

ПРОДОЛЬНАЯ ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ ЗАКРЫТЫХ АВТОСТОЯНОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

А. М. Гримитлин, профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» СПбГАСУ

А. В. Свердлов, член президиума НП «АВОК»

А. П. Волков, представитель АС «СЗ Центр АВОК»

Увеличение парка электромобилей стало постоянной, устойчивой тенденцией во всем мире. Автостоянки сталкиваются с новыми рисками, обусловленными хранением и зарядкой электромобилей. При зарядке литийионных батарей возможно их возгорание, что является важным фактором при выборе проектных решений по автостоянке, создает проблемы для служб, ответственных за безопасную эксплуатацию автостоянки. С новыми рисками и проблемами столкнулись службы МЧС, обеспечивающие тушение таких пожаров.

Тушение собственно литийионных аккумуляторов запрещено производить с помощью воды и обычных пенных огнетушителей. Следует использовать порошковые системы пожаротушения на основе графита, нитрида бора, карборунда и обычной поваренной соли. В настоящее время автостоянки не оснащены такими системами.

После, казалось бы, полной ликвидации пожара электромобиля чрез час или сутки может произойти новое возгорание литийионных аккумуляторов, что требует изоляции и наблюдения за потушенным электромобилем.

Важной практической рекомендацией пожарных служб является охлаждение горящего электромобиля с помощью большого объема воды в процессе полного выгорания литийионных аккумуляторов [1]. Поэтому продолжительность пожара электромобиля точно не определено.

В настоящее время разработаны новые методы и оборудование для тушения электромобилей именно таким способом, предусматривающие использование специального оборудования и большого количества охлаждающей воды [2]. Может применяться специальный контейнер, оснащенный системой водяных форсунок. В случае

пожара или после него электромобиль помещается в такой контейнер для обеспечения безопасного водяного охлаждения аккумуляторного отсека.

Под горящим электромобилем может быть размещена система водяных форсунок высокого давления, охлаждающая днище электромобиля, где находится литийионная батарея. Такая система позволяет в разы снизить расход охлаждающей воды.

Особую проблему представляют токсичные продукты сгорания. В ходе исследования [3] было выявлено, что при горении литийионного аккумулятора выделяется большое количество токсичных фтористых газов, а именно:

- фтористый водород HF в количестве от 20 до 200 мг/Втч номинальной емкости аккумулятора;

- фосфорилфторид POF₃ в количестве от 15 до 22 мг/Втч номинальной емкости аккумулятора.

В частности, фтористый водород HF даже при небольших концентрациях вызывает ожог дыхательных путей человека и может быть смертельно опасен при больших концентрациях.

В ряде исследований токсичность продуктов горения литийионного аккумулятора считается фактором пожара более опасным, чем тепловыделение от очага пожара.

До недавнего времени проектная мощность пожара электромобиля имела заниженные значения на уровне 3–4 МВт, что вызывало обоснованные сомнения. В последней редакции отечественного стандарта [4] следовало принимать данный параметр по результатам экспериментальных исследований. В настоящее время при проектировании автостоянок мощность пожара электромобиля принимается равной 10 МВт, что в два раза больше, чем при пожаре легкового автомобиля с бензиновым двигателем внутреннего сгорания.

В соответствии с [4] конвективный тепловой поток Q_k составляет около 0,6 от суммарной мощности пожара автомобиля Q_0 . Таким образом, для обычного автомобиля $Q_k = 3000$ кВт, а для электромобиля $Q_k = 6000$ кВт.

На основании закономерностей, представленных в [5], рассчитаем температуру продуктов горения на нижней границе дымового слоя.

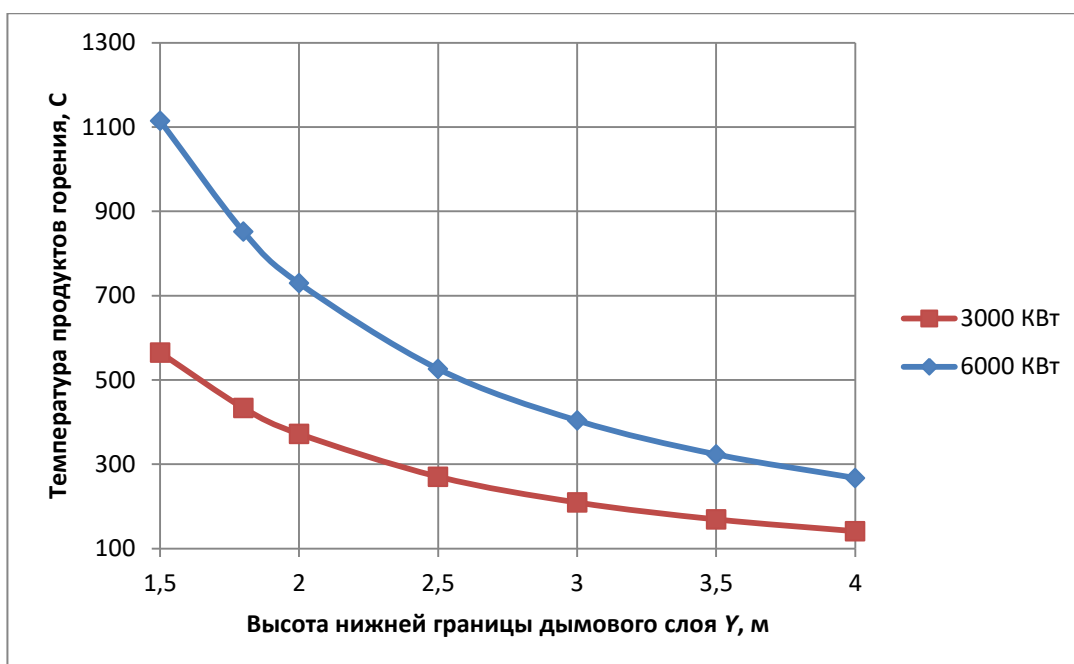


Рис. 1. График зависимости температуры продуктов горения t_{ng} от высоты нижней границы дымового слоя Y при пожаре автомобиля с двигателем внутреннего сгорания и электромобиля

Время для эвакуации людей составляет от 8 до 12 минут после обнаружения пожара. В период эвакуации людей холодный приточный воздух, подаваемый в нижнюю часть помещения, должен удерживать горячие продукты горения в подпотолочном пространстве, как это показано в работах [4, 6]. Струйные вентиляторы в этот период отключены.

Рис. 1 свидетельствует о возросших рисках, связанных с ростом температуры продуктов горения электромобиля. Так, при высоте потолочного перекрытия 3 м ($Y = 2,5$ м) пожар электромобиля создает температуру продуктов горения более 500 °С, почти на 240 °С больше, чем у обычного автомобиля. При нагреве литийионного аккумулятора до температуры 400 °С вероятность его возгорания очень высока, что создает дополнительные риски распространения пожара как на рядом стоящие электромобили, так и на машины выше этажом.

Перегрев ограждающих конструкций и особенно потолочного перекрытия требует их охлаждения. Для этого следует использовать настилающиеся на потолочные перекрытия воздушные потоки от струйных вентиляторов [7, 8].

Таким образом, при проектировании противодымной вентиляции автостоянки необходимо обеспечить:

- эффективное удаление теплоизбытков при средней мощности пожара электромобиля около 10 МВт и охлаждение потолочных перекрытий над очагом пожара;
- максимально возможное ограничение распространения и удаление из помещения автостоянки токсичных продуктов горения литийионных аккумуляторов;
- для эффективного обеспечения выше сказанного противодымная вентиляция должна обеспечивать регулирование воздушных потоков холодного приточного воздуха, исходя из местоположения очага пожара.

Перегрев потолочных перекрытий до температур от 400 до 700 °С затрудняет использование воздуховодов. Кроме того, большой расход воздуха по притоку и вытяжке создает дополнительные трудности с размещением крупногабаритных воздуховодов при высоте потолка менее 2,9 м [6].

В помещении автостоянки, имеющей низкий потолок и большую площадь, наиболее целесообразно использовать продольные струйные системы противодымной вентиляции [8, 9].

На рис. 2 представлена схема работы продольной струйной противодымной вентиляции при тушении пожара электромобиля в режиме контроля распространения дыма и тепла, описанном в работе [6].

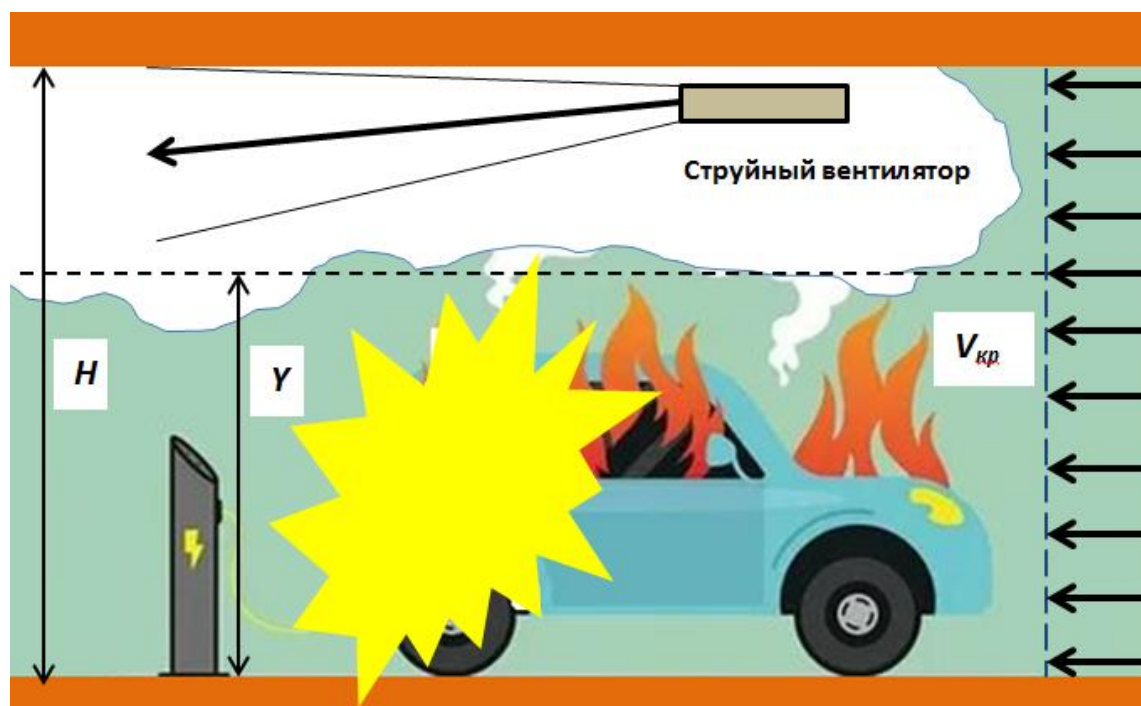


Рис. 2. Схема воздухораспределения продольной струйной вентиляцией при возникновении пожара литийионных аккумуляторов электромобиля

В работе [6] рассмотрена продольная противодымная вентиляция автостоянки в режиме контроля распространения дыма и тепла. В этом случае ограничено распространение дымовых газов в направлении притока при условии, что скорость воздушного потока от потолка до пола в направлении очага горения не меньше критического значения $V_{кр}$, как это показано на рис. 2. Допускается затекание подпотолочной струи дымовых газов в сторону притока на расстояние не более 10 м.

На основании [8] $V_{кр}$ рассчитывается по формуле (1):

$$V_{1кр} = \sqrt[3]{-\frac{M}{2} + Z} + \sqrt[3]{-\frac{M}{2} - Z - \frac{D}{3}}, \quad (1)$$

где

$$D = \frac{Q_K}{T_0 \rho_B C_p B H}; \quad A = \frac{9,8H}{Fr}; \quad L = -\frac{D^2}{3}; \quad M = D \left(\frac{2D^2}{27} - A \right);$$

$$Z = \sqrt[2]{\frac{M^2}{4} + \frac{L^3}{27}}.$$

$T_0(K)$, $\rho_B(kg/m^3)$, $C_p(kJ/kgK)$ — соответственно, температура, плотность и удельная теплоемкость приточного наружного воздуха;

B — ширина воздушного потока приточного воздуха в месте локализации очага горения, м;

H — высота потолка (см. рис. 2), м;

Fr — число Фруда, равное 4,5.

$$T_{nz} = T_0 \left(1 + \frac{D}{V_{кр}} \right). \quad (2)$$

Производительность вентилятора дымоудаления V_{ex} , обеспечивающая режим контроля распространения дыма и тепла, должна быть не меньше значения, рассчитанного по формуле:

$$V_{ex} = 3600 V_{кр} B H \frac{T_{nz}}{T_0}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета значений V_{ex} при различных габаритах автостоянки электромобилей при работе противодымной вентиляции в режиме контроля распространения дыма и тепла.

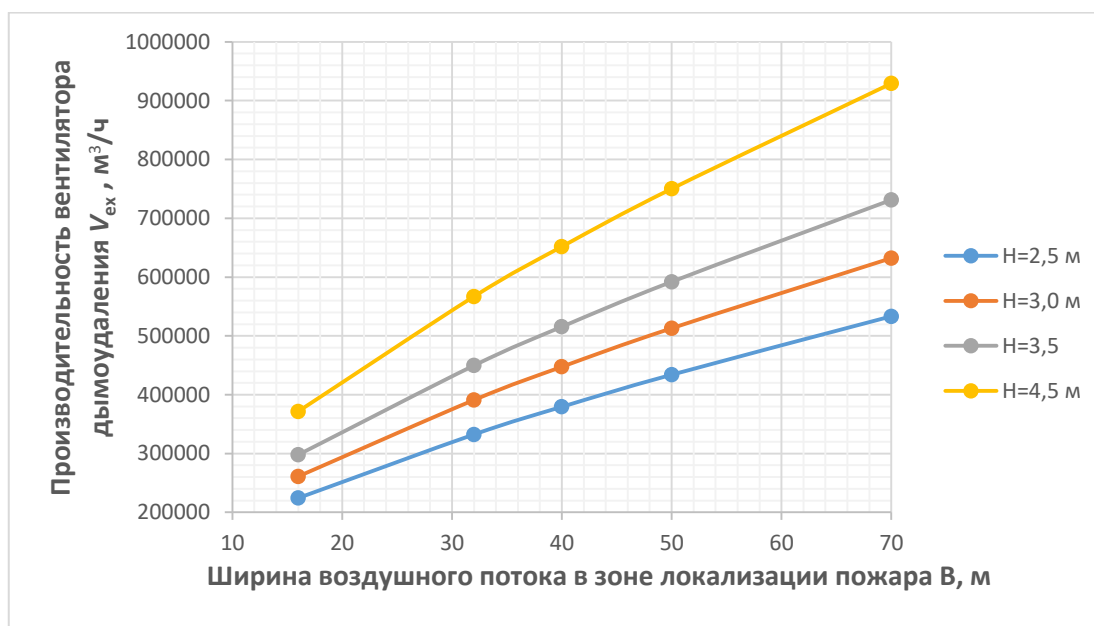
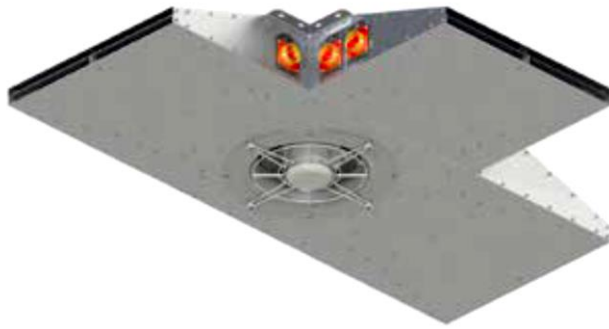


Рис. 3. График зависимости производительности вентилятора дымоудаления от ширины воздушного потока в зоне локализации очага горения электромобиля при различных высотах потолочного перекрытия при $Q_k = 6000$ кВт

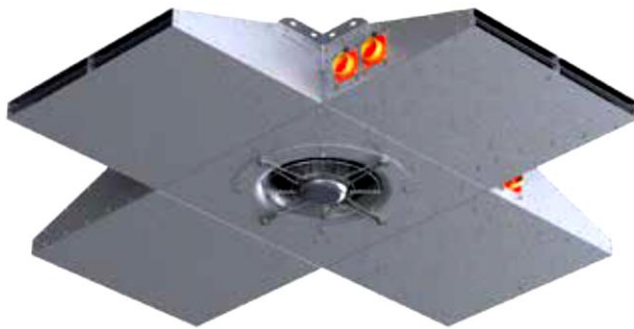
Таким образом, можно обеспечить незадымляемую зону автостоянки со стороны притока. Однако даже в этом случае невозможно исключить растекание токсичных продуктов горения в направлениях, перпендикулярных вентиляционному потоку. Соответственно, система продольной противодымной вентиляции должна формировать воздушные потоки в направлении очага пожара, перпендикулярные основному вентиляционному потоку.

Для решения данной задачи возможно использовать струйные вентиляторы типа TRIX, обеспечивающие поворот воздушной струи на угол 90 градусов. Принцип работы линейки индукционных (радиальных) вентиляторов TRIX рассмотрен в работе [10].

Наиболее универсальными являются модели TRIX — Т и TRIX — Х, показанные на рис. 4.



Модель TRIX — Т



Модель TRIX — Х

Рис. 4. Индукционные (радиальные) вентиляторы типа TRIX

Модель TRIX — Т имеет три патрубка с вентиляционными клапанами и обеспечивает поворот воздушной струи на 180°. Модель TRIX — Х имеет четыре патрубка с вентиляционными клапанами и обеспечивает поворот воздушной струи на 360°.

Для ограничения распространения продуктов горения необходимо, чтобы струйные вентиляторы, размещенные на автостоянке, работали следующим образом:

- направляли воздушные потоки в сторону очага горения;
- обеспечивали воздушный поток между очагом пожара и отверстиями дымоудаления.

Пример реализации данных принципов проектирования противодымной вентиляции приведен на рис. 5.

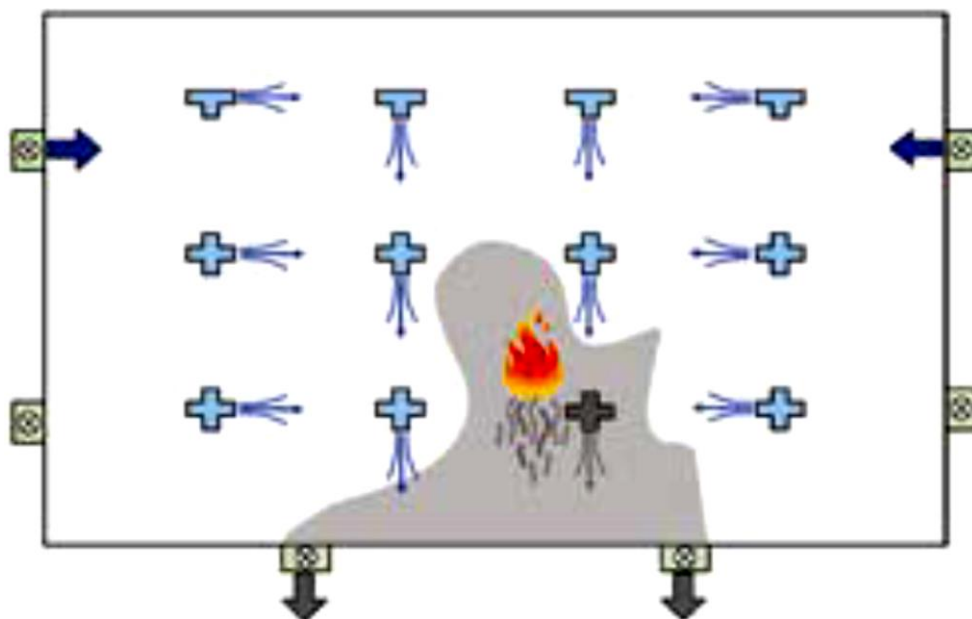


Рис. 5. Схема формирования воздушных потоков, ограничивающих распространение продуктов горения электромобиля, с использованием индукционных струйных вентиляторов TRIX

Существует другой, альтернативный вариант — использование обычного струйного вентилятора, который может быть оснащен поворотным устройством.

Такой вариант применен на подземной автостоянке в КНР (см. рис. 6).



Рис. 6. Устройство крепления струйного вентилятора на стойке с возможностью регулирования углового положения в вертикальной и горизонтальной плоскости

Кроме того, устройство крепления струйного вентилятора, представленное на рис. 6, позволяет регулировать высоту расположения вентилятора, что важно при размещении инженерных коммуникаций под потолком автостоянки.

На рис. 7 представлен эскиз отечественного реверсивного струйного вентилятора российской компании Р+1, оснащенного опорно-поворотным устройством.

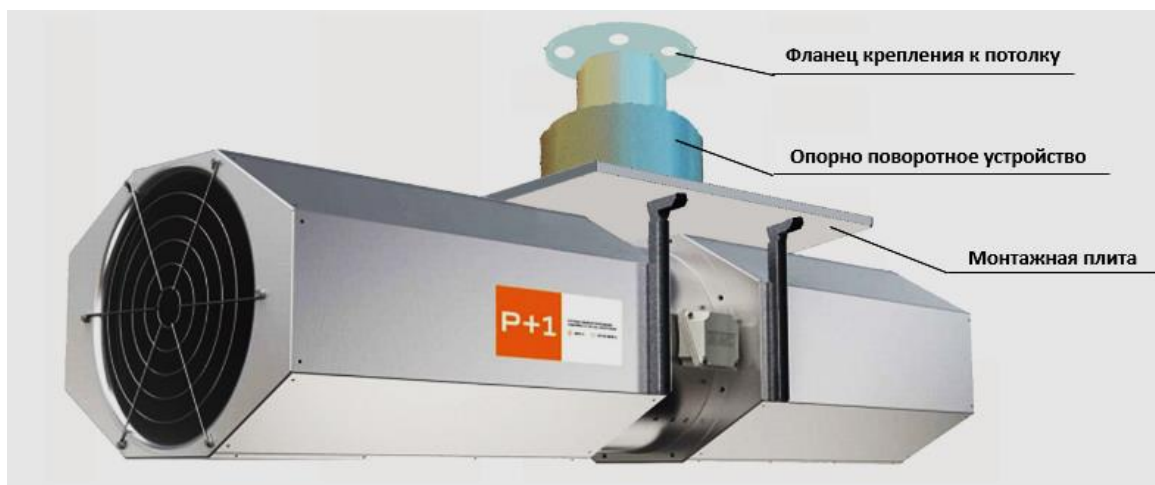


Рис. 7. Реверсивный струйный вентилятор с диаметром рабочего колеса 400 мм, с номинальной реактивной тягой 52Н, оснащенный опорно-поворотным устройством

На рис. 8 — вариант организации воздухораспределения на автостоянке, оснащенной струйными вентиляторами с поворотными устройствами.

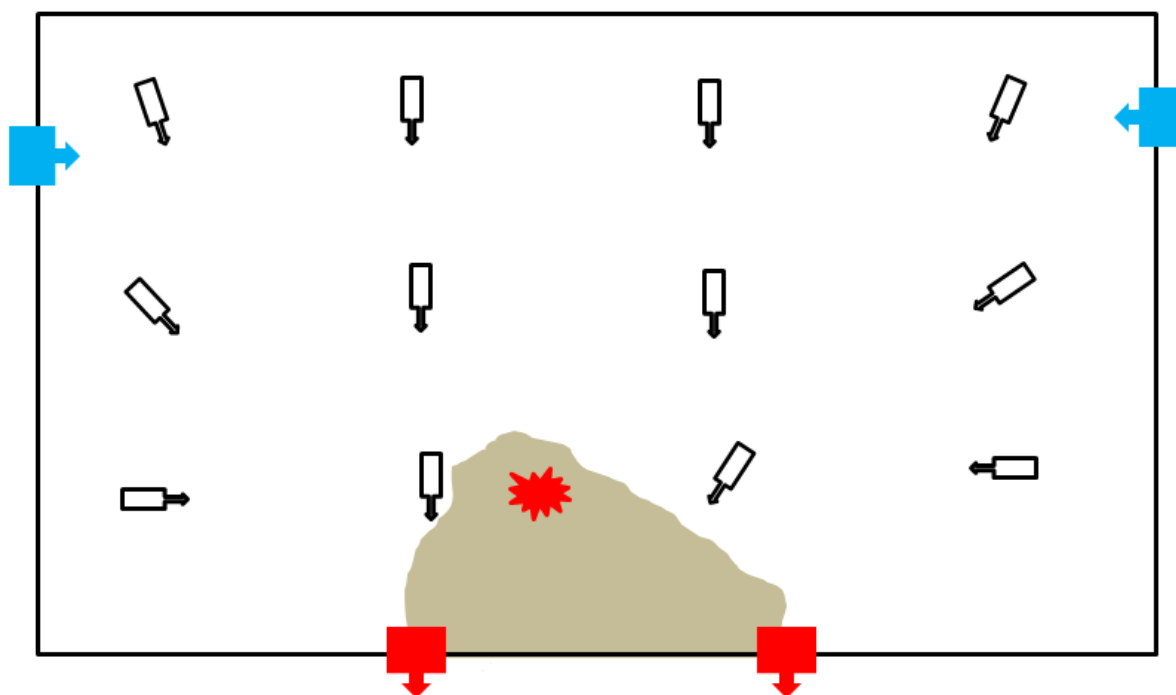


Рис. 8. Схема расположения поворотных струйных вентиляторов, ориентированных на очаг пожара, в помещении автостоянки

Если схема на рис. 5 позволяет осуществить выбор направления поворота воздушных струй с дискретностью 90°, то в случае схемы рис. 8 струйная противодымная

вентиляция точно адаптируется к условиям пожара по координатам очага пожара. При изменении сценария пожара система вентиляции будет перенастраиваться в режиме реального времени.

Важнейшей задачей реализации продольной системы с регулированием направления воздушных потоков является расчетная и экспериментальная проверка проектных решений.

Расчетная проверка осуществляется с помощью численного моделирования.

Необходимо установить критерии для оценки эффективности продольных систем вентиляции автостоянок на основе полевого моделирования динамики распространения опасных факторов пожара. Сформировать минимальные требования к созданию математической модели пожара в программно-вычислительных комплексах, применяющихся в Российской Федерации в данной области исследований.

Экспериментальная проверка продольной системы вентиляции может осуществляться на этапе завершения строительства и проведения пусконаладочных испытаний, с использованием тестового очага горения и искусственного горячего дыма в соответствии с методикой, представленной в стандарте [11].

Основные теоретические положения, на основе которых разработана методика данных испытаний, представлены в работе [5].

Проверяется граница распространения дыма, как это показано на рис. 9.

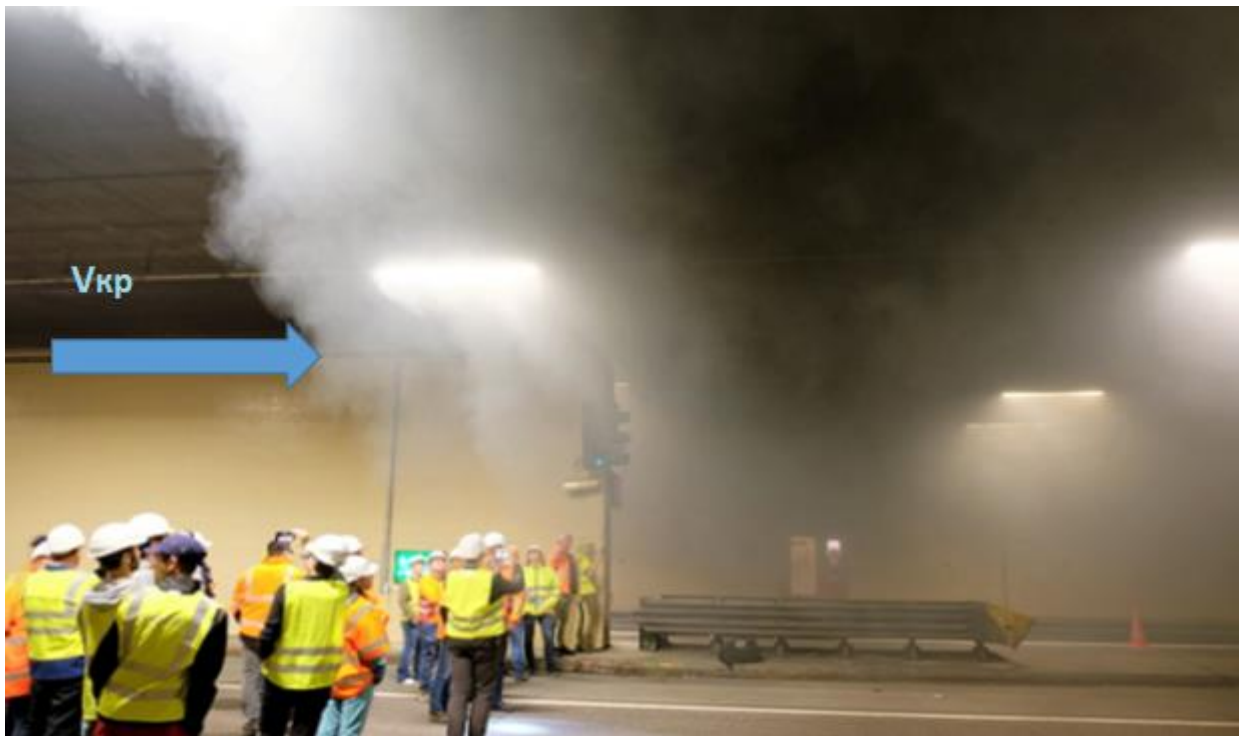


Рис. 9. Тестовый пожар в автодорожном тоннеле (Австрия). Прекращение распространения искусственного дыма под действием воздушного потока, имеющего скорость $V_{кр}$

Динамика распространения дыма при тестовом пожаре фиксируется при помощи фото- и видеосъемки, которая является частью отчета по испытаниям противодымной вентиляции с использованием горячего дыма. При экспериментальной проверке следует непрерывно контролировать температуру потолка над очагом пожара.

ВЫВОДЫ

1. Пожар электромобиля имеет большую в два раза проектную мощность по сравнению с обычным автомобилем с бензиновым двигателем внутреннего сгорания, что вызывает перегрев потолочного перекрытия над очагом пожара до 400–600 °С.
2. Продукты сгорания литийионного аккумулятора высокотоксичны и являются даже более опасным фактором пожара, чем теплоизбытки.
3. Таким образом, основными задачами противодымной вентиляции является эффективное удаление теплоизбытков, охлаждение потолочных перекрытий над очагом пожара и максимально возможное ограничение распространения и удаление из помещения автостоянки токсичных продуктов горения литийионных аккумуляторов.
4. Система продольной противодымной струйной вентиляции с возможностью регулирования направления воздушных потоков является наилучшим решением для больших закрытых автостоянок, где предусмотрена парковка электромобилей.

5. При проектировании продольной системы противодымной вентиляции автостоянок необходимо проверять проектные решения при помощи методов полевого моделирования динамики распространения опасных факторов пожара.

6. Экспериментальная проверка работы продольной противодымной вентиляции на этапе завершения строительства или проведении пусконаладочных испытаний выполняется на базе стандарта [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://opozhare.ru/tushenie/chem-tushit-litij-ionnyj-akkumulyator>
2. Как потушить электромобиль? // Журнал АВОК Сантехника. 2023. № 3. С. 36–39.
3. [https://www.researchgate.net/publication/319368068_Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires](https://www.researchgate.net/publication/319368068_Toxic_fluoride_gas_emissions_from_lithium-ion_battery_fires)
4. СП 300.1325800.2017. Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования.
5. Гримитлин А. М., Волков А. П., Свердлов А. В. Метод масштабирования параметров пожара при испытаниях противодымной вентиляции закрытых автостоянок // Приволжский научный журнал, № 1, 2022. С. 111–122.
6. Гримитлин А. М., Свердлов А. В., Волков А. П. Продольная струйная система противодымной вентиляции закрытых автостоянок — анализ современных проектных решений // Журнал АВОК Инженерные системы, № 2, 2023. С. 2–7.
7. Вишневский Е. П., Волков А. П. Противодымная защита крытых и подземных автопарковок, оборудованных струйной (импульсной) вентиляцией // Мир строительства и недвижимости. — 2012, № 44, с. 54–56.
8. 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.
9. Свердлов А. В., Волков А. П., Рыков С. В., Гордеева Э. А., Волков М. А. Проектирование систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа с использованием математических моделей процессов тепло- и массообмена на

основе числа Фруда // Научный журнал НИУ ИТМО Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2018. № 1. С. 47–56

10. Волков А. П., Свердлов А. В., Рыков С. В., Волков М. А. Фактор энергоэффективности при выборе параметров системы вентиляции автостоянки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2015. № 3 (15). С. 27–36.

11. ГОСТ Р 70827 — 2023 Системы противодымной вентиляции стоянок автомобилей. Метод испытаний при имитации пожара с использованием горячего дыма.