

УДК 536.46+614.841.123.24

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗООБМЕНА ЧЕРЕЗ ПРОЕМ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОМЕЩЕНИЯМИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОЖАРА

Осяев В.А.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

Представлены результаты натурального эксперимента по измерению параметров газообмена между двумя помещениями на начальной стадии пожара. Получены зависимости среднеобъемной температуры в рассматриваемых помещениях и распределений скорости и температуры газового потока по высоте дверного проема от продолжительности пожара. На основе полученных данных оценен перепад давлений по высоте дверного проема.

The full-scale experiments on gas exchange between two compartments at the initial stage of the fire have been carried out. Time as well as burnt fire load dependence of indoor temperature in both compartments, rate of gas flows and temperature in the doorway vent has been obtained. The gas pressure difference depending on vent height has been estimated.

(Поступила в редакцию 12 июля 2013 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач проектирования противопожарной защиты зданий и сооружений состоит в обеспечении безопасности людей при пожаре. Безопасность людей при пожаре на его начальной стадии определяется воздействием первичных опасных факторов пожара (ОФП): пламени, повышенной температуры, задымлением, пониженной концентрацией кислорода, действием токсических продуктов горения. Безопасность достигается эвакуацией людей из здания через эвакуационные выходы. Завершение эвакуации людей из здания должно произойти до наступления критических значений ОФП как в помещении с пожаром, так и смежных помещениях [1]. Для смежных помещений предполагается, что горение в них отсутствует, а достижение критических значений ОФП происходит в результате газообмена через проемы, вызванного различием параметров состояния газовой среды в двух помещениях, прежде всего перепадом давлений между ними.

Расчеты времени наступления ОФП могут быть проведены на основе интегральной, зонной и полевой моделей пожара [1-7]. Наиболее простой из них является интегральная модель пожара, положенная в основу ГОСТ 12.1.004 [1]. Суть интегральной модели заключается в вычислении зависимости от времени усредненных по объему помещения его термодинамических параметров: температуры, давления, плотность газовой среды, концентрация кислорода, концентрация токсичных газов и др. Предполагается также последующий пересчет этих параметров для определения необходимых значений на отметках по высоте помещения [2,8].

Следует подчеркнуть, что для детального понимания сложной динамики пожара, в том числе газообмена между помещениями необходимы не только расчеты по той или иной модели пожара, но и экспериментальные исследования, дополняющие и обосновывающие теоретические представления (см. [2,3,7,9-11]). При этом, использование даже интегральной модели в инженерных расчетах крайне затруднительно, т. к., например, рекомендации по определению давления в помещении с пожаром и в смежном помещении в методике ГОСТ 12.1.004 [1] не изложены.

В настоящей работе получены экспериментальные данные для параметров динамики развития пожара в помещении, в том числе проведены измерения характеристик газообмена

между помещением с пожаром и смежным с ним помещением. Для двух рассматриваемых помещений получены временные зависимости распределения температуры и ее среднеобъемные значения, а также найдены распределения температуры и скорости газовых потоков по высоте проема между ними. На основе полученных данных, с привлечением уравнения Бернулли сделаны оценки перепада давлений в зависимости от высоты проема.

ГАЗООБМЕН МЕЖДУ ПОМЕЩЕНИЯМИ В РАМКАХ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Согласно ГОСТ 12.1.004 [1] расход газов через проем между помещением с пожаром и смежным помещением, G , $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$, определяется по уравнению:

$$G = \text{sign}(\Delta P) \mu B (y_2 - y_1) \sqrt{2\rho |\Delta P|}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад полных давлений в пределах параметров y_2 , y_1 проема между помещениями, Па;

μ – коэффициент расхода проема;

B – ширина проема, м;

y_2, y_1 – нижняя и верхняя границы газового потока в проеме, м;

ρ – средняя плотность газов в потоке, проходящих через проем, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Газовый поток, через проем в одну или другую сторону и его границы зависят от положения плоскости равных давлений y_0 , м:

$$y_0 = (P_1 - P_2) / g(\rho_2 - \rho_1), \quad (2)$$

где P_1, P_2 – величины статического давления на уровне пола помещения с пожаром и смежного помещения, Па;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$;

ρ_1, ρ_2 – среднеобъемные плотности газа в помещении с пожаром и в смежном помещении, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Если плоскость равных давлений располагается вне нижней h_1 и верхней h_2 границ рассматриваемого проема ($y_0 \leq h_1$ или $y_0 \geq h_2$), то весь поток в проеме течет в одну сторону, а его расход следует вычислять при условии совпадения y_1 и y_2 с физическими границами проема h_1 и h_2 . Перепад давлений ΔP в зависимости от высоты проема в этом случае вычисляют по формуле:

$$\Delta P = P_1 - P_2 + g(h_1 + h_2)(\rho_2 - \rho_1) / 2. \quad (3)$$

Если плоскость равных давлений располагается в границах проема ($h_1 < y_0 < h_2$), то в нем текут два потока: из помещения с пожаром в смежное помещение и из смежного помещения в помещение с пожаром. Нижний поток, в помещении с пожаром, имеет границы h_1 и y_0 , и перепад давления ΔP_n , определяющий движение этого потока дается формуле:

$$\Delta P_n = P_1 - P_2 + g(y_0 + h_1)(\rho_2 - \rho_1) / 2. \quad (4)$$

Поток в верхней части проема, из помещения с пожаром, имеет границы y_0 и h_2 , и перепад давления ΔP_e , определяющий движение этого потока рассчитывается по формуле:

$$\Delta P_e = P_2 - P_1 + g(h_2 + y_0)(\rho_2 - \rho_1) / 2. \quad (5)$$

Из уравнения (1) видно, что расход газов напрямую зависит от значения среднего перепада полных давлений ΔP в пределах y_2, y_1 газового потока в проеме. Необходимо подчеркнуть, что даже при малых $|\Delta P|$ ($0,5 \text{ Па} < \Delta P < 1,5 \text{ Па}$), расход G через проем может различаться в несколько раз. При определении времени наступления критических значений

ОФП на основе расчета динамики ОФП это приведет к значительной ошибке как в сторону занижения, так и в сторону завышения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Анализ результатов экспериментальных исследований [2,7,9-10] показывает, что прямое измерение давления, отличного от атмосферного только лишь на 10^{-3} – 10^{-2} % крайне затруднительно из-за погрешности приборов измерения. Как представляется, оптимальным способом определения перепада давлений в проеме является его косвенная оценка на основе измерения скорости и температуры газовых потоков в проеме между помещением с пожаром и смежным помещением.

Объектом настоящего исследования было одноэтажное железобетонное здание с двумя помещениями без оконных проемов, каждое высотой 2,55 м и объемом соответственно 56,7 и 32,6 м³. Помещения сообщались через два дверных проема размером 1,95×0,8 м. Очаг пожара размещался в центре помещения с объемом 56,7 м³. В качестве пожарной нагрузки для очага горения использовались: сосновая древесина массой 15 кг (низшая теплота сгорания $Q_n=18$ МДж/кг); резинотехнические изделия массой 10 кг (низшая теплота сгорания $Q_n=38,1$ МДж/кг). Для каждого вида пожарной нагрузки было проведено по 4 опыта по возможности с одинаковыми модельными очагами (см. ниже). Очаг пожара из древесины состоял из 24-х деревянных бруска размером 800×40×40 мм, размещенных в три ряда по высоте. Расстояние между брусками в ряду равнялось их ширине. Очаг из резинотехнических изделий представлен зимней шиной легкового автомобиля. Шины были подобраны одной марки и производителя.

В ходе эксперимента измерялась температура по высоте помещений и по высоте проема, скорость газовых потоков по высоте проема; измерялась также масса выгоравшей пожарной нагрузки. Для измерения температуры использовались термопары типа ТХК и ТХА, закрепленные на вертикальных стойках. В помещении с пожаром были размещены 3 стойки с термопарами на расстоянии 0,8 метра от середины стен без проемов. В смежном помещении были размещены 2 стойки с термопарами на одинаковом расстоянии от центра помещения. Измерение температуры в каждом помещении проводилось на шести высотных отметках: 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2,0 и 2,5 м. Измерение температуры в дверном проеме проводилось на пяти высотных отметках: 0,2; 0,6; 1; 1,5 и 1,8 м. Данные о температуре передавались на приборы «Сосна 002», «Сосна 004» и «МТ2» и фиксировались с помощью видеосъемки. Скорость и направление газового потока по высоте дверного проема измерялись электронными анемометрами АП1 с датчиками лепесткового типа. Датчики анемометров размещались на высоте 1,0, 1,5 и 1,8 м. Масса выгоравшей пожарной нагрузки измерялась электронными весами ТВ-S-200.2-A1 и фиксировалась с помощью фотосъемки.

В ходе эксперимента проводились также визуальные наблюдения за положением нижней границы дыма и проводилась фотосъемка полученного с помощью тепловизора изображения газового потока, выходящего через дверной проем из помещения с пожаром. Положение уровня дыма для каждого из помещений, а также для двух проемов измерялось с помощью установленных линеек.

Данные по измерению температуры в помещениях и дверном проеме, скорости газовых потоков в проеме, полученные в первом опыте при горении древесины, представлены на рис. 1-4. На рис. 5 приведены результаты изменения массы выгоревшей древесины от времени горения для четырех опытов. Как видно из рис. 5, скорость разгорания пожарной нагрузки на начальном этапе может различаться в несколько раз. Однако последующая интенсивность выгорания имеет схожий характер. Для всех измеряемых величин (температуры и скорости потока) в четырех опытах на этапе разгорания очага горения также произошли смещения по времени, аналогичные смещению для массы выгоревшей нагрузки.

Расхождение в скорости разгорания идентичных, на первый взгляд, очагов в четырех опытах обусловлено следующими факторами:

– Неоднородность древесины. Горение твердотельных материалов, в том числе древесины, происходит вследствие пиролиза, при котором выделяются горючие продукты разложения. Неоднородность горючих твердотельных материалов в свою очередь приводит к неравномерности его прогрева, и следовательно, к разной скорости разгорания.

– Малая мощность исходного источника зажигания. В качестве источника зажигания использовалась ветошь, смоченная в смеси бензина и дизельного топлива. Для устранения влияния источника зажигания на последующее горение очага пожара его масса составляла 50 ± 10 г. Недостатком использованного источника зажигания стала его малая мощность и, как следствие, слабое, подверженное тепловому разбросу, тепловое воздействие на пожарную нагрузку.

Поэтому для последующего сопоставления полученных данных для температуры и скоростей газовых потоков в четырех опытах был произведен перерасчет от их временной зависимости к зависимости от массы выгоревшей пожарной нагрузки. Результатом этого перехода стала хорошая корреляция полученных данных во всех проведенных опытах.

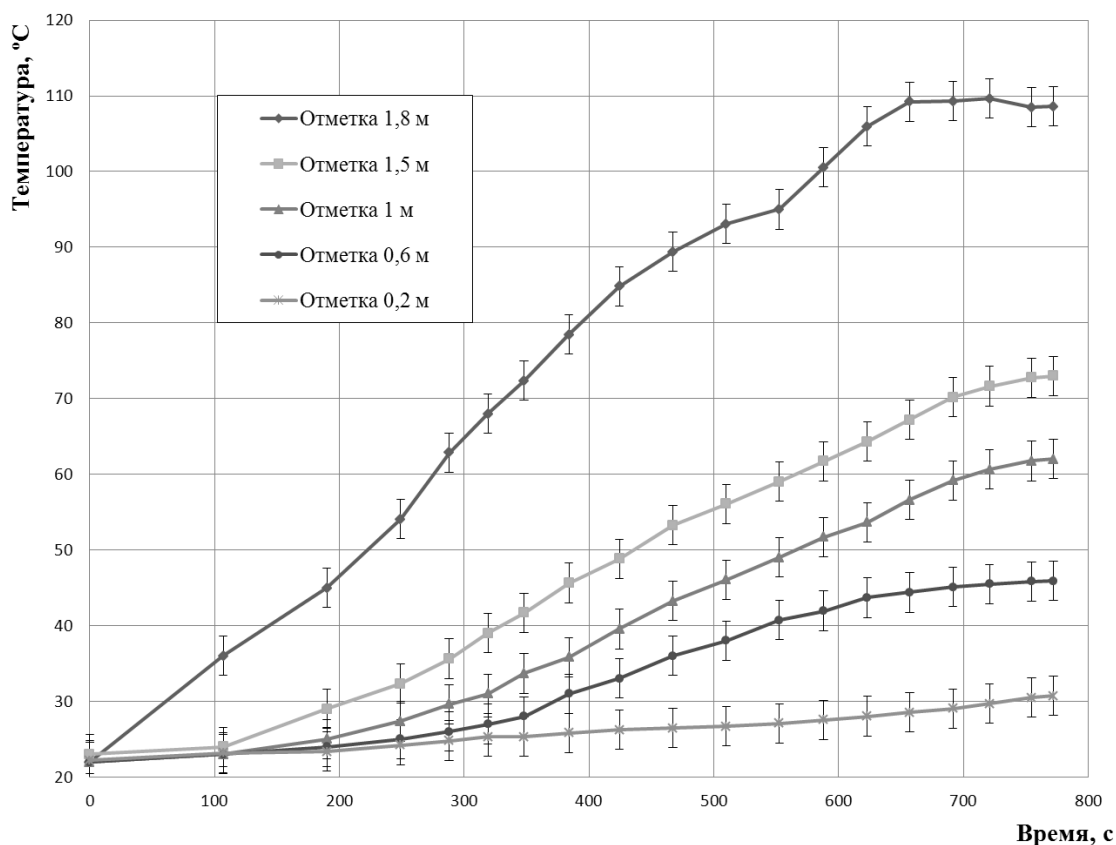


Рисунок 1 – Распределение температуры в дверном проеме между помещениями в зависимости от времени выгорания древесины

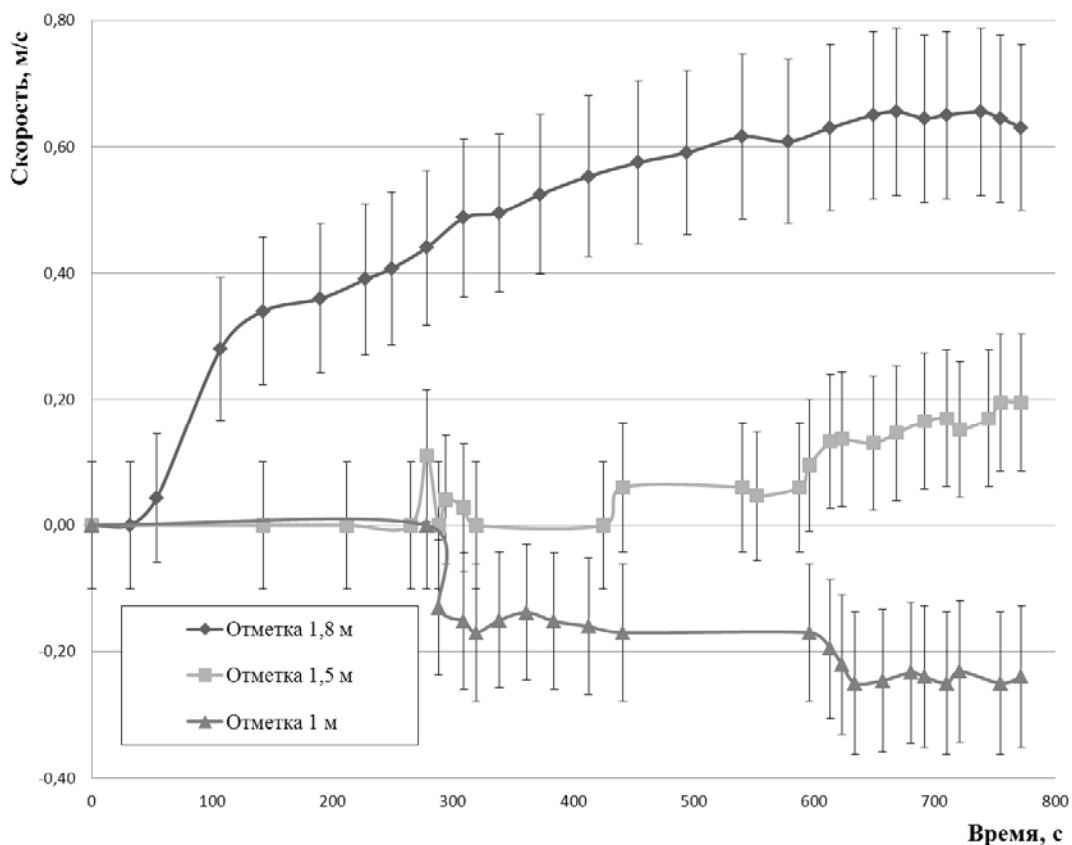


Рисунок 2 – Распределение скорости газов в дверном проеме между помещениями в зависимости от времени выгорания древесины

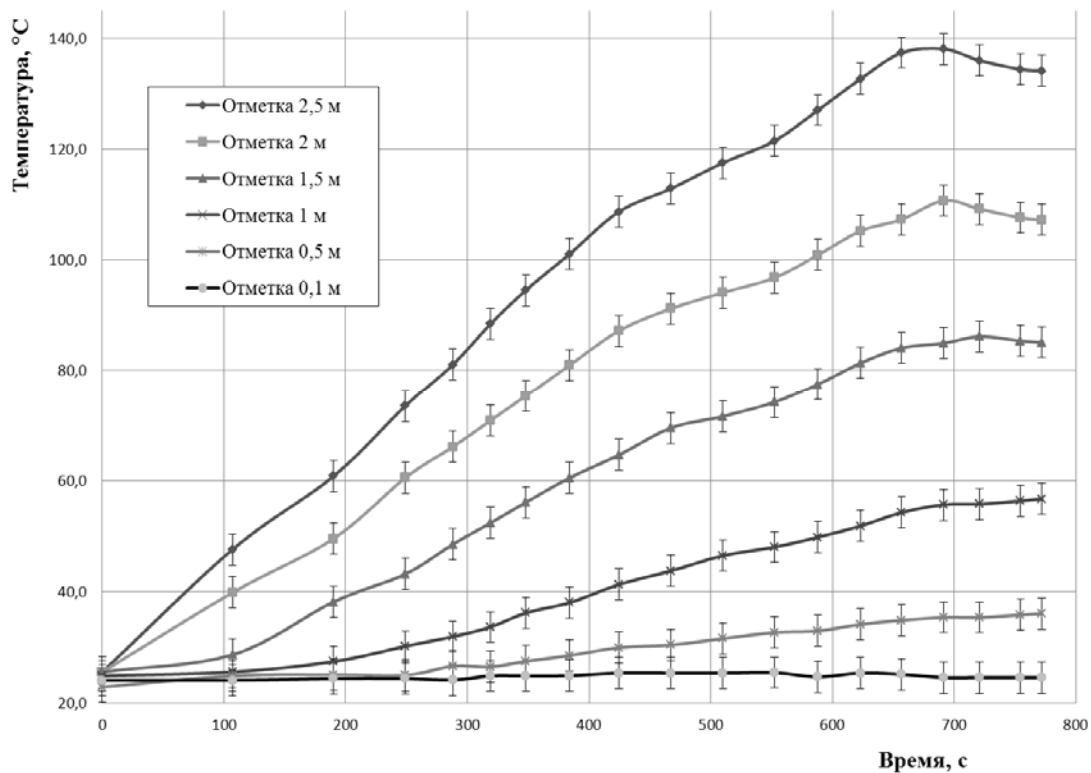


Рисунок 3 – Распределение температуры в помещении с пожаром в зависимости от времени выгорания древесины

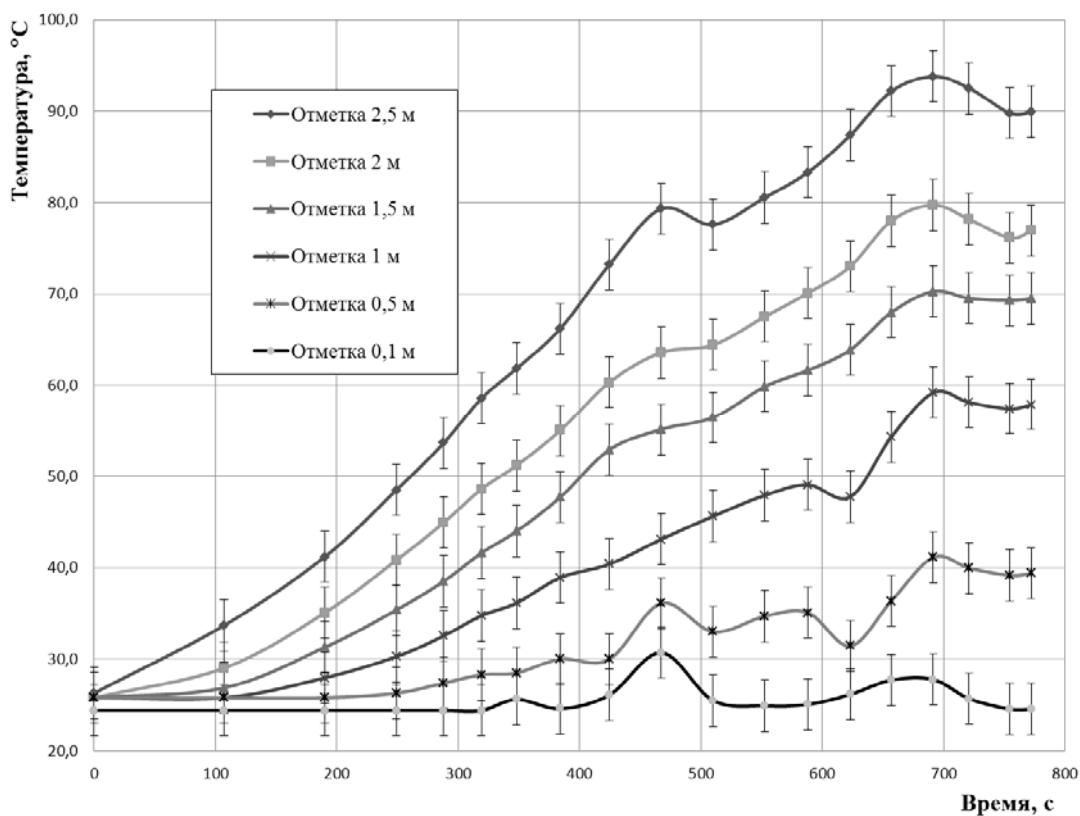


Рисунок 4 – Распределение температуры в смежном помещении пожаром в зависимости от времени выгорания древесины

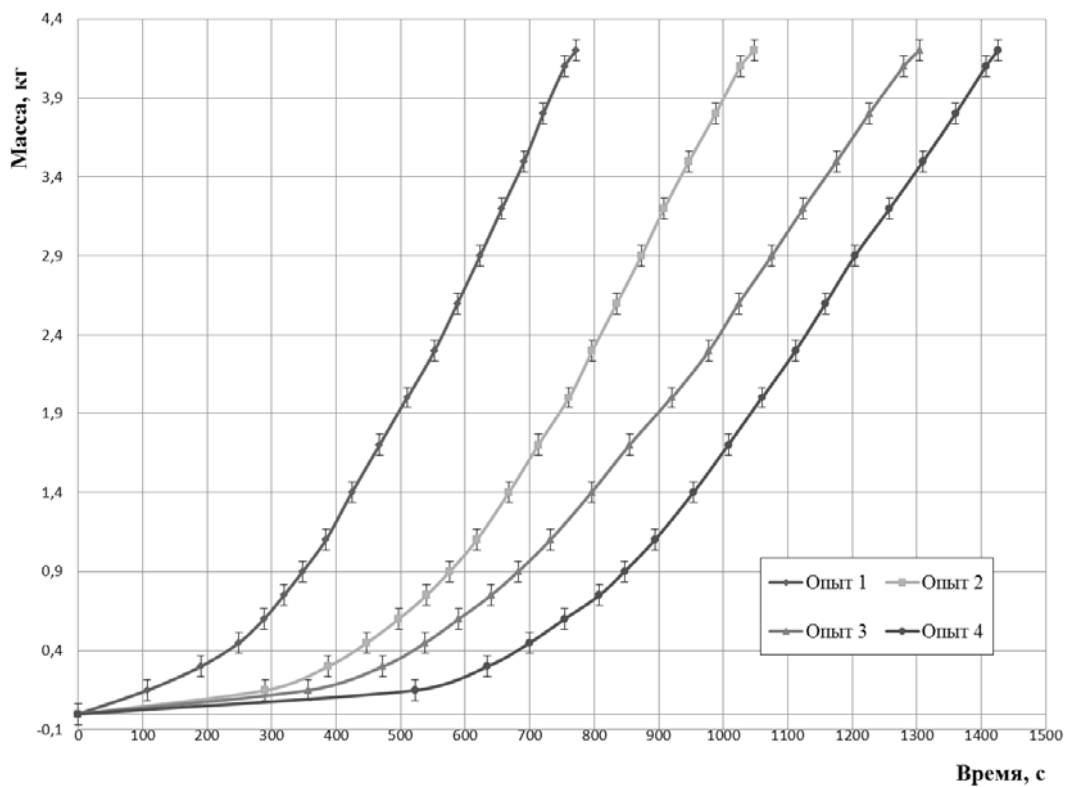


Рисунок 5 – Изменение массы выгоревшей древесины во времени

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости среднеобъемных температур в помещениях, скорости и температуры воздушных потоков в дверном проеме между ними от массы выгоревшей пожарной нагрузки Δm , которые представлены на рис. 6-9. С учетом того, что выделившаяся теплота пропорциональна массе выгоревшей нагрузки, $Q = \Delta m \cdot Q_n$, можно получить зависимости температуры и скоростей газовых потоков от выделившейся теплоты.

Необходимо отметить, что плоскость равных давлений в помещении с пожаром быстро устанавливается на отметке половины высоты помещения, т. е. при 1,25 м. Такая величина имеет место и для проема. Таким образом, и в проеме плоскость равных давлений находится на такой же высоте, что и в помещении с пожаром, а не на половине высоты проема (т. е. 0,9 м). Этот результат важен при вычислении расходов через проем горячих и холодных воздушных потоков в рамках интегральной модели, в частности, при учете в ее рамках распределения температуры в помещении с пожаром [8].

Полученные экспериментальные данные использовались также для расчета перепада давлений ΔP по высоте дверного проема в зависимости от выделившейся теплоты. Перепад давлений определен из уравнения Бернулли:

$$\Delta P = \rho v^2 / 2, \quad (6)$$

где ρ – плотность газового потока, кг/м³. Плотность газового потока рассчитывалась по формуле для каждого из опытов для двух видов пожарной нагрузки:

$$\rho = M / [V_0(1 + t_p / 273)], \quad (7)$$

и затем была пересчитана из зависимости от времени к зависимости от выделившейся теплоты $Q = \Delta m \cdot Q_n$ (рис. 10).

В формулах (6) и (7) v – скорость газового потока, м/с;

t_p – температура газового потока в проеме, °С;

В (7) M – молярная масса газа, кг/кмоль; принято $M = 29$ кг/кмоль;

V_0 – молярный объем, м³/кмоль; принято $V_0 = 22,413$ м³/кмоль.

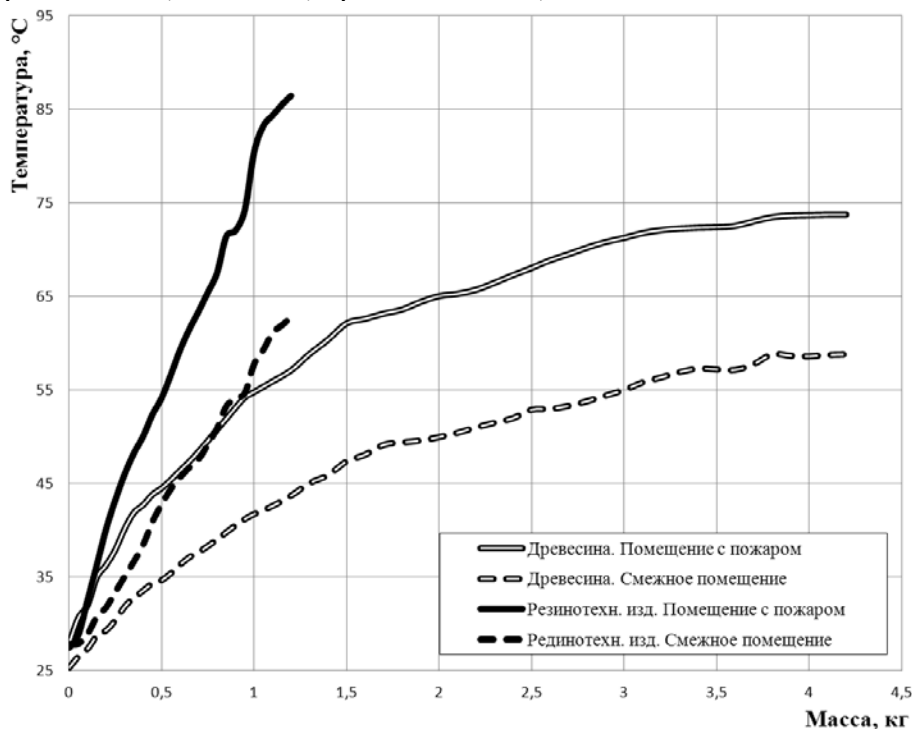


Рисунок 6 – Среднеобъемная температура в помещениях для пожарной нагрузки в виде древесины и резинотехнического изделия. Усреднено по четырем опытам для каждой пожарной нагрузки

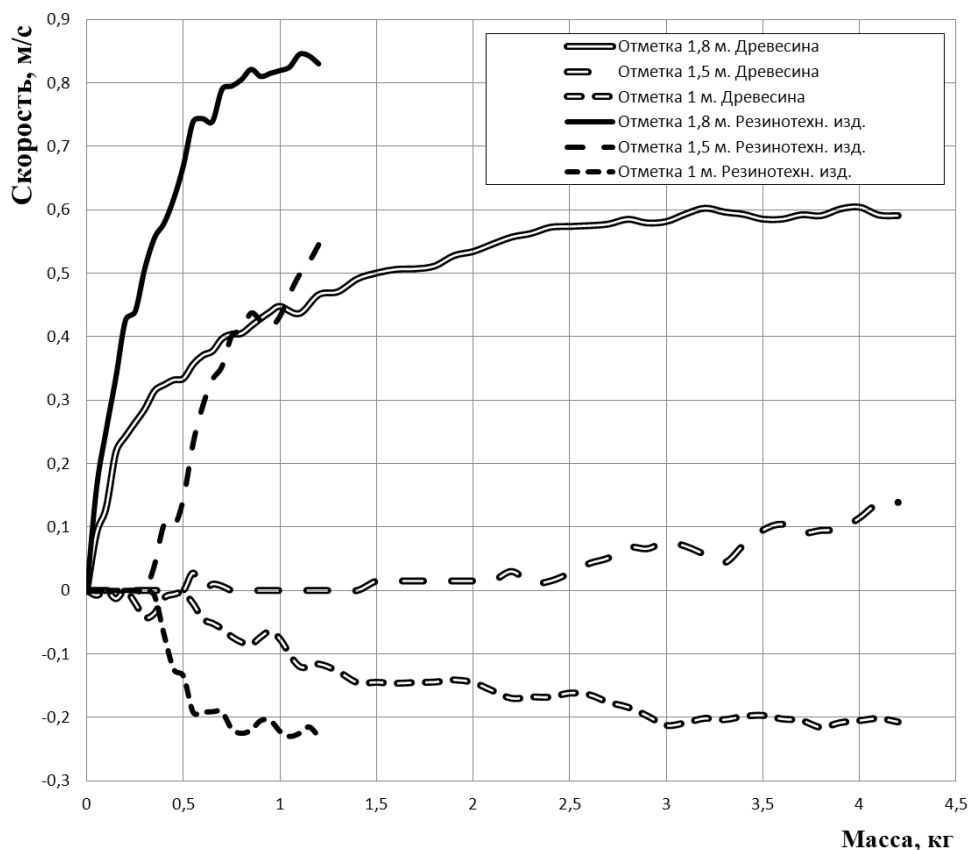


Рисунок 7 – Усредненная по четырем опытам скорость газового потока в проеме в зависимости от массы выгоревшей нагрузки. Положительные значения соответствуют потоку из помещения с пожаром

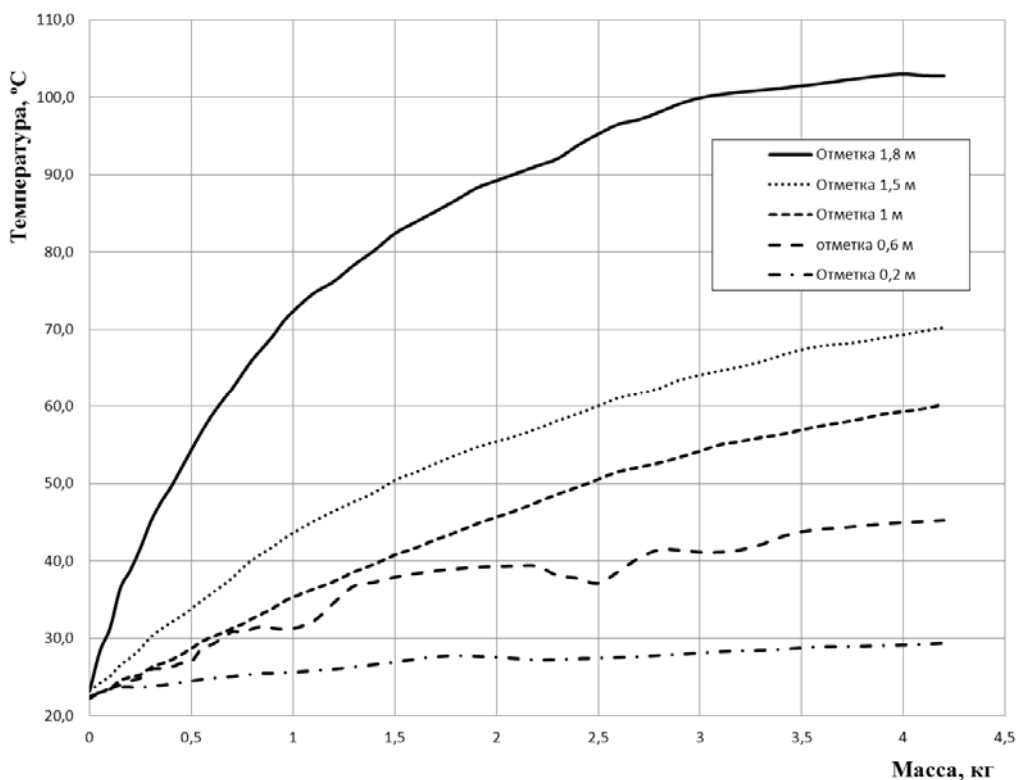


Рисунок 8 – Усредненная по четырем опытам температура газового потока в дверном проеме от массы выгоревшей древесины

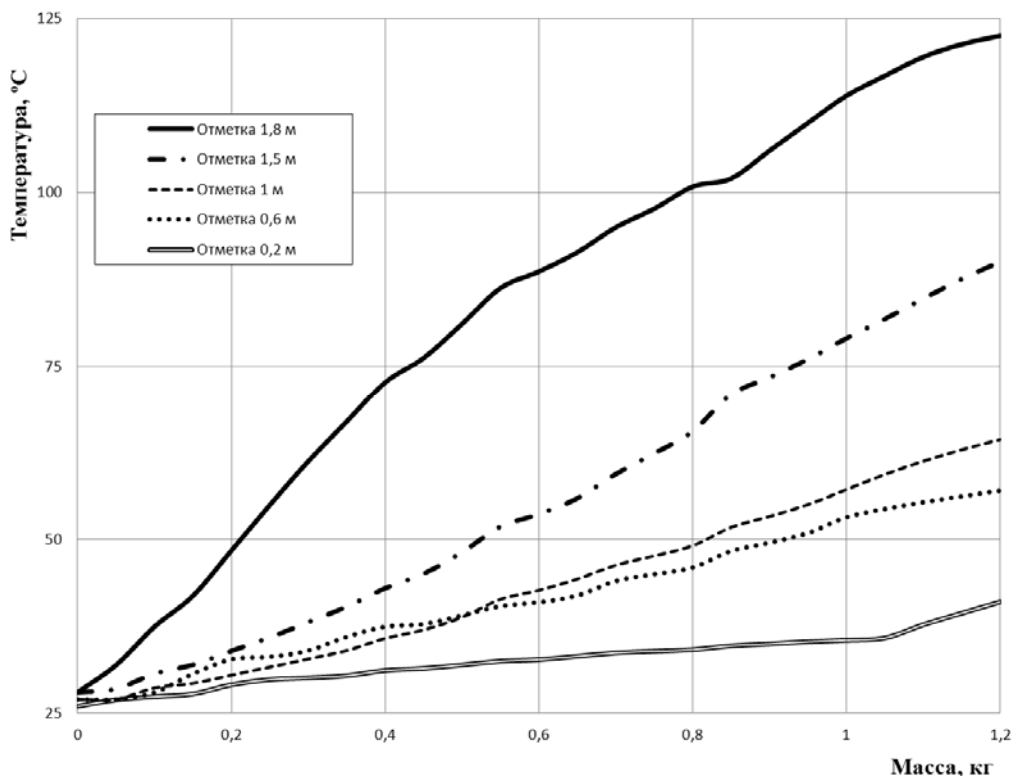


Рисунок 9 – Усредненная по четырем опытам температура газового потока в дверном проеме в зависимости от массы выгоревших резинотехнических изделий

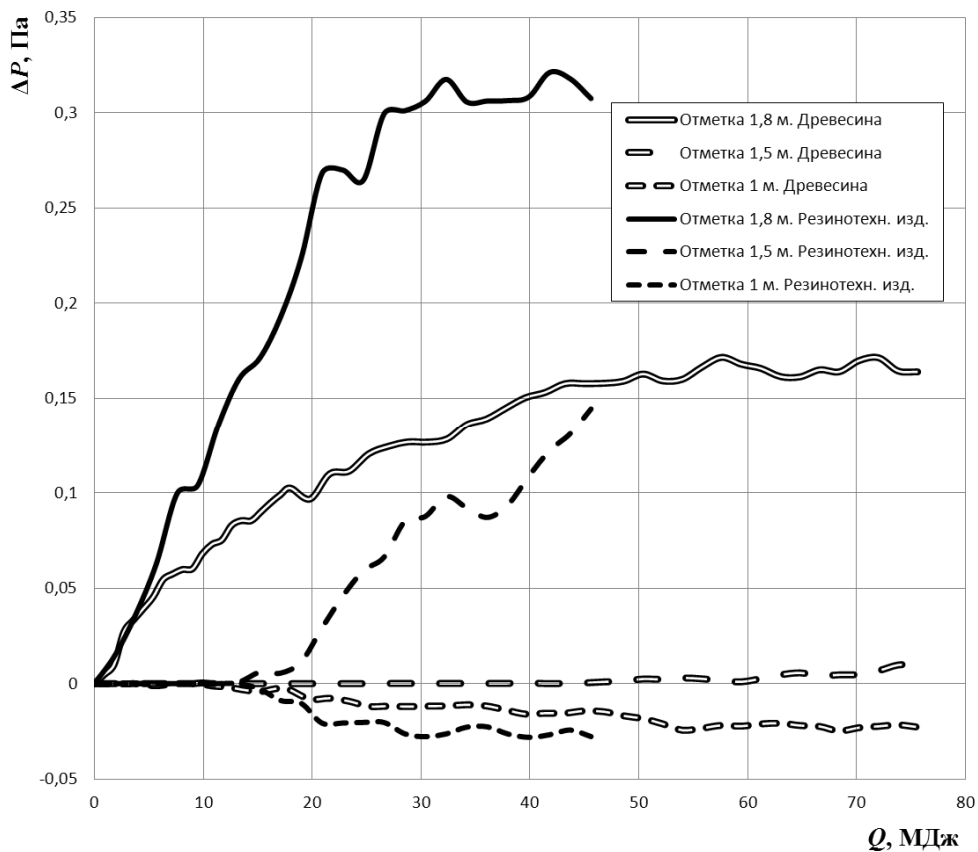


Рисунок 10 – Перепад давлений в дверном проеме в зависимости от выделившейся теплоты. Усреднено по четырем опытам для каждой нагрузки

Как видно из рис. 10, для пожарной нагрузки из древесины максимальный перепад давлений не превысил 0,17 Па, а при горении пожарной нагрузки из резинотехнических изделий – 0,31 Па.

Визуальные наблюдения за положением нижней границы дыма показали, что до достижения ОФП по температуре оно не совпадало с плоскостью равных давлений. В конце опытов плоскость дыма находилось на высоте $0,4 \pm 0,1$ м от уровня пола.

Фотосъемка изображения от тепловизора газового потока, выходящего через дверной проем из помещения с пожаром, показала, что высота плоскости равных давлений за приблизительно первую четверть продолжительности опытов опускается до половины высоты помещения и остается практически неизменной до завершения экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для начальной стадии пожара получены экспериментальные данные о динамике изменения температуры в помещении с пожаром и в смежном помещении, а также о динамике изменения параметров газообмена между ними. Определена среднеобъемная температура в рассматриваемых помещениях и распределения скорости и температуры газового потока по высоте дверного проема в зависимости от массы выгоревшей пожарной нагрузки. Полученные экспериментальные данные использованы для расчета перепада давлений в зависимости от высоты дверного проема между смежными помещениями, в результате чего получены его зависимости от выделившейся теплоты при пожаре. Проведены наблюдения за положением плоскости равных давлений и нижней границы задымления.

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, ст. науч. сотр. В.А. Кузьмицкому за обсуждение материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004–91. – Введ. 01.07.92. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР: Министерство внутренних дел СССР, Министерство химической промышленности СССР, 1996. – 83 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. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
4. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
5. Пузач, С.В. Теоретические разработки интегрального метода моделирования / С.В. Пузач, Казёнов В.М. – М.: Изд-во «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 / под ред. Н.П. Копылова. – М., 2007. – С. 54-120.
7. Зотов, Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода расчета необходимого времени эвакуации людей: дис...канд. техн. наук: 05.26.01 / Ю.С. Зотов. – М., 1989. – 277 с.
8. Кузьмицкий, В.А. Газообмен через проем при учете распределения температуры в помещении с пожаром / Кузьмицкий, В.А., Осяев В.А., Полевода И.И. // Вестн. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2009. – № 2(10) – С. 86-95.

9. Nielsen, C. An Analysis of Pre-Flashover Fire Experiments with Field Modelling Comparisons. Fire Engineering Research Report. – School of Engineering University of Canterbury Private Bag 4800 Christchurch. – 2000.
10. Rutherford, L. Experimental Results for Pre-Flashover Fire Experiments in Two Adjacent ISO Compartments. A research project report presented as partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Fire Engineering. – New Zealand: Department of Civil Engineering University of Canterbury Christchurch. – 2002.
11. Кузьмицкий, В.А. Опасные факторы пожара на начальной стадии в смежном помещении в рамках интегральной модели / Кузьмицкий, В.А., Полевода И.И., Осяев В.А. // Вестн. Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2011. – № 1(13) – С. 105-109.