad (40)$$

Образующиеся при горении газы с момента времени  $\tau_{кр}^{\partial}$  начнут выталкивать плотно задымленную газовую смесь из помещения с очагом пожара в смежные помещения (коридоры, соседние комнаты и т.д.) через проемы. Эта смесь, имея более высокую температуру, поднимется к потолку и будет заполнять смежные помещения, опускаясь к полу. Расход газов  $G_{вых}$ , выходящих из помещения с очагом пожара, в рассматриваемый момент времени займет некоторый объем  $V_{вых}$ , причем:

$$G_{вых} = V_{вых} \cdot \rho_{cp}. \quad (41)$$

Сравнивая уравнения (15) и (41), получаем:

$$V_{вых} = \frac{\eta Q_n^p (1-\varphi) + i_3}{c_p \rho_0 T_0} \psi. \quad (42)$$

Тогда за конечный промежуток времени  $\tau$  масса выталкиваемых газов  $M_\tau$  заполнит некоторый объем  $V_\tau$ , определяемый уравнением:

$$V_\tau = \int_0^\tau V_{\text{вых}} d\tau = \frac{\eta Q_n^p (1-\varphi) + i_g}{c_p \rho_0 T_0} \int_0^\tau \psi d\tau. \quad (43)$$

Учитывая равенства (21), (23), (24) получаем:

$$V_\tau = \frac{\eta Q_n^p (1-\varphi) + i_g}{c_p \rho_0 T_0} A \tau^n. \quad (44)$$

Данное уравнение (44) позволяет определить промежуток времени, в течение которого газовая смесь с критической плотностью дыма заполнит критический объем  $V_{кр}$  всех помещений, смежных с помещением, в котором произошел пожар. Данный объем вычисляется как произведение площади всех смежных помещений  $S_\Sigma$  на расчетную высоту  $h_p$ :

$$V_{кр} = S_\Sigma \cdot h_p, \quad (45)$$

где  $h_p = h - h_{кр}$ ;

$h$  – высота помещений, м;

$h_{кр}$  – критическое расстояние дымовой завесы от уровня пола, м.

Подставляя выражение (45) в уравнение (44), получаем формулу, определяющую критический промежуток времени  $\tau_{кр}^V$ , в течение которого плотная дымовая завеса заполнит объем  $V_{кр}$ :

$$\tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{c_p \rho_0 T_0 S_\Sigma h_p}{A [\eta Q_n^p (1-\varphi) + i_g]}}. \quad (46)$$

Окончательно с учетом формального обозначения (25) критическое время эвакуации по потере видимости принимает вид:

$$\tau_{кр} = \tau_{кр}^0 + \tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left( \frac{D}{D - C \mu_{кр}} \right)} + \sqrt[n]{\frac{S_\Sigma h_p}{AC}}, \quad (47)$$

где  $V$  – это объем помещения, в котором произошел пожар, м<sup>3</sup>;

$D$  – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м<sup>2</sup>/кг;

В данном выражении (47)  $C$  определяется равенством (25);  $\mu_{кр}$  – равенством (1),  $A$  и  $n$  – равенством (24).

Уравнение (46) получено с предположением, что критический объем всех помещений, смежных с помещением, в котором непосредственно произошел пожар, заполнен плотной завесой дыма от потолка до критического расстояния от уровня пола без учета влияния движения эвакуируемых людей. Естественно, что их хаотичное движение вызывает смешивание верхних слоев воздуха с менее задымленными нижними слоями, что несколько снижает концентрацию дыма в верхней части помещений, а значит, незначительно увеличивая и время  $\tau_{кр}^V$ . Аналитический учет хаотичного движения людей, которое вызывает соответствующее хаотичное конвективное смешение газовой смеси, практически невозможен. Поэтому в практических расчетах с достаточной точностью возможно определение критического времени эвакуации по потере видимости по предложенной выше формуле.

**Заключение.** В результате проведенной работы получены аналитические зависимости для определения времени достижения предельных значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов в помещении с очагом пожара на начальной его стадии. Авторами предложена формула для определения критического времени эвакуации по потере видимости в помещениях, смежных с помещением, в котором произошел пожар. Полученная аналитическая формула может быть использована специалистами в практике инженерных расчетов при рассмотрении проблемы безопасной эвакуации людей из помещений в случае возникновения пожара.

**Список библиографических ссылок**

1. Брушлинский Н.Н., Холл Дж.Р., Соколов С.И., Вагнер П. Мировая пожарная статистика // Центр пожарной статистики СТИФ, 2012, № 17. – 64 с.
2. Ботнарь М.И., Дерепасов А.В., Переславцева И.И., Титков Д.Г., Яременко С.А. Анализ пожарной безопасности объектов строительства в Российской Федерации // Научное обозрение, 2013, № 9. – С. 426-430.
3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон № 123-ФЗ: принят 22 июля 2008 г. – М.: НЦ ЭНАС, 2008. – 64 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ № 382 МЧС России от 30 июня 2009 г. / ФГУ ВНИИПО МЧС России. – М., 2009. – 71 с.
5. Переславцева И.И., Яременко С.А. Экспериментальные исследования времени эвакуации групп людей по лестничным клеткам зданий и сооружений // Вестник гражданских инженеров, 2013, Вып. 5 (40). – С. 122-126.
6. Мелькумов В.Н., Кузнецов С.Н., Гулак В.В. Моделирование задымленности помещений сложной конфигурации в начальной стадии пожара // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура, 2010, № 3. – С. 131-138.
7. Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В. Процессы нарастания ОФП в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара. – М.: МИПБ МВД России, 1998. – 90 с.
8. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

**Kolodyazhny S.A.** – candidate of technical sciences, professor, rector

E-mail: rector@vgasu.vrn.ru

**Pereslavytseva I.I.** – senior lecturer

E-mail: u00105@vgasu.vrn.ru

**Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering**

The organization address: 394006, Russia, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya st., 84

**Mathematical modeling of the dynamics of the main hazards in the initial stage of fire****Resume**

Technical and space-planning the execution of any object must ensure the safe evacuation of people before the fire hazards of their maximum allowable values. Mass evacuation of the premises is carried out of a burning building in the early stages of a fire, for which there is no abrupt change in such dangerous for the human factors such as temperature, concentration of toxic gases and oxygen. Determining factor in the critical time of evacuation at this stage is indoor smoke, which drastically reduces the orientation of the people in the space and has a considerable psychological pressure.

This paper discusses an integrated mathematical model of fire, consisting of five differential equations, and the final equality. To solve the system of equations of the initial stage of fire conditions have been some assumptions: the absence of receipt of ambient air, the average pressure of the medium is constant and equal to the pressure of outside air, smoke-forming ability of combustible material and combustion efficiency are constant due to the small changes in the concentration of oxygen.

As a result of research, analytical formulas for the determination of the time to reach the limit values of the temperature, the concentration of oxygen and toxic gases in the room with a hearth fire, as well as a formula for determining the critical time of evacuation for the loss of visibility in the areas adjacent to the fire. This formula allows you to use it in the practice of engineering calculations when considering the problem of the safe evacuation of the premises in case of fire.

**Keywords:** fire hazards, integrated model of fire, initial stage of the fire, critical time of the evacuation.

#### Reference list

1. Brushlinsky N.N., Hall J.R., Sokolov S.V., Wagner P. World Fire Statistics // Center of fire statistics of CTIF, 2012, № 17. – 64 p.
2. Botnar M.I., Derepasov A.V., Pereslavl'tseva I.I., Titkov D.G., Yaremenko S.A. Analysis of the fire safety of construction projects in the Russian Federation // Scientific review, 2013, № 9. – P. 426-430.
3. Federal law № 123-FZ. Technical regulations on fire safety requirements. – M., 2008. – 64 p.
4. Technique of estimating design values of fire risk in buildings, facilities and structures of various classes of functional fire danger: order of the EMERCOM of Russia. – 71 p.
5. Pereslavl'tseva I.I. Yaremenko S.A. Experimental research of time needed for evacuation of people by staircases of buildings and structures // Bulletin of Civil Engineers, 2013, № 5 (40). – P. 122-126.
6. Melkumov V.N., Kuznetsov S.N., Gulak V.V. Modeling of smoke content in premises of complex configuration at initial stage of fire // Scientific Herald of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture, 2010, № 3. – P. 131-138.
7. Koshmarov Yu.A., Rubtsov V.V. The increase of fire hazards in production premises and calculation of the critical fire duration. – M., 1998. – 90 p.
8. Koshmarov Yu.A. Forecasting dangerous fire factors in the room: Training manual. Moscow, 2000. – 118 p.