

# ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ ПРИ МАСШТАБИРОВАНИИ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА С ЦЕЛЬЮ ЕГО ИМИТАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ АВТОСТОЯНКИ

*А. М. Гримитлин, д. т. н., профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
СПбГАСУ*

*А. П. Волков, к. т. н., представитель АС «СЗ Центр АВОК»*

*А. В. Свердлов, к. т. н., представитель компании FlaktGroup в России*

В замкнутом помещении подземной или закрытой автостоянки качество воздуха [1] является важнейшим фактором комфорта и безопасности. Значительные риски для человека возникают при задымлении помещения автостоянки при возникновении пожара [2]. В работе [5] показано, что по сравнению с европейскими нормами проектирования в российских стандартах допускается более низкая производительность противодымной вентиляции. Следовательно, возникают дополнительные риски, обусловленные неэффективной работой противодымной вентиляции.

В мировой практике экспериментальная проверка проектных характеристик противодымной вентиляции и всего комплекса противопожарной защиты помещений автостоянки осуществляется с использованием тестового очага горения и искусственного дыма, визуализирующего потоки дымовых газов [17]. В России данный метод испытаний официально практически не применяется по причинам нормативного характера. Теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении являются, несомненно, актуальной задачей.

50 лет назад имитация пожара на автостоянке осуществлялась при помощи калориферов и тепловых пушек. Впервые для создания реального имитационного очага горения применили строительный мусор [8]. Наиболее практичным для создания тестового очага горения оказался метиловый 95%-ный денатурированный спирт. В продуктах сгорания спирта практически отсутствует сажа, что исключает загрязнение потолка и стен, они относительно низкотоксичны. Искусственный дым (индикаторный газ), используемый в соответствии с ГОСТ [9], позволяет визуализировать конвективный поток продуктов горения и дымовой слой.

Исследования горения спирта в термостатируемых с помощью водяной ванны поддонах позволили разработать стандарт [10]. В ходе испытаний с горячим дымом создается восходящий конвективный поток горячего воздуха от тестового очага горения, в

него вводится индикаторный газ, позволяющий проиллюстрировать взаимодействие горячего восходящего конвективного потока дыма с вентиляционным холодным воздушным потоком в исследуемом пространстве. При испытаниях горячим дымом система противопожарной защиты должна работать штатно в автоматическом режиме. В стандарте [10] основной целью испытаний с использованием горячего дыма является проверка алгоритма включения и работы противодымной вентиляции автостоянки, однако в документе нет четких критериев соответствия тестового пожара реальному или проектному сценарию пожара, что не позволяет экспериментально определить границы распространения дыма в поперечном (по высоте помещения) и продольном направлениях.

При испытании поперечной канальной противодымной вентиляции при помощи горячего дыма следует подтвердить стабилизацию нижней границы дымового слоя, как это показано на рис. 1



*Рис. 1. Дымовой слой в подпотолочном пространстве*

При испытаниях продольной струйной противодымной вентиляции следует подтвердить:

- возможность удержания нижней границы дыма в первые 8...10 минут после обнаружения пожара за счет продольного вентиляционного потока при выключенных струйных вентиляторах;

- возможность удержания распространения дыма в продольном направлении при работе струйных вентиляторов после их включения, как это показано на рис. 2.



*Рис. 2. Влияние работы струйных вентиляторов на распространение искусственного дыма в продольном направлении*

Испытания осуществляют при безопасной конвективной мощности тестового очага горения  $Q_{кт}$ , меньшей мощности проектного пожара  $Q_{кп}$ .

Изучение восходящих конвективных потоков горячих продуктов горения было выполнено на базе маломасштабных физических моделей [11—15] с использованием числа Фруда ( $Fr$ ).

Данные модели были использованы при подготовке пусконаладочных испытаний первой в России системы реверсивной струйной вентиляции многоуровневой подземной автостоянки в Казани, где также были проведены испытания с применением горячего дыма [16—18] и использовалось моделирование на основе числа  $Fr$  [19, 20].

Проектными параметрами, описывающими пожар автомобиля на автостоянке, являются проектная мощность пожара  $Q_{оп}$  (кВт) и проектный периметр очага горения  $P_{п}$  (м). Наиболее распространенный сценарий пожара — это пожар одного автомобиля:  $Q_{оп} = 4500...5000$  кВт;  $P_{п} = 14$  м (при наличии автоматической системы пожаротушения).

Тестовый очаг горения допускается в помещениях автостоянки, имеющих степень огнестойкости не ниже установленной для автостоянок в СП 2.13130.2020 [22] и внутренний объем не менее  $250 \text{ м}^3$ . Максимальная мощность тестового очага горения определяется по допустимой температуре продуктов горения, безопасной для потолочных перекрытий и ограждающих конструкций. Поэтому при выборе параметров тестового

пожара наиболее целесообразно выбрать шкалу масштабирования на основе параметра  $\Theta$  (К): разности между температурой наружного, приточного воздуха  $T_0$  (К) и температурой горячих продуктов горения, приведенной к нижней границе дымового слоя,  $T_r$  (К).

На рис. 3 представлена схема очага горения в закрытом помещении.

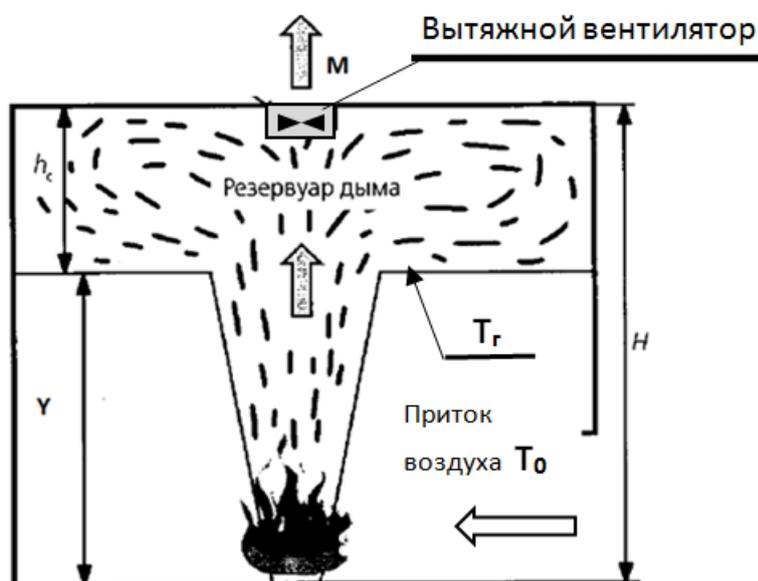


Рис. 3. Схема горения в замкнутом помещении:  $H$  — высота потолочного перекрытия;  $Y$  — высота нижней границы дыма;  $h_c$  — толщина дымового слоя (резервуара дыма);  $M$  — массовый расход, удаляемых продуктов горения

Массовый расход продуктов горения для проектного пожара рассчитывается по формуле (1) [11]:

$$M_n = C_e P_{пр} (Y_{пр})^{1,5}, \quad (1)$$

где  $C_e$  — коэффициент захватывания, равный для больших помещений с низким потолком (например, подземная автостоянка) 0,21.

Далее определяем разность температур  $\Theta_n$  проектного пожара:

$$\Theta_n = Q_{пк} / (M_n C_p), \quad (2)$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость продуктов горения, кДж/(кг·К); принимается равной 1,01 кДж/(кг·К);  $Q_{пк}$  — конвективная мощность проектного пожара, принимаемая равной 0,6  $Q_{оп}$  [3], или 3000 кВт при пожаре одного автомобиля.

Давления, вызывающее восходящий поток дымовых газов от очага горения до нижней границы дыма на высоте  $Y$  (м) от пола, можно записать в виде уравнения:

$$\Delta p = \Delta \rho g Y = \rho_0 \frac{\theta}{T_2} g Y. \quad (3)$$

Для восходящего конвективного турбулентного потока продуктов горения может быть использовано уравнение Вейсбаха:

$$\Delta p = \zeta \frac{u^2}{2} \rho, \quad (4)$$

где  $u$  (м/с) — скорость восходящего потока продуктов горения.

Из (4) следует соотношение (5):

$$\Delta p \propto u^2 \rho. \quad (5)$$

Масштабирование параметров проектного пожара позволяет определить параметры тестового очага горения, релевантные проектному сценарию пожара. Таким образом, испытания на пониженных безопасных параметрах тестового очага горения покажут результат работы противодымной вентиляции при проектном сценарии пожара.

Соотношения масштабирования, полученные в работе [11], представлены соотношениями (6)...(9).

Скорость восходящего потока  $u$  определяется по зависимости:

$$u \propto \theta^{0,5} = K_u, \quad (6)$$

а объемный расход с восходящим потоком  $V$  равен:

$$V \propto \theta^{0,5} = K_V. \quad (7)$$

Массовый расход  $M$  и конвективный тепловой поток  $Q_k$  определяются по зависимостям (7) и (8), соответственно:

$$M \propto \frac{\theta^{0,5}}{T_2} = K_M \quad (8)$$

$$Q_k \propto \frac{\theta^{1,5}}{T_2} = K_Q. \quad (9)$$

Параметры тестового очага горения — с индексом («т»), известные параметры проектного пожара — с индексом («п»).

Для выбора параметров тестового очага горения следует определить ряд параметров:

- по условиям проекта принять допустимое значение перепада температур в очаге тестового очага горения  $\theta_t$ , исключающее повреждение помещений и оборудования;
- используя (6)...(9), рассчитать коэффициенты масштабирования для проектного и тестового очага горения;
- по формулам (10)...(13) рассчитать параметры тестового очага горения:

$$u_m = u_n \frac{K_{u.m.}}{K_{u.n.}}, \quad (10)$$

$$V_m = V_n \frac{K_{V.m.}}{K_{V.n.}}, \quad (11)$$

$$M_m = M_n \frac{K_{M.m.}}{K_{M.n.}}, \quad (12)$$

$$Q_{\kappa.m} = Q_{\kappa.n} \frac{K_{Q.m.}}{K_{Q.n.}}. \quad (13)$$

В соответствии с (1):  $M \propto P$ , следовательно, для периметра тестового очага горения справедливо выражение:

$$P_m = P_n \frac{K_{M.m.}}{K_{M.n.}}. \quad (14)$$

В настоящее время подавляющее большинство подземных многоярусных автостоянок, проектируемых и строящихся в России, оснащены автоматической спринклерной системой пожаротушения и имеют высоту потолков в пределах 2,5–3,5 м. Испытания с использованием горячего дыма системы противодымной вентиляции автостоянки могут осуществляться в двух режимах, а именно:

- проверка алгоритма включения и работы противодымной вентиляции автостоянки, не предусматривающая масштабирования параметров проектного пожара;
- проверка границ распространения дыма при пожаре, предусматривающая масштабирование параметров проектного пожара.

При проверке алгоритма работы противодымной вентиляции в соответствии с требованиями [4] мощность тестового пожара должна быть не менее 300 кВт для автостоянок, оборудованных автоматическими установками пожаротушения и не менее 450 кВт для автостоянок без автоматической системы пожаротушения. Для автостоянок с высотой потолка более 3,2 м рекомендуется увеличить мощность тестового очага горения до 1...1,5 МВт, чтобы достичь более высокую температуру дымового слоя, растекающегося под потолком.

На рис. 4 представлены возможные варианты расположения стандартных топливных поддонов типа А1 (см. табл. 1).

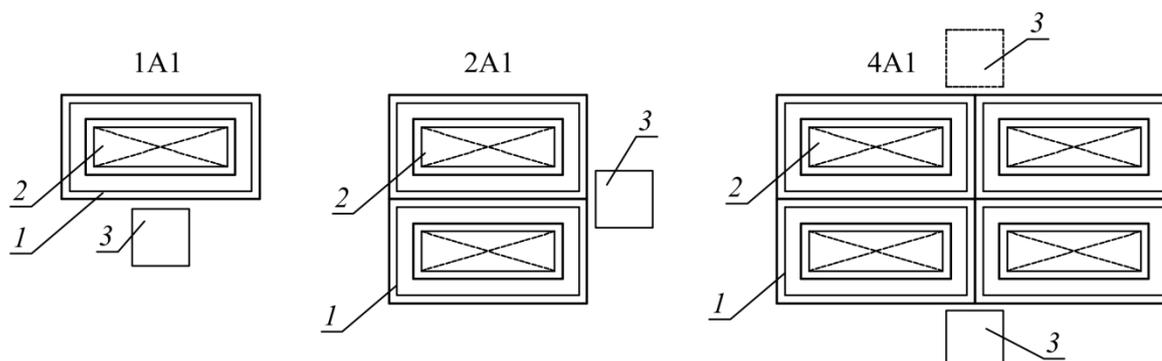


Рис. 4. Возможное расположение стандартных топливных поддонов типа А1, установленных в водяные термостаты (ванны, заполненные водой с температурой 15...25 °С): 1 — водяная ванна; 2 — топливный поддон; 3 — дымогенератор

При проверке границ распространения дыма при пожаре параметры тестового очага горения рассчитываются исходя из правил масштабирования (10)...(14).

На рис. 5...7 представлены результаты расчета параметров тестового очага горения, моделирующего пожар одного автомобиля для следующих исходных данных:  $Q_{кп} = 3000$  кВт;  $P_{п} = 14$  м;  $\Theta_{п}$  рассчитано по формулам (1) и (2).

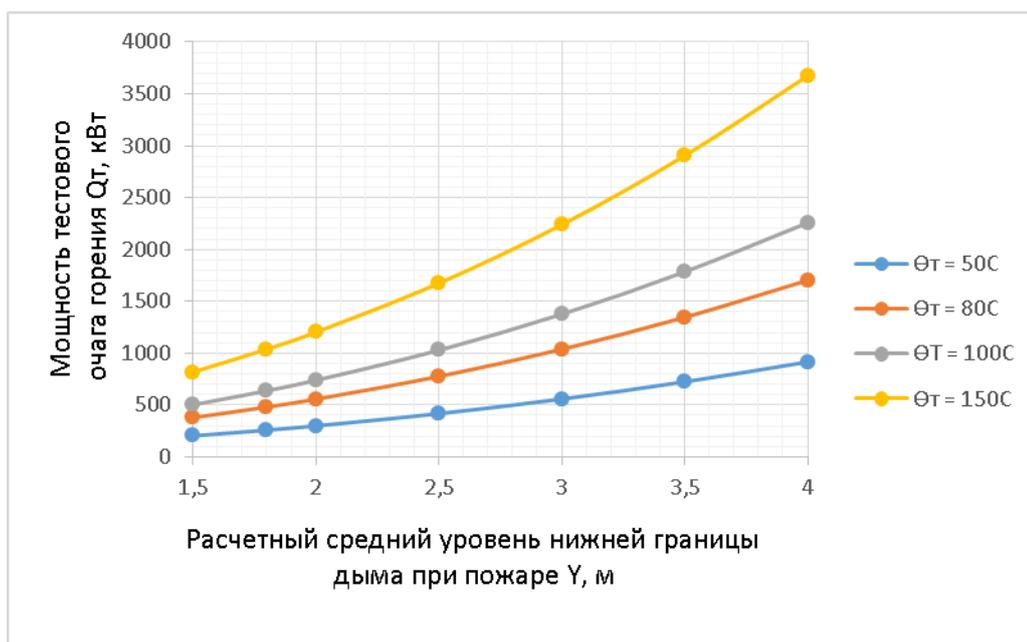


Рис. 5. График зависимости конвективной мощности тестового пожара  $Q_{кт}$  от расчетного среднего уровня нижней границы дыма при пожаре  $Y$ , при различных значениях разности температур  $\Theta_m$

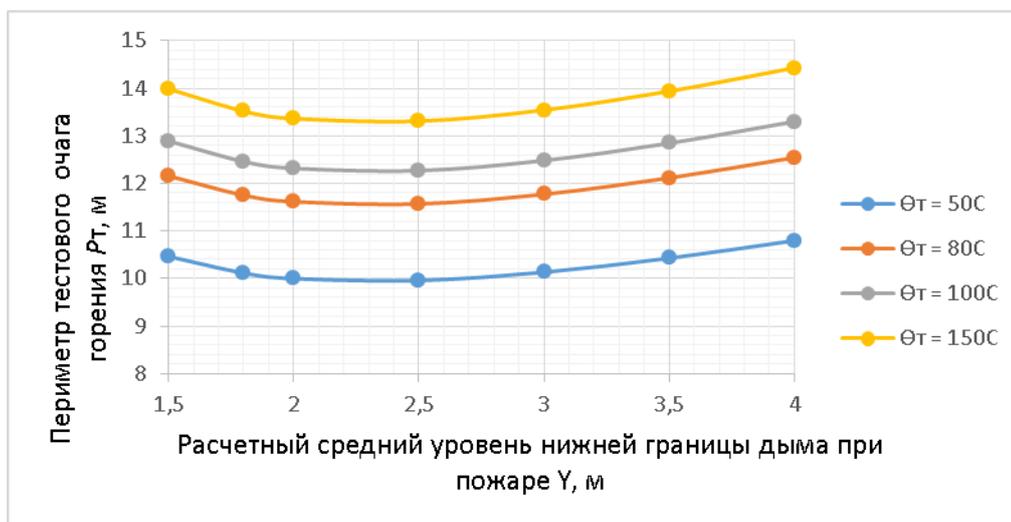


Рис. 6. График зависимости периметра тестового очага горения  $P_T$  от расчетного среднего уровня нижней границы дыма при пожаре  $Y$ , при различных значениях разности температур  $\Theta_T$

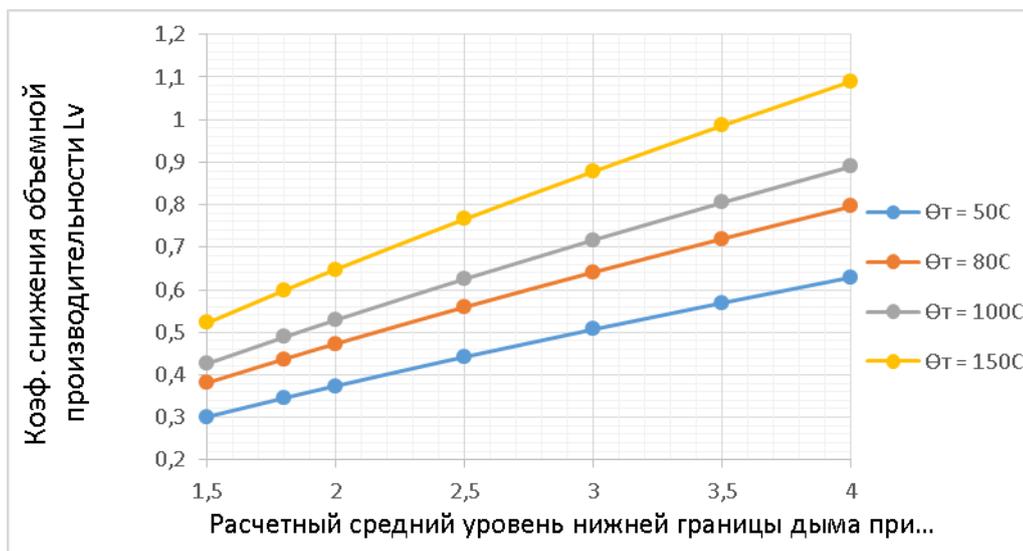


Рис. 7. График зависимости коэффициента снижения объемной производительности противодымной вентиляции  $L_V = K_{V_m} / K_{V_n}$  от расчетного среднего уровня нижней границы дыма при пожаре  $Y$ , при различных значениях разности температур  $\Theta_m$

Регулирование объемной производительности противодымной вентиляции возможно с помощью регулятора частоты вращения электродвигателя вентилятора дымоудаления и электродвигателей струйных вентиляторов при продольной системе вентиляции. Допускается применение шайб для снижения расхода воздуха.

При формировании очага тестового пожара возникает проблема с конструктивным обеспечением расчетных характеристик тестового пожара, а именно обеспечение сочетания параметров  $Q_{кт}$  и  $P_T$ . В этом случае целесообразно использовать набор стандартных емкостей для топлива (топливных поддонов), характеристики которых соответствуют стандарту [10] и представлены в табл. 1.

Таблица 1.

### Конструктивные характеристики топливных поддонов

Тип топливного поддона	Объем 95% спирта в топливном поддоне, л	Удельная скорость горения, кВт/м <sup>2</sup>	Мощность тестового очага горения на стенде $Q_{тс}$ , кВт	Периметр топливного поддона $P_c$ , м	Приведенная мощность тестового очага горения на стенде $Q_{рс} = Q_{тс} / P_c$ , кВт/м
4 × А1	16,0 × 4	751	1500	5,744	261,1
2 × А1	15,0 × 2	696	700	4,062	172,3
А1	13	678	340	2,872	118,4
А2	5,5	566	140	2,028	69,0
А3	2,5	471	60	1,434	41,8
А4	1	412	26	1,014	25,6
А5	0,4	379	11	0,718	15,3

Для выбора количества и типа топливных поддонов удобно использовать приведенную мощность тестового очага горения  $Q_{рТ}$  (кВт/м), рассчитанную по формуле (16):

$$Q_{рТ} = Q_{кт} / P_{т}. \quad (16)$$

Расчетные значения  $Q_{рТ}$  при пожара одного автомобиля представлены на рис. 8.

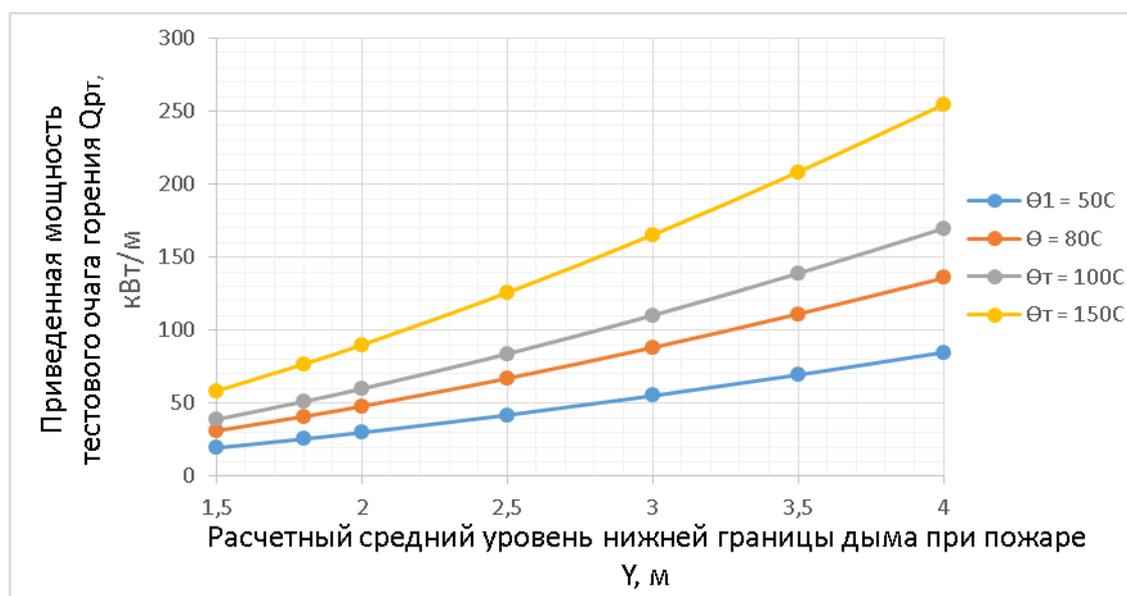


Рис. 8. График зависимости приведенной мощности тестового пожара от расчетного среднего уровня нижней границы дыма при пожаре  $Y_0$  при различных значениях разности температур  $\Theta_m$

Тестовый очаг горения моделируется из стандартных топливных поддонов табл. 1.

Тип топливного поддона выбирается исходя из условия (17):

$$Q_{PT} \approx Q_{PC}. \quad (17)$$

Количество выбранных топливных поддонов  $N_T$  вычисляется по (18):

$$N_T = Q_{KT} / Q_{TC}. \quad (18)$$

Значение  $N_T$  округляется до целого значения.

### Пример расчета параметров тестового очага горения

На подземной автостоянке, оснащенной автоматической системой пожаротушения, принимается сценарий пожара одного автомобиля:  $Q_{кп} = 3000$  кВт;  $P_{п} = 14$  м;  $Y_{п} = 2,5$  м;  $\Theta_T = 80$  К — по условиям проекта.

Начальные параметры проектного пожара соответствуют условиям построения графиков, представленным на рис. 4–6. В этом случае можно определить:  $Q_{KT} = 780$  кВт;  $P_T = 11,6$  м;  $Q_{PT} = 67$  кВт/м.

По данным табл. 1 по значению  $Q_{PT}$  выбирается топливный поддон типа А2, основные рабочие параметры которого составляют:  $Q_{PC} = 69$  кВт/м;  $Q_{TC} = 140$  кВт;  $P_{TC} = 2,028$  м.

По формуле (18) определяем количество поддонов типа А2 и после округления получаем:  $N_T = 6$  шт.

Проверочный расчет значения  $\Theta_T$  по параметрам топливного поддона выполняется по формулам (1) и (2). Значение  $\Theta_T = 82,4$  К, что свидетельствует о правильном выборе типа и количества топливных поддонов. Поддоны устанавливаются в пределах площадки проектного пожара одного автомобиля, как показано на рис. 9. Между поддонами необходимо предусмотреть зазор.

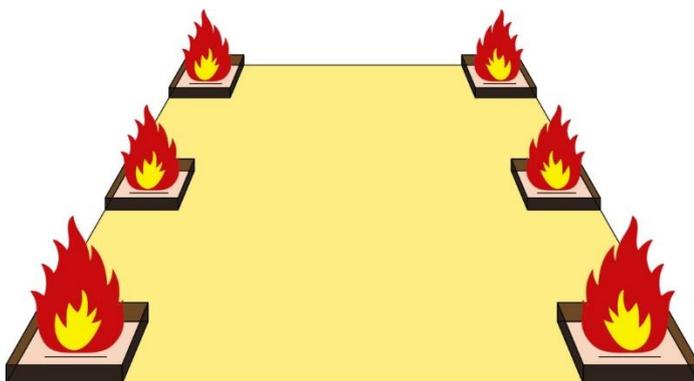


Рис. 9. Схема расположения шести стандартных топливных поддонов типа А2 на площадке парковочного места 2 x 5 м

### Выводы

1. Показана актуальность исследований технологии испытаний противодымной вентиляции автостоянок с использованием горячего дыма для экспериментальной проверки возможности безопасной эвакуации людей при возникновении пожара.
2. Выполнен анализ развития технологии испытаний противодымной вентиляции автостоянок с использованием горячего дыма.
3. На основе теории подобия предложена методика масштабирования параметров тестового пожара и противодымной вентиляции, позволяющая получить результаты испытаний, релевантные к параметрам проектного пожара на объекте.
4. Предложена практическая методика расчета параметров тестового очага горения и противодымной вентиляции при дымовых испытаниях наиболее распространенного типа подземных автостоянок (при пожаре одного автомобиля).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А. П. Экология и расчет воздухообмена подземных автостоянок / А. П. Волков, А. В. Свердлов, С. В. Рыков // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. — 2014, № 3. С. 9–16.
2. Вишневский Е. П. Противодымная защита крытых и подземных автопарковок, оборудованных струйной (импульсной) вентиляцией / Е. П. Вишневский, А. В. Свердлов, С. В. Рыков // Мир строительства и недвижимости. — 2012, № 44. С. 54–56.
3. Р НП «АВОК» 5.5.1-2015. Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий. — М.: АВОК, 2015.
4. Vengzhinsky W. Systemy wentylacji pożarowej garaże. Projektowanie, ocena, akceptacja / W. Vengzhinsky, G. Krajewski. — Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2015. — ISBN 987-83-249-6792-6 — URL: <http://www.flaktwoods.ru/about-us/media/news/systemy-protivopozharnoj-ventilyatsii-garazhej> (дата обращения 08.12.2021).
5. Свердлов А. В. Анализ европейских и российских правил проектирования традиционных канальных систем противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа / А. В. Свердлов, А. П. Волков // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. — 2017, № 6. С. 34–37.
6. Keogh J.J., Moulen A.W. Smoke control tests in a multi-level shopping mall and associated stores, Experimental Building Station (Australia) Record 495 (1983).
7. Seifert U., Stein J., Koerner H-J. Hot smoke tests in buildings // Proceedings of Eurofire 99, 24–27 November (1999).
8. McMunn A.J., Knowles P., Morgan H.P. Validated facts emerge from smoke ventilation tests // Fire Engineer's Journal, 1991, Vol. 51, No. 161. — Pp. 15–18.
9. ГОСТ Р ИСО 14644-3-2007. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3. Методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2008. — 55 с.
10. AS 4391–1999 Australian Standard™ Smoke management systems. Hot smoke test. Reconfirmed. 2016.
11. Morgan H.P., De Smedt J-C. 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.

12. Thomas P.H., Hinkley P.L., Theobald C.R., Simms D.L. Investigations into the flow of hot gases in roof venting // Fire Research Technical Paper, No. 7, London, The Stationary Office, 1963.
13. Heskestad G. Physical modeling of fire // Journal of Fire & Flammability. — Vol. 6 (July), 1975. — Pp. 253–273.
14. Quintiere J.G. Scaling applications in fire research // Fire Safety Journal, Vol. 15, 1989. — Pp. 3–29.
15. Seifert U., Stein J. Hot Smoke Tests in buildings: theory, application, results // EUSAS Workshop on smoke propagation and smoke control in buildings, 20–21 June 2002, Vienna, Austria.
16. Свердлов А. В. Моделирование процессов дымоудаления в подземных сооружениях транспортного назначения / А.В. Свердлов, А. П. Волков, С. В. Рыков, М. А. Волков // Вестник Международной академии холода. — 2019, № 1. С. 3–10.
17. Свердлов, А. В. Почему проводят испытания горячим дымом при пусконаладочных работах системы струйной вентиляции и дымоудаления автостоянок / А. В. Свердлов, А. П. Волков // АВОК Вентиляция Отопление Кондиционирование. 2018, № 3. С. 20–23.
18. Свердлов А. В. Система реверсивной струйной вентиляции четырехэтажной подземной автостоянки в Казани / А. В. Свердлов, А. П. Волков // Инженерные системы 2018, № 4. С. 20–22.
19. Волков А. П. Реверс воздушного потока при продольной вентиляции и дымоудалении подземных и крытых автостоянок / А. П. Волков, А. В. Свердлов // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. — 2015. № 1. С. 34–38.
20. Свердлов АВ. Проектирование систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа с использованием математических моделей процессов тепло и массообмена на основе числа Фруда / А. П. Волков, С. В. Рыков, Э. А. Гордеева, М. А. Волков М. А. // Научный журнал НИУ ИТМО Серия: Холодильная техника и кондиционирование. — 2018, № 1. С. 47–56.
21. СП 300.1325800.2017 Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования. — М.: Стандартинформ, 2017. — 63 с.
22. СП 2.13130.2020 Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. — М.: МЧС, 2020. — 45 с.

