

МАСШТАБИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕСТОВОГО ПОЖАРА ПРИ ИСПЫТАНИИ С ПОМОЩЬЮ ГОРЯЧЕГО ДЫМА СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Свердлов А.В. , Волков А.П., Волков М.А., Рыков С.В.

Аннотация

Противопожарная защита зданий и сооружений с массовым пребыванием людей является важнейшей и наиболее ответственной задачей при проектировании таких объектов. Работоспособность и эффективность систем противодымной вентиляции достигается за счет соблюдения правил проектирования и численного моделирования воздухораспределения. Наиболее достоверным методом является экспериментальная проверка работоспособности противодымной вентиляции. Воспроизвести реальный пожар в условиях объекта, без повреждений конструкций здания или сооружения не представляется возможным, поэтому испытания проводят на пониженных, безопасных параметрах пожара. В статье рассмотрена методика масштабирования параметров тестового пожара и параметров противодымной вентиляции, позволяющая получить результаты релевантные к проектным параметрам пожара.

Альтернативным вариантом по отношению к этим методам масштабирования может быть только прогнозирование проектных параметров и условий испытания на основе одного и того же метода расчета, а также тот случай, когда прогнозирование результатов испытания подтверждается наблюдениями.

Монтаж системы противодымной вентиляции должен следовать всем указаниям проекта. Однако, опыт строительно-монтажных работ свидетельствует о наличие возможных отклонений от оригинального проекта.

Это ставит перед утверждающим органом и владельцем объекта ряд вопросов:

- а) был ли оригинальный проект системы противодымной вентиляции успешным для достижения поставленных целей;
- б) как влияют внесенные изменения на работу системы.

Проще говоря – работает ли эта часть системы противопожарной безопасности.

В этом случае, для экспериментального подтверждения проектных показателей противодымной вентиляции и всего комплекса противопожарной защиты здания или сооружения применяют испытания с применением горячего искусственного дыма.

Первоначально, для имитации пожара использовали местные отопительные агрегаты, производящие поток горячего воздуха. Для создания искусственного очага горения использовали строительный мусор [1].

В дальнейшем для создания тестового пожара стали применять этиловый промышленный денатурированный спирт. В продуктах сгорания спирта практически отсутствуют мелкие частицы и они относительно низкотоксичны. Синтетический дым может использоваться для того, чтобы сделать поток продуктов горения видимым.

Исследования горения спирта в термостатируемых поддонах, с использованием синтетического дыма, выполненные в Австралии привели к разработке стандарта [2].

Цели и задачи таких испытаний применительно к закрытым автостоянкам описаны в работе [3].

Одной из задач испытаний горячим дымом является проверка штатного срабатывания систем противопожарной защиты, в последовательности, предусмотренной в проекте. В стандарте [2] именно эта задача считается основной. Как правило, для того чтобы не нанести повреждений зданию и оборудованию, испытательный пожар должен быть значительно (на порядок) меньше реального пожара, предусмотренного в нормативных документах и проекте.

В тех случаях, когда достижение проектных показателей достаточно важно для принятия решения об эффективности приёмо-сдаточных испытаний, можно организовать испытание горячим дымом, основанное на принципах масштабирования.

При испытании поперечной канальной противодымной вентиляции при помощи горячего дыма важно ответить на вопрос - возможна ли стабилизация нижней границы дыма при проектной конвективной мощности пожара Q_k по результатам тестового пожара меньшей мощности. В этом случае, исходя из принципа подобия, необходимо определить какие проектные параметры пожара необходимо масштабировать для получения достоверных результатов испытаний.

В случае продольной струйной противодымной вентиляции автостоянки необходимо ответить на два вопроса [4]:

- возможна ли стабилизация нижней границы дыма при отключенных струйных вентиляторах за счет продольного потока воздуха со скоростью $\geq v_{кр}$ в течении 8 – 15 минут после срабатывания пожарной сигнализации (времени, необходимого для эвакуации людей);

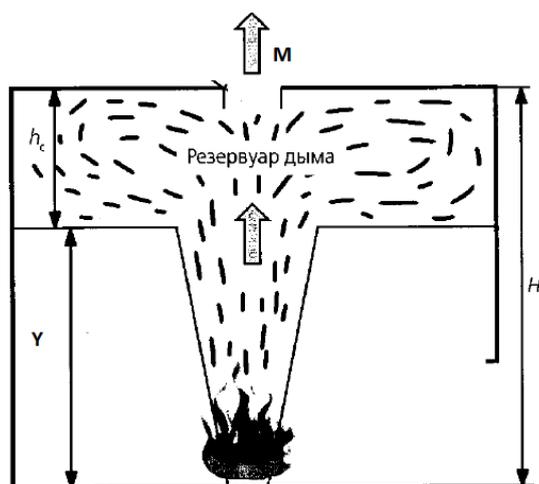
- возможно ли предотвратить распространения дыма на все помещение после включения струйной вентиляции, причем затекание подпотолочной струи дымовых газов в направлении вентиляционного потока допускается не более 10 – 15 метров.

Законы масштабирования, когда фундаментальные соотношения используются для экстраполяции из одного условия в другое, были известны уже давно. Масштабирование с использованием числа Фруде стало центральной темой экспериментальных работ, проводившихся много лет [5-7], особенно в области использования маломасштабных физических моделей для изучения восходящих потоков дыма. Те же соотношения могут использоваться для конвертации между пожарами разного размера в одном и том же линейном масштабе [8].

Традиционно масштабирование по Фруде применяется к турбулентным течениям. Именно такой тип движения соответствует восходящему воздушному потоку продуктов горения, представленному на Рис. 1, для которого справедливо уравнение Вейсбаха:

$$\Delta p = \xi \frac{u^2}{2} \rho, \quad (1)$$

где Δp - перепад давлений (Па) приводящий в движение газовый поток (воздух и/или дым) с плотностью ρ (кгм^{-3}) со скоростью u (мс^{-1}), при коэффициенте сопротивления движению ξ .



H – высота потолочного перекрытия; Y – высота нижней границы дыма; h_c – толщина дымового слоя (резервуара дыма); M – массовый расход, удаляемых продуктов горения.

Рис. 1 Схема очага горения в закрытом помещении.

Из (1) следует соотношение:

$$\Delta p \propto u^2 \rho \quad (2)$$

Для давления вызывающего восходящий поток дымовых газов от очага горения до нижней границы дыма на высоте Y (м) от пола можно записать уравнение:

$$\Delta p = \Delta \rho g Y = \rho_0 \frac{\theta}{T} g Y, \quad (3)$$

где ρ_0 (кгм^{-3}) и T_0 (К) - соответственно плотность и температура холодного приточного воздуха;

θ (К) – разность между температурой наружного воздуха T_0 и температурой горячих дымовых газов T (К).

Объединяя (2) и (3) получим:

$$u^2 \propto \theta L, \quad (4)$$

где L представляет собой масштаб характеристической длины.

В случае проведения испытаний в реальном здании шкала характеристической длины составляет 1:1 $L = 1$.

На основе результатов, полученных в работе [9] отношения масштабирования (коэффициенты масштабирования), релевантные к проектному сценарию пожара в реальном здании или сооружении представлены в виде ряда выражений.

Скорость восходящего потока u :

$$u \propto \theta^{0,5} = K_u \quad (5)$$

Объемный расход с восходящим потоком V :

$$V \propto \theta^{0,5} = K_V \quad (6)$$

Массовый расход M :

$$M \propto \frac{\theta^{0,5}}{T} = K_M \quad (7)$$

Конвективный тепловой поток Q_K :

$$Q_K \propto \frac{\theta^{1,5}}{T} = K_Q \quad (8)$$

Время τ в течении которого должен произойти поточный процесс:

$$\tau \propto \theta^{-0,5} = K_\tau \quad (9)$$

В проекте задан ряд параметров пожара, а именно:

- конвективная мощность пожара $Q_{к пр}$, кВт;
- периметр пожара $P_{пр}$, м;
- минимально допустимая высота нижней границы дыма $Y_{пр}$, м.

Определим массовый расход продуктов горения проектного пожара. Для этого воспользуемся зависимостью (10) [10]:

$$M_{пр} = C_e P_{пр} Y^{1,5}, \quad (10)$$

где C_e – коэффициент захватывания, равный для больших помещений с низким потолком (например, подземная автостоянка) 0,21 и 1,9 для больших помещений, где дымовой слой находится на значительной высоте.

В случае если периметр проектного пожара не известен можно воспользоваться формулой (11) [11, 12]:

$$M_{пр} = 0,032 (Q_{к пр})^{0,6} Y \quad (11)$$

В случае необходимости, $P_{пр}$ для заданного значения Y можно определить из (10), зная значение $M_{пр}$.

Далее следует определить параметры тестового пожара. Для этого необходимо:

- принять по условиям проекта допустимое значение перепада температур в очаге тестового пожара $\theta_{тест}$, исключающий повреждение помещений и оборудования;
- используя зависимости масштабирования параметров пожара (5) – (9) получим:

$$u_{тест} = u_{пр}(K_{u тест} / K_{u пр}); \quad (12)$$

$$V_{тест} = V_{пр}(K_{V тест} / K_{V пр}); \quad (13)$$

$$M_{\text{тест}} = M_{\text{пр}} (K_{M_{\text{тест}}} / K_{M_{\text{пр}}}); \quad (14)$$

$$Q_{\text{тест}} = Q_{\text{кпр}} (K_{Q_{\text{тест}}} / K_{Q_{\text{пр}}}). \quad (15)$$

В соответствии с (10) $M \propto P$, следовательно:

$$P_{\text{тест}} = P_{\text{пр}} (K_{M_{\text{тест}}} / K_{M_{\text{пр}}}) \quad (16)$$

Пример 1. В соответствии с [13] при пожаре на закрытой автостоянке, оснащенной автоматической системой пожаротушения, принимается сценарий пожара, когда горит один автомобиль. В этом случае $Q_{\text{кпр}} = 3000$ кВт; $P_{\text{пр}} = 14$ м; $Y_{\text{пр}} = 2$ м.

В соответствии с (11) $M_{\text{пр}} = 7,81$ кг/с.

Уточненное значение $P_{\text{пр}} = 13,14$ м

Перепад температур в очаге проектного пожара составит:

$$\theta_{\text{пр}} = Q_{\text{кпр}} / (M_{\text{пр}} C_p) = 3000 / (7,81 * 1,01) = 380,5 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Приняв $T_0 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$, получим $T_{\text{пр}} = 668$ К

Допустим, что $\theta_{\text{тест}} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ принято по условиям проекта.

Используя зависимости (11) – (15) получаем параметры тестового пожара, полученные при масштабировании проектного пожара одного автомобиля:

$$M_{\text{тест}} = 6,5 \text{ кг/с}; Q_{\text{ктест}} = 525 \text{ кВт}; P_{\text{тест}} = 11,0 \text{ м}$$

На Рис.2 представлены результаты расчета значения $Q_{\text{ктест}}$ при различных высотах потолка и нижней границы дымового слоя.

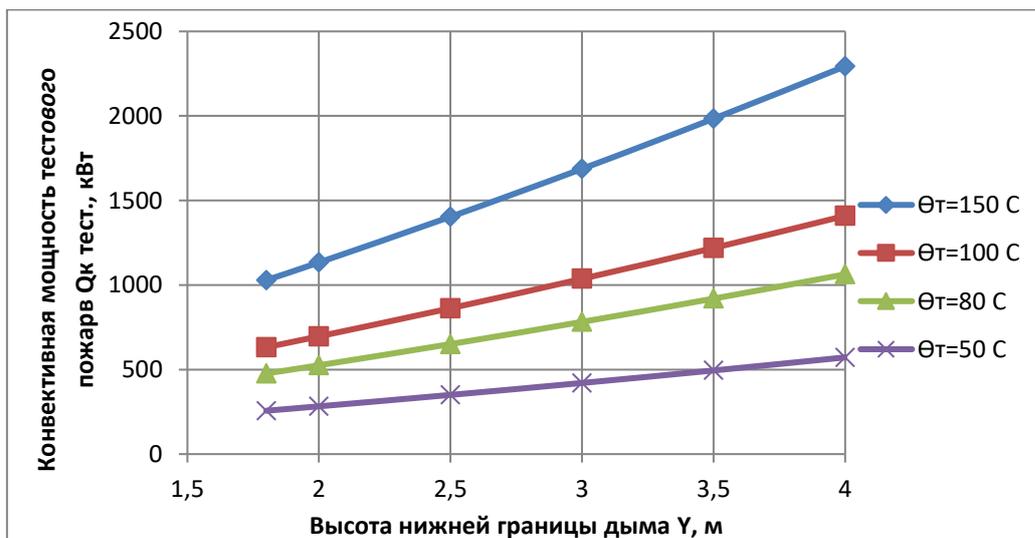


Рис. 2 График зависимости конвективной мощности тестового пожара $Q_{к\text{ тест}}$ от высоты нижней границы дыма, полученных при масштабировании пожара одного автомобиля $Q_{к\text{ пр}} = 3000$ кВт, $Y = 2$ м, при заданных значениях $\Theta_{\text{тест}}$.

Следующей задачей является масштабирование параметров противодымной вентиляции, соответствующее тестовому пожару. Целью масштабирования производительности приточно - вытяжной противодымной вентиляции является определение относительного снижения объемного расхода ($K_{V\text{ тест}} / K_{V\text{ пр}}$) в соответствии с (13).

На Рис. 3 представлены результаты расчета значения ($K_{V\text{ тест}} / K_{V\text{ пр}}$) при различных высотах потолка и нижней границы дымового слоя.

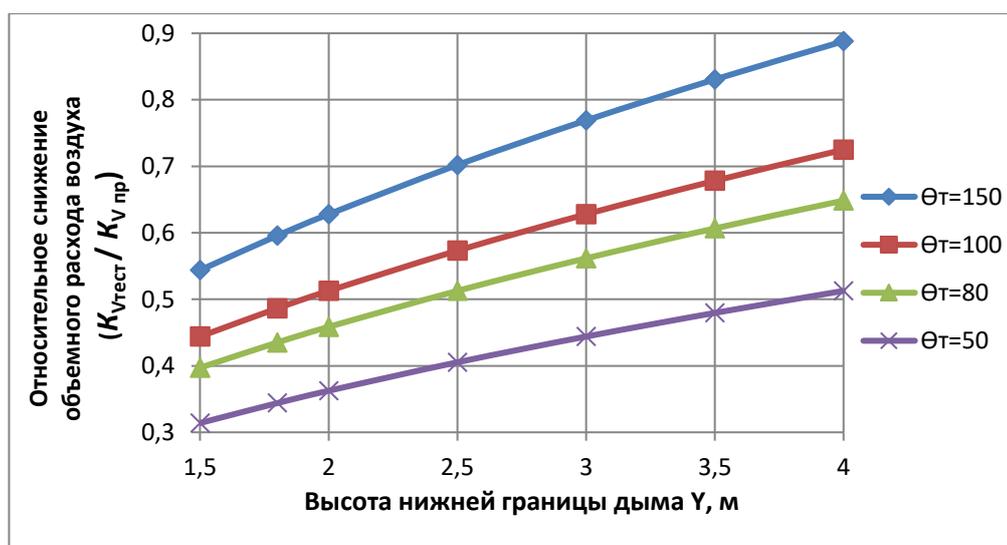


Рис. 3 График зависимости относительного снижения объемного расхода воздуха ($K_{V\text{ тест}} / K_{V\text{ пр}}$) тестового пожара от высоты нижней границы дыма при заданных значениях $\Theta_{\text{тест}}$, полученных при масштабировании пожара одного автомобиля $Q_{к\text{ пр}} = 3000$ кВт, $Y = 2$ м.

Из графика Рис. 3 видно, что производительность вентилятора дымоудаления при дымовых испытаниях должна уменьшаться в соответствии со шкалой, заданной уравнением (6). В этом случае глубина дымового слоя в ходе испытаний будет такой же как в проектных условиях.

Важной особенностью масштабирования проектного пожара является геометрическая конфигурация очага тестового пожара. В стандарте [2] предлагается использовать ряд поддонов для топлива с заданными геометрическими характеристиками, представленными в Таблице 1.

Таблица 1

Тип поддона	Глубина, м	Длина, м	Ширина, м	Площадь $S_{\text{стп}}$, м ²	Периметр $P_{\text{стп}}$, м	Отношение периметра к площади $P_{\text{стп}}/S_{\text{стп}}$, м ⁻¹
A1	0,13	0,841	0,595	0,5	2,872	5,744

A2	0,09	0,594	0,42	0,25	2,028	8,112
A3	0,065	0,42	0,297	0,125	1,434	11,472
A4	0,045	0,297	0,21	0,062	1,014	16,355
A5	0,035	0,21	0,149	0,031	0,718	23,161

Отношение периметра к площади поддона с тестовым топливом $P_{тп}/S_{тп}$ (далее относительный периметр) является характеристикой способности создать очаг тестового пожара, соответствующий результатам моделирования по $Q_{к\text{тест}}$ и $P_{\text{тест}}$, на базе выбранного типоразмера поддона.

Результаты расчета относительного периметра тестового пожара, полученного при моделировании пожара одного автомобиля представлены Рис. 4.

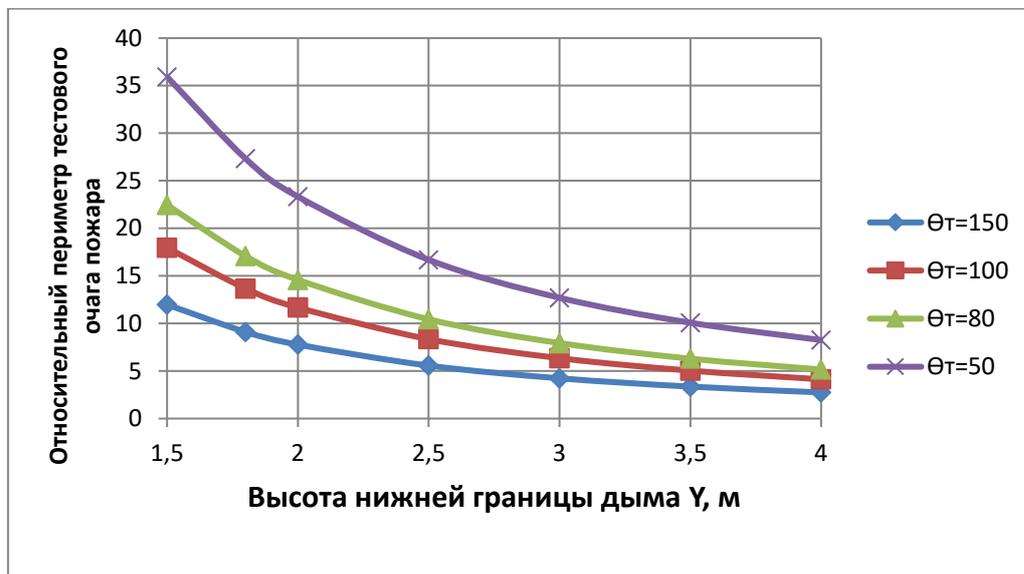


Рис. 4 График зависимости относительного периметра тестового пожара $P_{тп}/S_{тп}$ от высоты нижней границы, полученных при масштабировании пожара одного автомобиля $Q_{к\text{пр}} = 3000$ кВт, $Y = 2$ м, дыма при заданных значениях $\theta_{\text{тест}}$.

Моделирование очага горения при заданных значениях $\theta_{\text{тест}} = 80 - 150$ °С может осуществляться с помощью поддонов с топливом из Таблицы 1. Исключением является случай, когда высота нижней границы дыма меньше 2 м при $\theta_{\text{тест}}$ меньше 50 °С. Очевидно, что в этом случае надо использовать топливные лотки типоразмера меньше А5.

Первоначально определяется число условных эквивалентных квадратных топливных поддонов N_y . Предварительно примем значение удельной скорости горения спирта, отнесенной к единице поверхности жидкого топлива $q_{\text{т пов}} = 700$ кВт/м². Квадратный лоток имеет сторону d , тогда справедливо равенства:

$$Q_{\text{к\text{тест}}} = q_{\text{т пов}} d^2 N_y \quad (17)$$

$$P_{\text{тест}} = 4 d N_y \quad (18)$$

Из уравнения (17) получим:

$$d^2 = Q_{\text{ктест}} / (q_{\text{т пов}} N_y) \quad (19)$$

Подставляя значение N_y из (18):

$$d = 4Q_{\text{ктест}} / (q_{\text{т пов}} P_{\text{тест}}) \quad (20)$$

$$N_y = P_{\text{тест}} / 4d \quad (21)$$

Далее, исходя из площади квадратного лотка, уточняется значение $q_{\text{т пов}}$ с помощью графика, приведенного в [2] и представленного на Рис. 5.

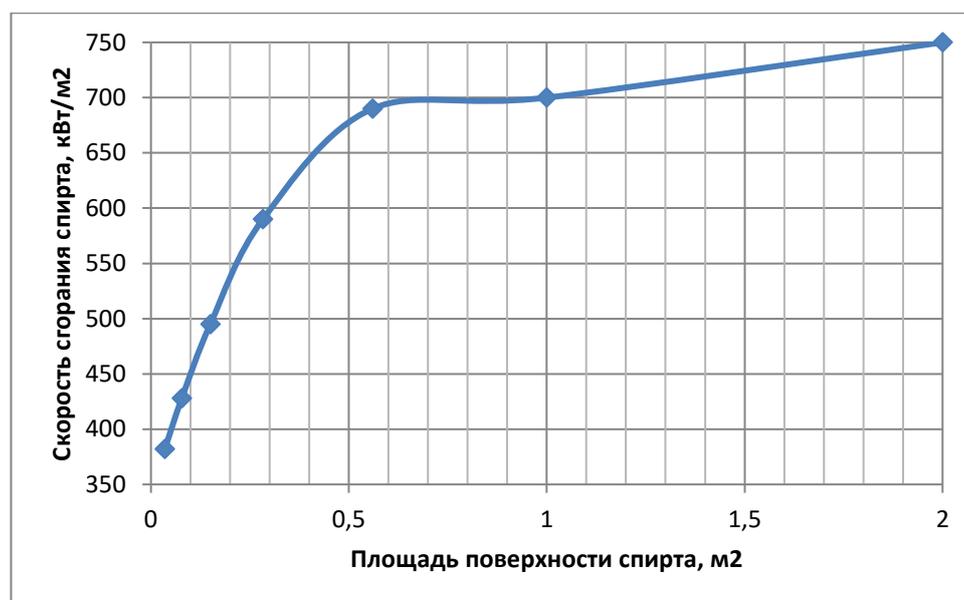


Рис. 5 Поверхностная скорость сгорания спирта.

Пример 2. Взяв исходные данные Примера 1 определим количество и тип лотка из Таблицы 1 для промышленного денатурированного 95% технического этилового спирта.

Из уравнений (20) и (21) получим размер стороны условного квадратного лотка $d = 0,274$ м и количество лотков $N_y = 10$. Площадь поверхности спирта в таком лотке составляет $0,075$ м².

В соответствии с графиком Рис. 5 значение $q_{\text{т пов}} = 430$ кВт/м².

Повторив вычисление получим $d = 0,446$ м и $N_y = 6$, поверхность спирта в лотке $0,199$ м². Дальнейшие итерации расчета практически не меняют результат.

Из Таблицы 1 выбираем 3 поддона типа А2 и 3 поддона типа А3.

Таким образом получаем после пересчета $Q_{\text{ктест}} = 0,25 \cdot 3 \cdot 560 + 3 \cdot 0,125 \cdot 400 = 570$ кВт; $P_{\text{тест}} = 10,4$ м. Отклонениями от расчетных параметров можно пренебречь в случае если они не превышают 10%. При больших отклонениях можно учесть отклонение от расчета при пересчете параметров вентиляции по (13) или выбрать поддоны другой конфигурации.

На Рис. 6 показано как поддоны с топливом устанавливаются на достаточном удалении друг от друга на площадке 2x5 м, соответствующей габаритам пожара одного автомобиля [13].

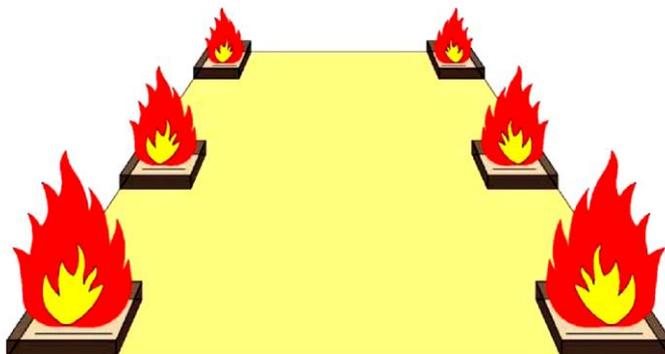


Рис. 6 Схема расположения стандартных топливных поддонов (Пример 2) при создании тестового пожара одного автомобиля на площадке 2x5 м.

Важной особенностью таких испытаний является использование искусственного дыма с целью визуализации воздушных потоков от тестового пожара и противодымной вентиляции. Более подробно об организации таких испытаний написано в работе [3].

На Рис. 7 показаны испытания горячим дымом, проводившиеся в Германии.



Рис. 7 Испытания горячим дымом в автостоянке с потолком высотой 5 м.

Другой пример аналогичные испытания на подземной автостоянке в Казани [14]. Испытания выполнены специалистами компании Flakt Group Россия. На Рис. 8 фрагмент таких испытаний в помещении с высотой потолка 3,2 м.



Рис. 8 Фрагмент испытаний горячим дымом при пусконаладочных испытаниях противодымной продольной вентиляции подземной автостоянки в Казани.

Продольный поток холодного воздуха удерживает нижнюю границу дыма на расчетной высоте $Y = 2$ м.

Следует отметить, что испытания горячим дымом в Казани выполнялись на основе стандарта [2] и опыта выполнения подобных испытаний в Европе. Отсутствие отечественного нормативного документа затрудняет применение испытаний горячим дымом при выполнении пусконаладочных работ систем противодымной вентиляции.

Выводы:

1. Предложена методика масштабирования параметров тестового пожара и противодымной вентиляции, позволяющая получить результаты испытаний релевантные к проектному пожару на объекте.
2. Приведены примеры расчета параметров и подбор оборудования для испытаний горячим дымом.
3. Обоснована необходимость разработки и внедрения отечественного нормативного документа на основе изучения и обобщения результатов и методик испытаний горячим дымом.

Литература:

1. A.J. McMunn, P. Knowles and H.P. Morgan, "Validated facts emerge from smoke ventilation tests", *Fire Engineer's Journal*, Vol. 51, No. 161, pp. 15-18 (1991).

2. AS 4391—1999 Australian Standard™ Smoke management systems— Hot smoke test. Reconfirmed 2016.
3. Свердлов А.В., Волков А.П. Почему проводят испытания горячим дымом при пусконаладочных работах системы струйной вентиляции и дымоудаления автостоянок // АВОК Вентиляция Отопление Кондиционирование. 2018. №3. С. 20 – 23.
4. Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Волков М.А., Барафанова Е.Ю. Моделирование процессов дымоудаления в подземных сооружениях транспортного назначения. //Вестник Международной академии холода 2019. №1. С. 3-10.
5. P.H. Thomas, P.L. Hinkley, C.R. Theobald and D.L. Simms, "Investigations into the flow of hot gases in roof venting", Fire Research Technical Paper No. 7, London, The Stationary Office (1963).
6. G. Heskestad, "Physical modeling of fire", Journal of Fire & Flammability, Vol. 6 (July), pp. 253-273 (1975).
7. J.G. Quintiere, "Scaling applications in fire research", Fire Safety Journal, Vol. 15, pp. 3-29 (1989).
8. U. Seifert and J. Stein, "Hot Smoke Tests in buildings: theory, application, results", EUSAS Workshop on smoke propagation and smoke control in buildings, 20-21 June 2002, Vienna, Austria (2002).
9. H.P Morgan and J-C De Smedt, "Hot smoke tests: testing the design performance of smoke and heat ventilation systems and of impulse systems", FireAsia 2003 - A Safe City in Motion, Hong Kong, 26-28 February (2003).
10. H.P. Morgan, B.K. Ghosh, G. Garrad, R. Pamlitschka, J-C De Smedt and L.R. Schoonbaert, Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation, BR 368, CRC, London (1999).
11. *Свердлов А.В., Волков А.П.* Анализ европейских и российских правил проектирования традиционных канальных систем противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа//АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. – 2017. № 6, С. 34 – 37.
12. Р НП «АВОК» 5.5.1 – 2015. Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий.
13. СП 300.1325800.2017 «Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования»
14. Свердлов А.В., Волков А.П. Система реверсивной струйной вентиляции четырехэтажной подземной автостоянки в Казани// Инженерные системы 2018. № 4. С. 20–22.