

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.359>

УДК 536.46+614.841.123.24

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЫМА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ, ОБОРУДОВАННЫХ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Осяев В.А., Пастухов С.М.

Цель. Получение алгебраического уравнения, позволяющего рассчитать динамику среднеобъемной оптической плотности дыма в горящем помещении, оборудованном противодымной вентиляцией.

Методы. Решение дифференциальных уравнений интегральной модели пожара и использование расчетных компьютерных моделей динамики пожара.

Результаты. Получено алгебраическое уравнение, позволяющее с сопоставимой для полевой модели пожара точностью рассчитать динамику среднеобъемной оптической плотности дыма в горящем помещении, оборудованном противодымной вентиляцией.

Область применения исследований. Полученные результаты представлены для оценки опасных факторов пожара и могут быть использованы при проведении практических расчетов для безопасной эвакуации людей из зданий и сооружений при пожаре.

Ключевые слова: начальная стадия пожара, оптическая плотность дыма, противодымная вентиляция, компьютерное моделирование.

(Поступила в редакцию 10 октября 2019 г.)

Введение. Ущерб от пожаров в зданиях и сооружениях выражается в первую очередь в причинении вреда жизни и здоровью людей вследствие воздействия на них опасных факторов пожара (ОФП). К ОФП относят пламя и искры, повышенную температуру окружающей среды, токсичные продукты горения и термического разложения, дым, пониженную концентрацию кислорода в воздухе¹. Безопасность людей в этих условиях обеспечивается их эвакуацией в безопасную зону в течение необходимого времени эвакуации (НВЭ)^{2,3}.

Оценка времени наступления ОФП может быть проведена на основе интегральной, зонной и полевой моделей пожара [1–6]. В Республике Беларусь для определения НВЭ людей из зданий и сооружений применяется инженерная методика, изложенная в ГОСТ 12.1.004-91. Методика ГОСТ базируется на наиболее простой модели пожара, а именно интегральной модели [1]. Алгебраические уравнения методики ГОСТ были получены решением дифференциальных уравнений интегральной модели пожара с учетом принятия допущения об отсутствии притока свежего воздуха в горящее помещение на начальной стадии пожара (через проемы в ограждающих конструкциях происходит только вытеснение воздуха и продуктов горения) [1]. Одним из недостатков полученных уравнений является отсутствие возможности учета влияния системы противодымной вентиляции, которая во время пожара предназначена для снижения концентрации токсичных продуктов горения, температуры и оптической плотности дыма в горящих помещениях.

В данной статье рассмотрена возможность расширения области практического применения приведенной в ГОСТ 12.1.004-91 методики на основе модификации ее алгебраиче-

¹ Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР: М-во внутр. дел СССР, М-во хим. пром. СССР, 1996. – 83 с.

² См. сн. 1.

³ Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ. – Введ. 01.08.2010. – Минск: Совет Министров Респ. Беларусь: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2012. – 44 с.

ским уравнением динамики среднеобъемной оптической плотности дыма в горящем помещении, оборудованном противодымной вентиляцией.

Результаты. Для учета влияния противодымной вентиляции на динамику оптической плотности дыма в горящем помещении в качестве основы взято дифференциальное уравнение, описывающее процесс изменения состояния среды в результате заполнения помещения дымом [1]:

$$V \frac{d\mu}{d\tau} = D\psi - \mu \left(\frac{G_r + G_{\text{выт}}}{\rho_m} \right) + k_c F_w, \quad (1)$$

где V – свободный объем помещения, м^3 ; μ – оптическая плотность дыма, $1/\text{м}$; τ – время, с ; D – дымообразующая способность горючего материала, $\text{м}^2/\text{кг}$; ψ – скорость выгорания (скорость газификации) горючего материала в рассматриваемый момент времени, $\text{кг}/\text{с}$; G_r – расход газов, покидающих помещение через проемы в рассматриваемый момент времени, $\text{кг}/\text{с}$; $G_{\text{выт}}$ – расход газов, создаваемый вытяжной вентиляцией, $\text{кг}/\text{с}$; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды внутри помещения, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_c – коэффициент седиментации частиц дыма на поверхности ограждающих конструкций, $1/\text{с}$; F_w – площадь поверхности ограждений (потолка, пола, стен), м^2 .

Для решения уравнения (1) нами принято допущение, что на начальной стадии пожара отсутствует газообмен помещения с окружающей средой через проемы ($G_r = 0$) и седиментация частиц дыма на поверхности ограждающих конструкций ($k_c = 0$), а основную роль в динамике среднеобъемной оптической плотности дыма играет расход газов $G_{\text{выт}}$, создаваемый вытяжной (противодымной) вентиляцией. Тогда в результате принятых допущений и преобразований для кругового распространения пожара ($\psi = \pi v \psi_{\text{уд}} \tau^2$) уравнение (1) будет иметь вид:

$$V \frac{d\mu}{d\tau} + \mu z W = D \pi v^2 \psi_{\text{уд}} \tau^2, \quad (2)$$

где W – объемный расход газов, создаваемый системой противодымной вентиляции, $\text{м}^3/\text{с}$; v – линейная скорость пламени, $\text{м}/\text{с}$; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная скорость выгорания (скорость газификации) горючего материала, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; z – коэффициент пересчета для высотной отметки вытяжных устройств системы противодымной вентиляции, определяемый по формуле⁴

$$z = \frac{h}{H} \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right) \quad \text{при} \quad H \leq 6 \text{ м} \quad (3)$$

h – высота рабочей зоны, м ; H – высота помещения, м .

Разделив две части уравнения (2) на свободный объем V , получим:

$$\frac{d\mu}{d\tau} + \frac{zW}{V} \mu = \frac{D \pi v^2 \psi_{\text{уд}} \tau^2}{V}. \quad (4)$$

Введем обозначения: $zW/V = a$; $D \pi v^2 \psi_{\text{уд}} / V = b$. Тогда уравнение (4) примет вид

$$\frac{d\mu}{d\tau} + a\mu = b\tau^2. \quad (5)$$

⁴ См. сн. 1.

Выражение (5) является линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка, решение которого с учетом начальных условий $\tau = 0$, $\mu = 0$ имеет вид [7]:

$$\mu = \frac{b}{a^3} (a^2 \tau^2 - 2a\tau + 2 - 2e^{-a\tau}); \quad (6)$$

$$a = \frac{zW}{V}; \quad b = \frac{D\pi v^2 \psi_{уд}}{V}.$$

Обсуждение. Точность расчетных данных любых инженерных методик в первую очередь должна проверяться экспериментальными исследованиями. Однако для их предварительной оценки вполне достаточно сопоставления полученных расчетных данных с результатами компьютерного моделирования по более точным моделям. Наибольшей точностью расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях обладает полевая модель пожара. Программно полевая модель реализована в ряде вычислительных комплексов (JASMINE, SOFIE, PHOENICS, FLUENT, CFX, FDS и др.). В настоящей работе вычисления по полевой модели пожара проведены с использованием специализированного программного комплекса FDS (Fire Dynamics Simulator)⁵, который имеется в свободном доступе и применяется широким кругом исследователей в различных странах.

Для оценки расчетных данных по формуле (6) проведено их сопоставление с результатами компьютерного моделирования динамики среднеобъемной оптической плотности дыма в горящем помещении по полевой модели пожара с использованием FDS и расчетными данными по являющейся основой для методики ГОСТ 12.1.004-91 и не учитывающей работу противодымной вентиляции формуле [1]:

$$\mu = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{\eta(1-\phi)Q_H} \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right) \right], \quad (7)$$

где c_p – удельная изобарная теплоемкость газовой среды в помещении, Дж/кг·К; ρ_0 – начальная плотность газовой среды в помещении, кг/м³; T_0 – начальная температура газовой среды в помещении, К; η – коэффициент полноты сгорания; ϕ – коэффициент теплопотерь; Q_H – низшая теплота сгорания, Дж/кг; $A = \pi v^2 \psi_{уд} / 3$; $B = c_p \rho_0 T_0 V / \eta(1-\phi)Q_H$.

В качестве модели горящего помещения выбран зрительный зал кинотеатра объемом $V = 2618 \text{ м}^3$ и высотой $H = 7,45 \text{ м}$, оборудованный системой противодымной вентиляции (два дымовых люка в потолке помещения) с расходом $W = 67000 \text{ м}^3/\text{с}$. Очаг пожара располагался в центре зала, а распространение пожара принято круговым. Для пожарной нагрузки были приняты следующие характеристики: низшая теплота сгорания – 14 МДж/кг; удельная скоростью выгорания (скоростью газификации) горючего материала – 0,013 кг/с; линейная скорость пламени – 0,005 м/с и дымообразующая способность горючего материала – 795 м²/кг. Коэффициент теплопотерь в расчетах взят равным 0,25, а коэффициент полноты сгорания – 0,97. Результаты расчетов приведены на рисунке.

Для лучшего представления точности результатов расчетов и их сопоставления по формуле⁶

$$l_{np} = 2,38 / \mu_{кр} \quad (8)$$

было определено критическое значение среднеобъемной оптической плотности дыма $\mu_{кр}$, при котором на высоте 1,7 м в горящем помещении видимость в дыму для человека снижается до предельного значения ($l_{np} = 20 \text{ м}$).

⁵ Fire dynamics simulator. Technical reference guide [Electronic resource] / K. McGrattan [at al.]. – Washington: U.S. Government printing office, National institute of standards and technology, 2000. – Mode of access: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6467.pdf>. – Date of access: 02.09.2019.

⁶ См. сн. 1.

Из представленных на рисунке данных видно, что скорость нарастания среднеобъемной оптической плотности дыма по методике ГОСТ 12.1.004-91 значительно завышена по сравнению с результатами компьютерного моделирования по полевой модели пожара с использованием FDS. Если рассматривать погрешность расчетов определения НВЭ для данного помещения, то по сравнению с результатами расчетов по полевой модели пожара формула (6) занижает НВЭ всего на 8 %, а методика ГОСТ 12.1.004-91 – на 34 %. Такие погрешности не являются существенными при проведении моделирования пожара в помещениях малого объема (жилая комната, учебный класс, рабочий кабинет и т. п.) в связи с малыми численными значениями НВЭ. Однако для зальных помещений (зрительные и концертные залы, залы кинотеатров и подобные помещения) численная погрешность расчетов определения НВЭ уже будет составлять несколько минут. В свою очередь это приведет к удорожанию их строительства за счет организации дополнительных эвакуационных выходов.

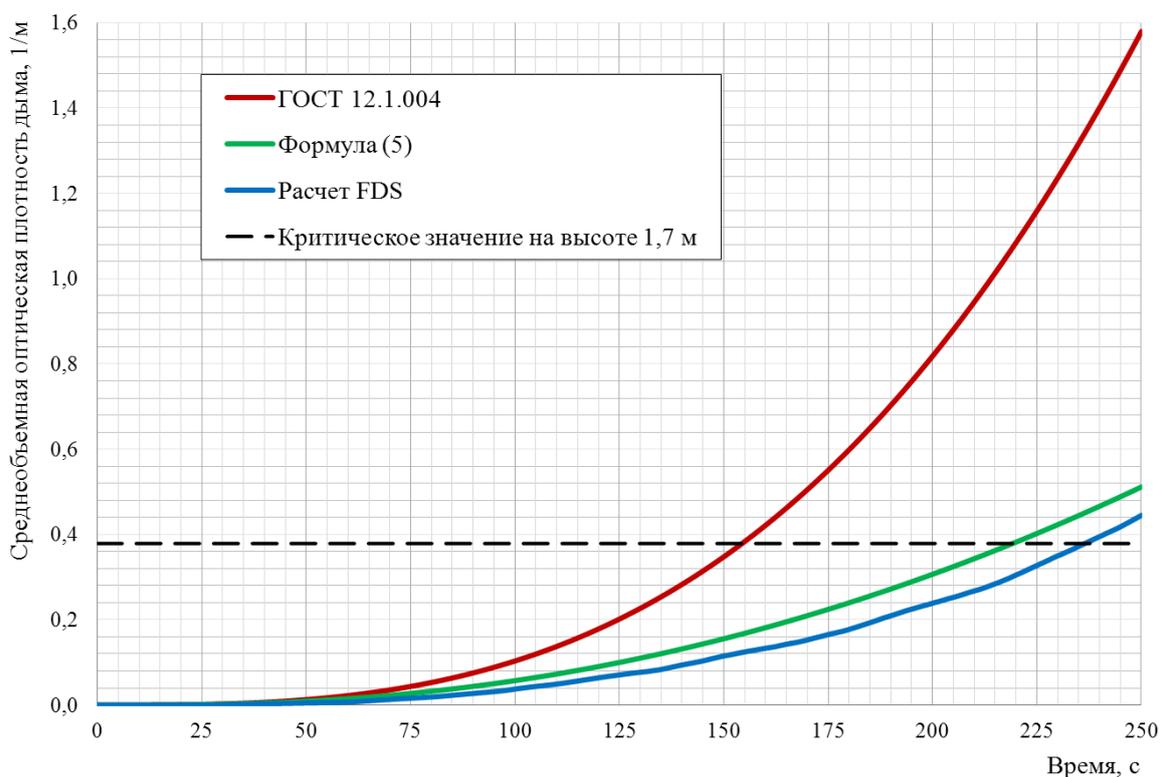


Рисунок. – Расчеты динамики среднеобъемной оптической плотности дыма в зрительном зале кинотеатра

Заключение. С учетом принятия допущения об отсутствии на начальной стадии пожара газообмена помещения с окружающей средой через проемы и седиментации частиц дыма на поверхности ограждающих конструкций решено дифференциальное уравнение интегральной модели пожара, описывающее динамику оптической плотности дыма в горящем помещении с учетом работы противодымной вентиляции. Получено алгебраическое уравнение, которое с сопоставимой для полевой модели пожара точностью позволяет рассчитать динамику оптической плотности дыма в зальных помещениях, оборудованных системой противодымной вентиляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Акад. ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
2. 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.

3. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода расчета необходимого времени эвакуации людей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.С. Зотов. – М., 1989. – 227 л.
4. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
5. Пузач, С.В. Теоретические разработки интегрального метода моделирования / С.В. Пузач, В.М. Казенов. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.
6. Болодьян, И.А. Развитие полевого метода моделирования пожаров в помещениях / И.А. Болодьян [и др.] // Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России: сб. ст. / Федеральное гос. учреждение «Всероссийский научно-исслед. ин-т противопожарной обороны»; под ред. Н.П. Копылова. – М., 2007. – С. 54–120.
7. Воднев, В.Т. Основные математические формулы: справочник / В.Т. Воднев, А.Ф. Наумович, Н.Ф. Наумович; под ред. Ю.С. Богданова. – Минск: Высш. шк., 1988. – 270 с.

Аналитическая оценка динамики среднеобъемной оптической плотности дыма на начальной стадии пожара в помещениях, оборудованных противодымной вентиляцией
Analytical determination of the dynamics of the volumetric optical density of smoke at the initial stage of a fire in compartment's equipped with smoke ventilation

Ботян Сергей Сергеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, старший преподаватель

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: aseckis@mail.ru

Sergey S. Botyan

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Senior lecturer

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: aseckis@mail.ru

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Associate Professor

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», отдел научной и инновационной деятельности, начальник отдела

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: vadkud@gmail.com

Vadim A. Kudryashov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Department of Scientific and Innovation Activity, Head of the Department

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: vadkud@gmail.com

Осяев Владимир Александрович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: vladimir_osyaev@mail.ru

Vladimir A. Osyayev

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Associate Professor

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: vladimir_osyaev@mail.ru

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», первый заместитель начальника университета

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25
e-mail: plamennyj98@gmail.com

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», First Deputy Chief of the University

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: plamennyj98@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.359>

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE DYNAMICS OF THE VOLUMETRIC OPTICAL DENSITY OF SMOKE AT THE INITIAL STAGE OF A FIRE IN COMPARTMENT'S EQUIPPED WITH SMOKE VENTILATION

Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Osyaev V.A., Pastukhov S.M.

Purpose. To obtain an algebraic equation that allows calculation the dynamics of the volumetric optical density of smoke in a compartment equipped with smoke ventilation.

Methods. Solving the differential equations of the integral fire model and using computational computer models of fire dynamics.

Findings. An algebraic equation is obtained that allows calculating the dynamics of the volumetric optical density of smoke in a compartment equipped with anti-smoke ventilation with comparable accuracy for the field model of fire.

Application field of research. The presented results were obtained to simulate the effects of dangerous fire factors on people and can be used in practical calculations to evaluate the safe evacuation of people from buildings and structures in case of fire.

Keywords: initial stage of fire, optical density of smoke, smoke ventilation, computer simulation.

(The date of submitting October 10, 2019)

REFERENCES

1. Koshmarov YU.A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Predicting indoor fire hazards]: tutorial. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2000. 118 p. (rus)
2. Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Molchadskiy I.S., Shevlyakov A.N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Thermogasdynamics of indoor fires]. Ed. by Yu.A. Koshmarov. Moscow: Stroyizdat, 1988. 448 p. (rus)
3. Zotov Yu.S. *Protsess zadymleniya pomeshcheniy pri pozhare i razrabotka metoda rascheta neobkhodimogo vremeni evakuatsii lyudey* [The process of smoke in a fire and the development of a method for calculating the necessary time for evacuation of people]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.01. Moscow, 1989. 227 p. (rus)
4. Puzach S.V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Calculation methods of heat and mass transfer in case of fire in the room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety]. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2005. 336 p. (rus)
5. Puzach S.V., Kazonov V.M. *Teoreticheskie razrabotki integral'nogo metoda modelirovaniya* [Theoretical development of the integral modeling method]. Moscow: Pozhnauka, 2000. 482 p. (rus)
6. Bolod'yan I.A. [et al.]. *Razvitie polevogo metoda modelirovaniya pozharov v pomeshcheniyakh* [Development of a field method for modeling indoor fires]. *Yubileynyy sbornik trudov FGU VNIPO MChS Rossii* [Anniversary Proceedings of the FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia]. Ed. by N.P. Kopylova. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2007. Pp. 54–120. (rus)
7. Vodnev V.T., Naumovich A.F., Naumovich N.F. *Osnovnyye matematicheskie formuly* [Basic mathematical formulas]: handbook. Ed. by Yu.S. Bogdanov. Minsk: Vysshaya shkola, 1988. 270 p. (rus)