

С. В. ПУЗАЧ, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: puzachsv@mail.ru)

И. В. СИТНИКОВ, старший преподаватель кафедры техносферной и пожарной безопасности, Воронежский государственный технический университет (Россия, 394006, г. Воронеж, Московский просп., 14; e-mail: igorsitnikov.vrn@gmail.com)

О. С. ЛЕБЕДЧЕНКО, канд. юрид. наук, доцент, доцент кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: ol-26@mail.ru)

П. В. КОМРАКОВ, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры процессов горения, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

ДО ТХАНЬ ТУНГ, канд. техн. наук, научный сотрудник Главного управления пожарной безопасности и спасения Министерства общественной безопасности Вьетнама (Вьетнам, 100000, г. Ханой, ул. Динх Ле, 2А; e-mail: dotung1288@gmail.com)

УДК 614.841.4

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПО ВЫСОТЕ ПОМЕЩЕНИЯ НА ВЫСОТУ ПЛОСКОСТИ РАВНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Выполнена теоретическая оценка влияния неоднородного распределения температур по высоте помещения на высоту плоскости равных давлений при пожаре. Показано, что в открытом проеме могут существовать две нейтральные плоскости. Получены экспериментальные зависимости распределения температур по высоте и высоты плоскости равных давлений от времени. Проведено сравнение теоретических распределений температур по высоте экспериментального объема, полученных с учетом и без учета неоднородного распределения температур, с экспериментальными данными. Экспериментально подтверждено существование двух плоскостей равных давлений на начальной стадии развития пожара. Показано, что для достоверного обоснования времени срабатывания пожарных температурных извещателей необходимо учитывать неоднородность температурного поля по высоте помещения.

Ключевые слова: пожар; термогазодинамика; плоскость равных давлений; распределение температур; тепломассообмен через проем.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.24-31

Введение

Тепломассообмен через открытые проемы является одним из наиболее значимых факторов термогазодинамической картины пожара, определяющих динамику развития опасных факторов пожара в помещении [1–21].

Под воздействием перепада давлений внутри и снаружи помещения происходит естественный газообмен через проемы. На распределение давления внутри помещения по его высоте и, следовательно, на высоту расположения плоскости равных давлений (или нейтральной плоскости), а также на массовые расходы газов, выходящих через проемы наружу, и воздуха, поступающего в помещение, решающее влияние оказывает неоднородность температурного поля по высоте помещения.

В первом приближении в интегральной модели расчета динамики развития опасных факторов пожара температура по высоте помещения принимается постоянной и равной ее среднееобъемному значению [1]. Однако в работах [2–4] показано, что температура существенно изменяется по высоте, а распределение давлений по высоте внутри помещения не является линейным, как принято в работе [1].

Цель настоящей статьи — экспериментальная и теоретическая оценка влияния неоднородного распределения температур по высоте помещения на высоту расположения нейтральной плоскости.

Для достижения цели были проведены теоретические и экспериментальные исследования распределения температур по высоте, а также определения положения плоскости равных давлений на начальной стадии развития пожара.

© Пузач С. В., Ситников И. В., Лебедченко О. С., Комраков П. В., До Тхань Тунг, 2018

Распределение температур по высоте помещения при пожаре

В работе [1] выражение распределения температур по высоте помещения имеет вид:

$$\frac{T}{T_{\text{ср}}} = \frac{T_0}{T_{\text{ср}}} + \frac{T_{\text{ср}} - T_0}{T_{\text{ср}}} \frac{z}{2h} \exp\left(1,4 \frac{z}{2h}\right), \quad (1)$$

где T — локальная температура на высоте z от уровня пола помещения, К;

$T_{\text{ср}}$ — среднеобъемная температура газовой среды помещения, К;

T_0 — начальная температура в помещении, К;

h — половина высоты помещения, м.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что распределение температур по высоте помещения во многих случаях можно аппроксимировать следующей зависимостью [3]:

$$T = \frac{T_{\text{ср}}}{1 + a(1 - z/h)}, \quad (2)$$

где a — экспериментальный безразмерный коэффициент, учитывающий неоднородное распределение температур по высоте.

Высота расположения плоскости равных давлений [3] определяется как:

$$\bar{z}_{\text{нп}} = \frac{\rho_{\text{ср}}(1+a) - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ср}}a} \pm \frac{1}{a} \left\{ \left(\frac{\rho_{\text{ср}}(1+a) - \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ср}}} \right)^2 - \right. \\ \left. - 2a \left[\frac{p_{\text{ср}} - p_{\text{в}} - \frac{\rho_{\text{ср}}gah}{6} - \rho_{\text{в}}gh}{\rho_{\text{ср}}gh} \right] + \frac{2+a}{2} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где $\bar{z}_{\text{нп}}$ — безразмерная высота нейтральной плоскости; $\bar{z}_{\text{нп}} = z_{\text{нп}}/h$;

$z_{\text{нп}}$ — высота нейтральной плоскости, м;

$\rho_{\text{ср}}$ — среднеобъемная плотность газовой среды помещения, кг/м³;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность наружного воздуха, кг/м³;

$p_{\text{ср}}$ — среднеобъемное давление в газовой среде помещения, Па;

$p_{\text{в}}$ — давление атмосферного воздуха на высоте, равной половине высоты помещения, Па;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Из формулы (3) видно, что в помещении могут существовать две нейтральных плоскости. Например, в частном случае, когда $\rho_{\text{ср}} = 1 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $p_{\text{ср}} - p_{\text{в}} = 3,2 \text{ Па}$, $h = 3 \text{ м}$, $a = 0,3$, две плоскости равных давлений расположены на высоте $z_{\text{нп1}} = 0,9 \text{ м}$ и $z_{\text{нп2}} = 2,1 \text{ м}$.

Это подтверждается расчетами с использованием полевой трехмерной модели расчета тепломассообмена при пожаре [2, 22], в которых показан случай возникновения двух плоскостей равных

$z, \text{ м} / z, \text{ м}$

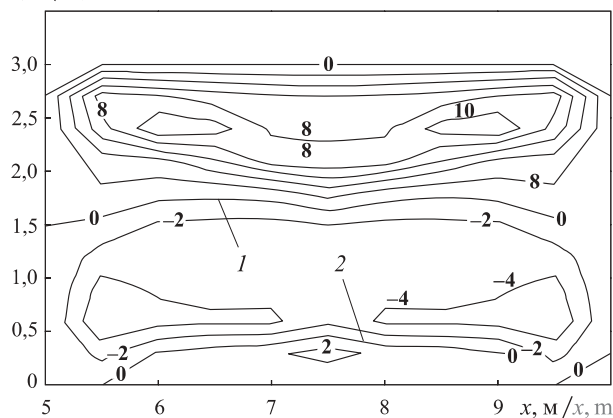


Рис. 1. Поля скоростей в плоскости проема, расположенного в нижней части помещения размером 35×15×6 м, через 30 с от начала горения керосина: 1 — верхняя плоскость равных давлений; 2 — то же, нижняя; x — координата вдоль длины помещения

Fig. 1. The velocity fields in the plane of the opening located in the lower part of the premise with a size of 35×15×6 m after 30 sec from the start of kerosene combustion: 1 — the upper plane of equal pressures; 2 — the same, lower; x — coordinate along the length of the room

давлений в дверном проеме помещения размерами 35×15×6 м через 30 с от начала горения керосина (рис. 1 [2, 22]).

Из рис. 1 видно, что существуют две поверхности, где скорости равны нулю. Вблизи уровня пола образуется зона течения газов наружу.

Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на двух опытных установках. Схема установки № 1 представлена на рис. 2.

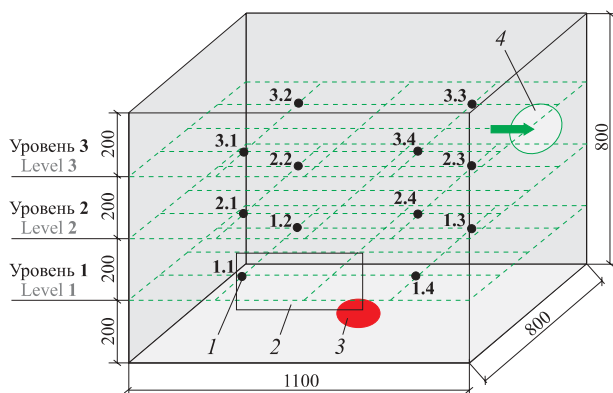


Рис. 2. Схема экспериментальной установки № 1: 1 — датчик температуры; 2 — отверстие для естественного притока воздуха; 3 — лабораторная чашка из алюминия (поддон); 4 — дымоприемное отверстие

Fig. 2. Scheme of the experimental installation no. 1: 1 — temperature sensor; 2 — hole for natural air inflow; 3 — laboratory cup made of aluminum (pallet); 4 — smoke inlet

В качестве материала стен использовался стекломагниевый лист толщиной 10 мм.

Размеры экспериментального объема составляли 1×0,8×0,8 м, отверстия для естественного притока воздуха — 0,4×0,18 м.

В качестве горючего вещества использовался этиловый спирт, которым заполняли лабораторную чашку из алюминия (поддон) диаметром 0,09 м, установленную на дополнительной платформе в центре установки.

Смесь продуктов горения и воздух удалялись системой противодымной вентиляции через дымоприемное отверстие. Система вытяжной противодымной вентиляции представляла собой радиальный вентилятор мощностью 216 Вт, подсоединенный к установке с помощью гофрированной трубы диаметром 0,1 м. Скорость потока газовой среды регулировалась посредством высокоточного частотного преобразователя фирмы Lenze, подключенного через электрическую сеть к вентилятору.

Для контроля температуры газовой среды внутри экспериментальной модели помещения использовался многоканальный измеритель температуры ТМ-12М с высоким (II) классом точности. Измерение температуры проводилось с помощью 12 термопар, расположенных в центре условных равновеликих объемов физической модели на трех уровнях от пола установки (0,2; 0,4 и 0,6 м). Датчики крепились на медную проволоку, натянутую между гра-

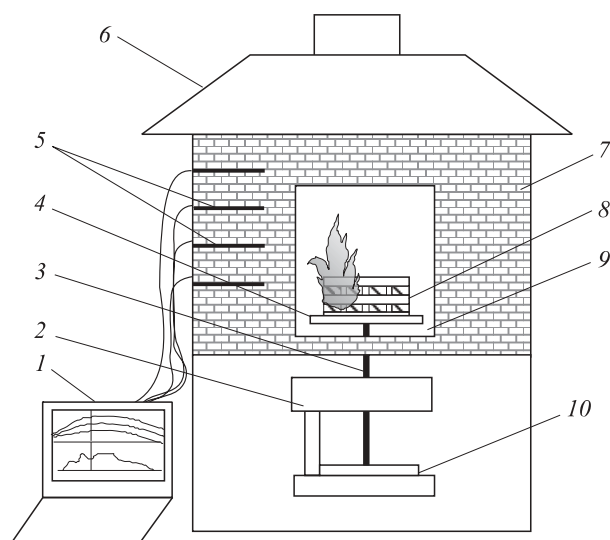


Рис. 3. Схема экспериментальной установки № 2: 1 — компьютер; 2 — электронные весы; 3 — штот; 4 — поддон; 5 — термопары; 6 — зонт системы вентиляции; 7 — макет помещения; 8 — штатель; 9 — открытый проем; 10 — платформа весов

Fig. 3. Scheme of the experimental installation no. 2: 1 — computer; 2 — electronic scales; 3 — stock; 4 — pallet; 5 — thermocouples; 6 — umbrella of the ventilation system; 7 — model of the premise; 8 — stack; 9 — opening; 10 — weighing platform

нями модели. Временной интервал результатов измерения составлял 5 с.

Схема экспериментальной установки № 2 приведена на рис. 3.

В качестве горючего вещества использовалась древесина (сосна), которая закладывалась в поддон 4.

Из-за недостаточного количества термопар внутри экспериментального объема на данной установке измеряли только положение плоскости равных давлений. Для этого по центру открытого проема 9 через каждые 20 с испытаний в вертикальном направлении поднималась горящая свеча. По отклонению пламени с помощью видеосъемки находили высоту расположения плоскостей равных давлений.

Результаты экспериментального исследования

Распределения относительных, средних по каждому уровню значений температур по высоте экспериментальной установки № 1 в моменты времени 60, 90, 120, 150, 180 и 240 с от начала горения представлены на рис. 4.

Среднеобъемная температура t_{cp} в момент времени $\tau = 60$ с составляла 36,9 °С, при $\tau = 240$ с — 57,8 °С.

Из рис. 4 видно, что расчет по формуле (2) при коэффициенте $a = 0,1$ (кривая 1) совпадает с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 3 %.

Погрешность расчета с использованием формулы (1) по сравнению с результатами, полученными

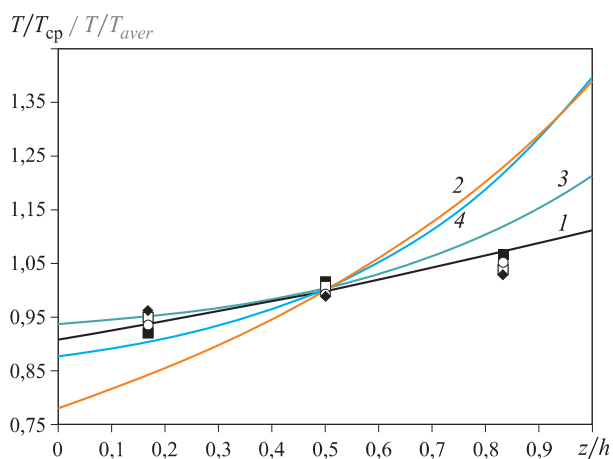


Рис. 4. Распределение средних по каждому уровню значений температур по высоте экспериментальной установки № 2, определяемых по формуле (1) (1 — $a = 0,1$; 2 — $a = 0,28$), по формуле (2) (3 — $\tau = 60$ с; 4 — $\tau = 240$ с); символы — эксперимент

Fig. 4. Distribution of the mean values temperatures for each level of measurements along the height of the experimental installation no. 2, determined by the formula (1) (1 — $a = 0,1$; 2 — $a = 0,28$), by the formula (2) (3 — $\tau = 60$ sec, 4 — $\tau = 240$ sec); symbols — experiment

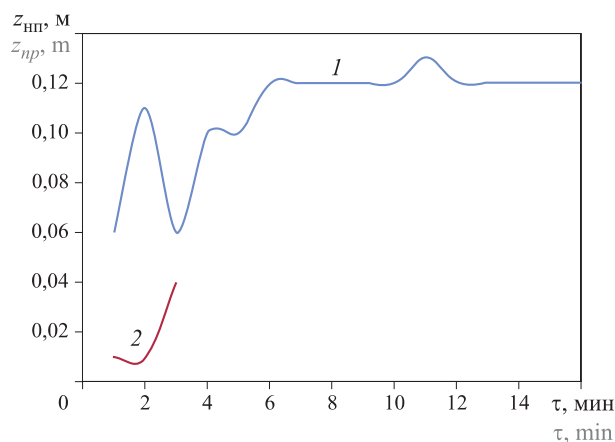


Рис. 5. Зависимость высоты расположения плоскости равных давлений от времени с начала горения: 1 — верхняя плоскость равных давлений; 2 — то же, нижняя

Fig. 5. Dependence of the height of the arrangement of the equal pressures plane on the time from the start of burning: 1 — upper plane of equal pressures; 2 — the same, lower

по формуле (2), на уровне перекрытия помещения не превышает 10 % при $\tau = 60$ с и 26 % — при $\tau = 240$ с. Отсюда видно, что с течением времени развития пожара точность формулы (1) снижается.

Таким образом, используемая в работе [1] и в нормативных документах по пожарной безопасности (например, в Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [23]) формула (1) требует корректировки. Погрешность, которая может достигать 26 % на уровне перекрытия помещения, не позволяет достоверно обосновать время срабатывания пожарных температурных извещателей. При этом

расчетное время срабатывания вышеуказанных извещателей будет занижаться, что приведет к недооценке пожарной опасности, например к занижению времени начала эвакуации или включения систем пожарной безопасности.

Зависимости высоты расположения плоскостей равных давлений от времени испытаний в экспериментальной установке № 2 приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что на начальной стадии развития пожара существуют две нейтральные плоскости. Через 3 мин от начала горения нижняя плоскость равных давлений исчезает.

Это объясняется тем, что с ростом температуры и давления внутри экспериментального объема величина второго слагаемого (выражение внутри квадратного корня) правой части уравнения (3) возрастает. Поэтому высота расположения нижней нейтральной плоскости, вычисляемая при знаке “—” перед вторым слагаемым, уменьшается и становится отрицательной (ниже уровня пола помещения).

Закключение

Распределение температуры по высоте помещения, учитывающее неоднородность температурного поля и существенно влияющее на тепломассообмен через открытый проем газовой среды помещения с окружающей средой, удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными.

Вышеуказанная зависимость позволяет обосновать одновременное существование двух плоскостей равных давлений, что экспериментально подтверждено для начальной стадии развития пожара в опытной установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
2. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. — 336 с.
3. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. — М. : Стройиздат, 1988. — 448 с.
4. Puzach S. V., Puzach V. G., Kazennov V. M. Certain regularities of heat and mass transfer through an open aperture in a fire in the compartment // Heat Transfer Research. — 2005. — Vol. 36, No. 7. — P. 615–622. DOI: 10.1615/heattransres.v36.i7.70.
5. Chung Hwei Su, Jia Hong Bai. Measurement of the neutral plane of an internal fire whirl using the background-oriented Schlieren technique for a vertical shaft model of a high-rise building // Measurement. — 2016. — Vol. 78. — P. 151–167. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.004.
6. Dahai Qi, Liangzhu Wang, Radu Zmeureanu. The effects of non-uniform temperature distribution on neutral plane level in non-adiabatic high-rise shafts during fires // Fire Technology. — 2017. — Vol. 53, Issue 1. — P. 153–172. DOI: 10.1007/s10694-015-0554-2.
7. 130 highrise building projects in Toronto lead North America // CBC News. — January 21, 2014. URL: <http://www.cbc.ca/news/business/130-highrise-building-projects-in-toronto-lead-north-america-1.2504776> (дата обращения: 27.06.2018).

8. Zhao G., Wang L. Using helium smoke as a surrogate of fire smoke for the study of atrium smoke filling // Journal of Fire Science. — 2014. — Vol. 32, Issue 5. — P. 431–447. DOI: 10.1177/0734904114529403.
9. Li L. J., Ji J., Shi W. X., Gao Z. H., Sun J. H., Zhu J. P. A modified turbulent mixing model with the consideration of heat transfer between hot buoyant plume and sidewalls in a closed stairwell // International Journal of Heat Mass Transfer. — 2015. — Vol. 84. — P. 521–528. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.012.
10. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2014. — Vol. 72. — P. 585–594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042.
11. Qi D., Wang L. L., Zmeureanu R. Verification of a multizone airflow and energy network model by analytical solutions to Stack-driven flows in buildings // eSIM Conference Proceedings (Ottawa, Canada). — 2014. — 14 p. URL: <http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2014/1A.1.pdf> (дата обращения: 27.06.2018).
12. Li L. J., Ji J., Fan C. G., Sun J. H., Yuan X. Y., Shi W. X. Experimental investigation on the characteristics of buoyant plume movement in a stairwell with multiple openings // Energy Buildings. — 2014. — Vol. 68. — P. 108–120. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.028.
13. Wang L. L., Black W. Z., Zhao G. Comparison of simulation programs for airflow and smoke movement during high-rise fires // ASHRAE Transactions. — 2013. — Vol. 119. — Part 2. — P. 157–168.
14. Klotz J. H., Milke J. A., Turnbull P. G., Kashef A., Ferreira M. J. Handbook of smoke control engineering. — Atlanta, GA : American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012. — 512 p.
15. Shi W. X., Ji J., Sun J. H., Lo S. M., Li L. J., Yuan X. Y. Influence of staircase ventilation state on the airflow and heat transfer of the heated room on the middle floor of high rise building // Applied Energy. — 2014. — Vol. 119. — P. 173–180. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.055.
16. Ji J., Li L. J., Shi W. X., Fan C. G., Sun J. H. Experimental investigation on the rising characteristics of the fire-induced buoyant plume in stairwells // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2013. — Vol. 64. — P. 193–201. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.030.
17. Ji J., Wan H., Li Y., Li K., Sun J. Influence of relative location of two openings on fire and smoke behaviors in stairwell with a compartment // International Journal of Thermal Sciences. — 2015. — Vol. 89. — P. 23–33. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.008.
18. Ji J., Li M., Li Y., Zhu J., Sun J. Transport characteristics of thermal plume driven by turbulent mixing in stairwell // International Journal of Thermal Sciences. — 2015. — Vol. 89. — P. 264–271. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.009.
19. Yang D., Du T., Peng S., Li B. A model for analysis of convection induced by stack effect in a shaft with warm airflow expelled from adjacent space // Energy and Buildings. — 2013. — Vol. 62. — P. 107–115. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.02.045.
20. Ji J., Li M., Gao Z. H., Li Y. F., Shi W. X., Sun J. H. Experimental investigation of combustion characteristics under different ventilation conditions in a compartment connected to a stairwell // Applied Thermal Engineering. — 2016. — Vol. 101. — P. 390–401. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.117.
21. Ситников И. В., Колодяжский С. А., Однолько А. А. Экспериментальное исследование и моделирование динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости в условиях функционирования противодымной вентиляции // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. — 2014. — Т. 35, № 3. — С. 149–157.
22. Пузач С. В., Пузач В. Г. Некоторые трехмерные эффекты тепломассообмена при пожаре в помещении // Инженерно-физический журнал. — 2001. — Т. 74, № 1. — С. 35–40.
23. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382; введ. 30.06.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — 45 с.

Материал поступил в редакцию 7 июля 2018 г.

Для цитирования: Пузач С. В., Ситников И. В., Лебедченко О. С., Комраков П. В., До Тхань Тунг. Влияние неоднородного распределения температур по высоте помещения на высоту плоскости равных давлений при пожаре // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 7–8. — С. 24–31. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.24-31.

INFLUENCE OF HETEROGENEOUS TEMPERATURE DISTRIBUTION ALONG THE PREMISE HEIGHT ON THE HEIGHT OF A PLANE OF EQUAL PRESSURES DURING FIRE

PUZACH S. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: puzachsv@mail.ru)

SITNIKOV I. V., Senior Lecturer of Technospheric and Fire Safety Department, Voronezh State Technical University (Voronezh, 394006, Russian Federation, Moscow Avenue, 14; e-mail: igorsitnikov.vrn@gmail.com)

LEBEDCHENKO O. S., Candidate of Legal Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: ol-26@mail.ru)

KOMRAKOV P. V., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Combustion Processes Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

DO THANH TUNG, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Vietnam Fire and Rescue Police Department, Ministry of Public Security (Dinh St., 2A, Hanoi, 100000, Vietnam; e-mail: dotung1288@gmail.com)

ABSTRACT

Introduction. Heat and mass transfer through open holes is influenced significantly by the temperature distribution over the height of the premise. In the first approximation in the integral model of calculating the dynamics of dangerous fire factors, the temperature along the height of the premise is assumed to be constant and equal to its average volume value. However, the temperature varies significantly along height, and the distribution of pressures along the height inside the premise is not linear. Therefore, it is necessary to conduct further experimental and theoretical studies of the influence of the inhomogeneity of the temperature field inside the premise on the parameters of heat and mass transfer through the openings.

Goals and objectives. The purpose of the paper is to evaluate experimentally and theoretically the influence of the inhomogeneity of the temperature distribution along the height of the premise upon the height of the neutral plane. To achieve this, we used the formula for the temperature distribution along the altitude, which includes the empirical coefficient of the inhomogeneity of the temperature field. Experimental studies were carried out that made it possible to refine the above-mentioned coefficient and determine the position of the plane of equal pressures at the initial stage of the fire.

Methods. A theoretical method for calculating the temperature distribution over the height of the premise and the height of the neutral plane is used, as well as an experimental method for studying heat and mass transfer in a small experimental installation.

Results. Experimental dependences of the temperature distribution along the height of the experimental volume at different times and the height of the plane of equal pressures on time are obtained. A comparison is made between experimental data and the theoretical temperature distributions along the height obtained with and without allowance for temperature inhomogeneity. The existence of two planes of equal pressures at the initial stage of the fire is experimentally confirmed. It is shown that for a reliable justification of the response time of fire temperature detectors it is necessary to take into account the inhomogeneity of temperature along the height of the premise.

Conclusion. The temperature distribution along the height of the premise, taking into account the inhomogeneity of the temperature field, is in satisfactory agreement with the experimental data. The above dependence allows us to justify the simultaneous existence of two planes of equal pressures, which has been experimentally confirmed for the initial stage of a fire in a pilot installation.

Keywords: fire; thermal and gas dynamics; plane of equal pressure; temperatures distribution; heat and mass transfer through an open holes.

REFERENCES

1. Koshmarov Yu. A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [The prediction of dangerous fire factors in the room]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
2. Puzach S. V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezопасnosti* [Methods for calculating heat and mass transfer during a fire at the premises and their application in solving practical fire and explosion safety problems]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005. 336 p. (in Russian).
3. Astapenko V. M., Koshmarov Yu. A., Molchadskiy I. S., Shevlyakov A. N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Thermogasdynamics of fires in buildings]. Moscow, Stroizdat Publ., 1988. 448 p. (in Russian).
4. Puzach S. V., Puzach V. G., Kazennov V. M. Certain regularities of heat and mass transfer through an open aperture in a fire in the compartment. *Heat Transfer Research*, 2005, vol. 36, no. 7, pp. 615–622. DOI: 10.1615/heattransres.v36.i7.70.
5. Chung Hwei Su, Jia Hong Bai. Measurement of the neutral plane of an internal fire whirl using the background-oriented Schlieren technique for a vertical shaft model of a high-rise building. *Measurement*, 2016, vol. 78, pp. 151–167. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.004.
6. Dahai Qi, Liangzhu Wang, Radu Zmeureanu. The effects of non-uniform temperature distribution on neutral plane level in non-adiabatic high-rise shafts during fires. *Fire Technology*, 2017, vol. 53, issue 1, pp. 153–172. DOI: 10.1007/s10694-015-0554-2.
7. 130 highrise building projects in Toronto lead North America. *CBC News*, January 21, 2014. Available at: <http://www.cbc.ca/news/business/130-highrise-building-projects-in-toronto-lead-north-america-1.2504776> (Accessed 27 June 2018).
8. Zhao G., Wang L. Using helium smoke as a surrogate of fire smoke for the study of atrium smoke filling. *Journal of Fire Science*, 2014, vol. 32, issue 5, pp. 431–447. DOI: 10.1177/0734904114529403.
9. Li L. J., Ji J., Shi W. X., Gao Z. H., Sun J. H., Zhu J. P. A modified turbulent mixing model with the consideration of heat transfer between hot buoyant plume and sidewalls in a closed stairwell. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2015, vol. 84, pp. 521–528. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.012.
10. Qi D., Wang L., Zmeureanu R. An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 72, pp. 585–594. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.042.
11. Qi D., Wang L. L., Zmeureanu R. Verification of a multizone airflow and energy network model by analytical solutions to Stack-driven flows in buildings. In: *eSIM Conference Proceedings (Ottawa, Canada)*, 2014, 14 p. Available at: <http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2014/1A.1.pdf> (Accessed 27 June 2018).
12. Li L. J., Ji J., Fan C. G., Sun J. H., Yuan X. Y., Shi W. X. Experimental investigation on the characteristics of buoyant plume movement in a stairwell with multiple openings. *Energy Buildings*, 2014, vol. 68, pp. 108–120. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.028.
13. Wang L. L., Black W. Z., Zhao G. Comparison of simulation programs for airflow and smoke movement during high-rise fires. *ASHRAE Transactions*, 2013, vol. 119, part 2, pp. 157–168.
14. Klote J. H., Milke J. A., Turnbull P. G., Kashef A., Ferreira M. J. *Handbook of smoke control engineering*. Atlanta, GA, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012. 512 p.
15. Shi W. X., Ji J., Sun J. H., Lo S. M., Li L. J., Yuan X. Y. Influence of staircase ventilation state on the airflow and heat transfer of the heated room on the middle floor of high rise building. *Applied Energy*, 2014, vol. 119, pp. 173–180. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.055.
16. Ji J., Li L. J., Shi W. X., Fan C. G., Sun J. H. Experimental investigation on the rising characteristics of the fire-induced buoyant plume in stairwells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 64, pp. 193–201. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.030.
17. Ji J., Wan H., Li Y., Li K., Sun J. Influence of relative location of two openings on fire and smoke behaviors in stairwell with a compartment. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, vol. 89, pp. 23–33. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.008.
18. Ji J., Li M., Li Y., Zhu J., Sun J. Transport characteristics of thermal plume driven by turbulent mixing in stairwell. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, vol. 89, pp. 264–271. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.009.

19. Yang D., Du T., Peng S., Li B. A model for analysis of convection induced by stack effect in a shaft with warm airflow expelled from adjacent space. *Energy and Buildings*, 2013, vol. 62, pp. 107–115. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.02.045.
20. Ji J., Li M., Gao Z. H., Li Y. F., Shi W. X., Sun J. H. Experimental investigation of combustion characteristics under different ventilation conditions in a compartment connected to a stairwell. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 101, pp. 390–401. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.117.
21. Sitnikov I. V., Kolodyazhnyj S. A., Odnol'ko A. A. Experimental study and modeling of specific mass burning rate of liquid with functioning smoke ventilation. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura / Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 149–157 (in Russian).
22. Puzach S. V., Puzach V. G. Some three-dimensional effects of heat and mass transfer in a fire within a building. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 1, pp. 47–55.
23. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009.

For citation: Puzach S. V., Sitnikov I. V., Lebedchenko O. S., Komrakov P. V., Do Thanh Tung. Influence of heterogeneous temperature distribution along the premise height on the height of a plane of equal pressures during fire. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 7–8, pp. 24–31 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.24-31.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу



Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

ДЕЛЕНИЕ ЗДАНИЙ НА ПОЖАРНЫЕ ОТСЕКИ : учебное пособие.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА".

В учебном пособии изложены базовые основы, действующие требования и современные представления о целях, задачах и способах ограничения распространения пожара по зданиям и сооружениям путем их разделения на пожарные отсеки.

Пособие предназначено для студентов Московского государственного строительного университета. Оно может быть использовано также другими образовательными учреждениями и практическими работниками, занимающимися вопросами обеспечения пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 6; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru