

УДК 697.9

Проектирование систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа с использованием математических моделей процессов тепло- и массообмена на основе числа Фруда

Свердлов А.В. alexander.sverdlov@flaktwoods.com

Канд. техн. наук **Волков А.П.** alex78477@ya.ru

Air Comfort & Fire Safety Europe

117418, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 23

Канд. техн. наук **Рыков С.В.** togg1@yandex.ru

Гордеева Э.А. togg1@yandex.ru

Университет ИТМО

197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49

Волков М.А. alex78477@ya.ru

Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров

198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4

Расчет системы противодымной вентиляции автостоянки на стадии эскизного проектирования или при составлении технико-коммерческого предложения предпочтительно выполнять на базе упрощенной аналитической модели. При этом необходимо оценить погрешность полученных результатов по сравнению с базовой CFD моделью. Наиболее распространенным подходом при моделировании движения дымовых газов в помещении, где произошел пожар, является моделирование по числу Фруда. Основные представления, касающиеся числа Фруда и соотношений подобия при моделировании по Фруду одинаковы независимо от того какой вариант написания формулы данного критерия используется. Моделирование по Фруду приемлемо для описания распространения дыма вдали от очага пожара, где пламя достигает потолочного перекрытия. Такой подход допустим исходя из нормативных требований к сценарию пожара в закрытой автостоянке.

Ключевые слова: системы вентиляции, системы дымоудаления, автостоянки закрытого типа.

Designing smoke alarm systems for modern parking lots of a closed type using mathematical models of processes heat and mass transfer based on the number of fructu

Sverdlov A.V. alexander.sverdlov@flaktwoods.com

Ph.D. Volkov A.P. alex78477@ya.ru

Air Comfort & Fire Safety Europe

117418, Russia, Moscow, ul. Profsoyuznaya, 23

Ph.D. Rykov S.V. togg1@yandex.ru

Gordeeva E.A. togg1@yandex.ru

ITMO University

197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky Pr., 49

Volkov M.A. alex78477@ya.ru

Saint Petersburg state technological university of plant polymers

198095, Russia, St. Petersburg, ul. Ivan Chernykh, 4

Calculation of the smoke alarm system of the parking lot at the stage of outline design or in the preparation of the technical and commercial proposal is preferably carried out on the basis of a simplified analytical model. It is necessary to estimate the error of the results obtained in comparison with the basic CFD model. The most common approach to modeling the movement of flue gases in a room where a fire has occurred is a simulation based on the Froude number. The basic ideas concerning the Froude number and similarity relations in Froude simulation are the same regardless of which variant of the formula formula is used for this criterion. Froude modeling is acceptable for

describing the spread of smoke away from the fire, where the flame reaches the ceiling. This approach is permissible based on the regulatory requirements for a fire scenario in a closed parking lot.

Keywords: ventilation systems, smoke removal systems, closed parking.

Современные системы противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа имеют тенденцию к увеличению производительности вентиляторов дымоудаления, что справедливо как для традиционных канальных поперечных систем [1, 2], так и для более современных продольных систем вентиляции, использующих реверсивные и однонаправленные струйные вентиляторы [3]. На выбор системы противодымной вентиляции влияет целый ряд факторов [4–7], включая факторы энергоэффективности [4] и управление экологической безопасностью подземных транспортных сооружений [5, 6].

В работе [1] показано, что в Европейской практике принято использовать канальные системы противодымной вентиляции автостоянок с производительностью примерно в 1,5–2,0 раза большей, чем в России. Последнее обстоятельство заметно влияет на выбор схемы системы противодымной вентиляции. Использование более крупногабаритных воздуховодов системы дымоудаления в больших помещениях современных автостоянок может быть затруднено из-за незначительной высоты потолочных перекрытий 2,5–3,5 м.

Число Фруда определяет соотношение между силами инерции и гравитационными силами. Плаваемость горячих дымовых газов есть гравитационная сила, поэтому число Фруда является очень важным элементом физического моделирования распространения дыма при возникновении пожара. В зависимости от особенностей сценария пожара и схемы системы дымоудаления существуют различные формы представления данного критерия. Наиболее распространенная форма представления числа Фруда следующая:

$$Fr = \frac{U^2}{gl}, \quad (1)$$

где U – скорость, м/с; l – характерный размер, м.

Основные представления, касающиеся числа Фруда и соотношений подобия при моделировании по Фруду одинаковы независимо от того какой вариант написания формулы данного критерия используется. Моделирование по Фруду приемлемо для описания распространения дыма вдали от очага пожара, где пламя достигает потолочного перекрытия. Такой подход допустим исходя из нормативных требований к сценарию пожара в закрытой автостоянке. Обычно рассматривается пожар одного автомобиля с тепловой мощностью очага горения 4 МВт (5 МВт для России), когда сам очаг пожара можно представить как точечный, размеры которого малы по сравнению с площадью автостоянки, оснащенной автоматической (спринклерной) системой пожаротушения [8].

Рассмотрим моделирование по Фруду (Fr) применительно к определению размеров отверстий дымоудаления на горизонтальных и вертикальных участках воздуховодов при канальной системе дымоудаления. При относительно близком расположении нижней границы дымового слоя к отверстиям дымоудаления возможно вовлечение чистого воздуха, что существенно снижает эффективность противодымной вентиляции. Минимальная допустимая толщина дымового слоя, при заданной объемной производительности по расходу через отверстие дымоудаления, при которой эффект захвата чистого воздуха отсутствует, является критической $d_{кр}$.

В работах [9, 10] значение Fr связано с критической толщиной дымового слоя $d_{кр}$ (для горизонтальных отверстий отсчитываемая от плоскости отверстия, для вертикальных – от верхней границы отверстия) и линейным размером отверстия дымоудаления H :

$$\frac{d_{кр}}{H} = C Fr^{2/5}, \quad (2)$$

где C – эмпирический коэффициент, равный 0,64 для горизонтальных и 1,12 для вертикальных отверстий.

$$Fr = \frac{v_{ex}}{\sqrt{gH\Delta\rho/\rho}} = \frac{V_{ex}}{H^{5/2} g^{1/2} \sqrt{(T_u - T_l)/T_u}}, \quad (3)$$

где Fr – может быть определен через скорость дымовых газов в отверстии дымоудаления v_{ex} и через объемный расход дымовых газов V_{ex} ; T_u, T_l – температуры верхнего и нижнего слоя дымовых газов.

Экспериментальные исследования [9, 10], подтвердившие результаты численного моделирования [11], свидетельствуют о наличии зон устойчивой работы отверстий дымоудаления без захвата воздуха.

Для горизонтальных отверстий дымоудаления при значениях Fr от 10 до 20, при конфигурации отверстия дымоудаления, соответствующее условию:

$$(d/H) \geq 0,64Fr^{0,4}. \quad (4)$$

Для вертикальных отверстий дымоудаления при значениях Fr от 1 до 4 при конфигурации отверстия дымоудаления, соответствующее условию:

$$(d/H) \geq 1,12Fr^{0,4}. \quad (5)$$

Из чего следует, что

$$V_{ex} = g^{0,5} \sqrt{(T_u - T_l)/T_u} (d_{кр}/C)^{2,5}. \quad (6)$$

Формула (6) представлена графиками на рис. 1 для вертикальных и горизонтальных отверстий дымоудаления с размерами соответствующими значениям эмпирического коэффициента C , принятых в (2), при $d = d_{кр}$. Температуры верхнего и нижнего слоя дымовых газов приняты 100 и 15 °С соответственно.

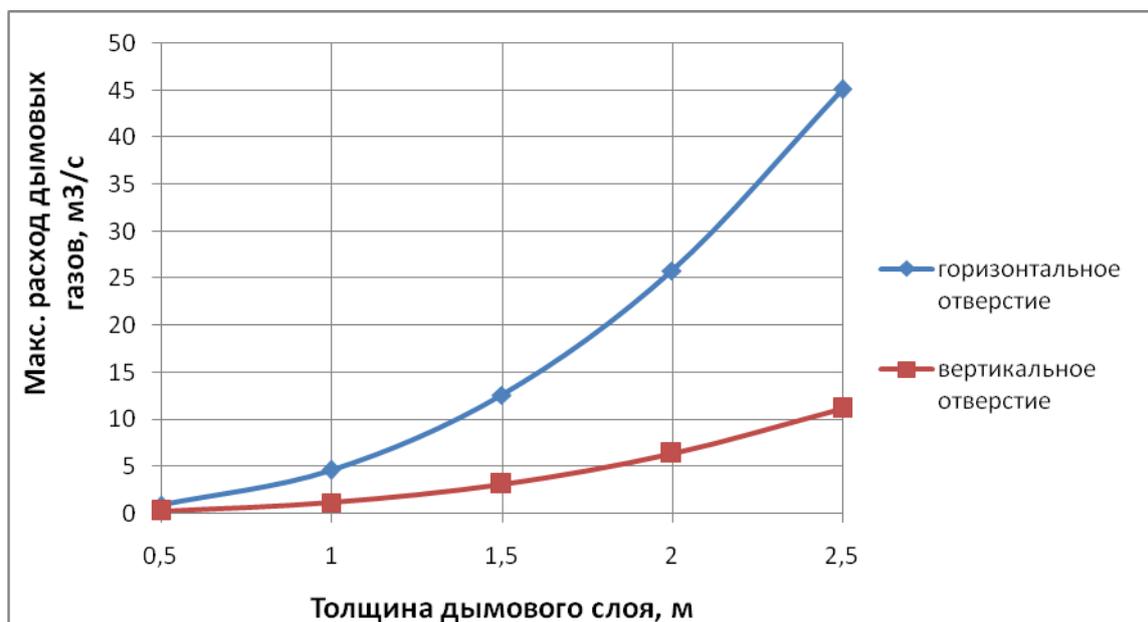


Рис. 1. График зависимости максимально допустимого объемного расхода дымовых газов от толщины дымового слоя $d_{кр}$:
 для горизонтальных отверстий отсчитываемая от плоскости отверстия,
 для вертикальных – от верхней границы отверстия

Учитывая, что высота потолочных перекрытий современной автостоянки обычно бывает на уровне 3 м, толщина дымового слоя может быть от 1 до 0,5 м. В этом случае для горизонтальных отверстий дымоудаления объемная производительность может быть в пределах от 16400 до 2900 м³/ч, а для вертикальных от 4050 до 715 м³/ч.

Пожарный отсек современной автостоянки оснащается противодымной канальной вентиляцией с производительностью до 100000 м³/ч [1, 2], что потребует достаточно большого количества отверстий дымоудаления с противопожарными клапанами. Очевидно, что увеличение габаритов воздуховодов приводит к уменьшению значения $d_{кр}$, а следовательно, требует снизить объемную производительность отверстия дымоудаления и увеличить их количество.

Моделирование по Фруду (Fr) используется при определении основных параметров продольных, струйных систем дымоудаления в автостоянках закрытого типа. При продольном дымоудалении высота потолочных перекрытий не является фактором риска.

При возникновении пожара включаются приточная и вытяжная системы противодымной вентиляции. Поток холодного приточного воздуха, подаваемый в нижнюю часть помещения автостоянки, должен обеспечить удержание нижней границы горячих дымовых газов на высоте Y , равной, в соответствии с нормативными требованиями, не менее 2 м. Включение группы струйных вентиляторов осуществляется с задержкой, необходимой для эвакуации людей из задымленной зоны автостоянки. Формирование дымовых зон при использовании однонаправленных и реверсивных продольных систем дымоудаления автостоянок рассмотрено в работе [3].

На рис. 2 показан механизм формирования разноскоростных и разноплотностных потоков воздуха и дымовых газов.

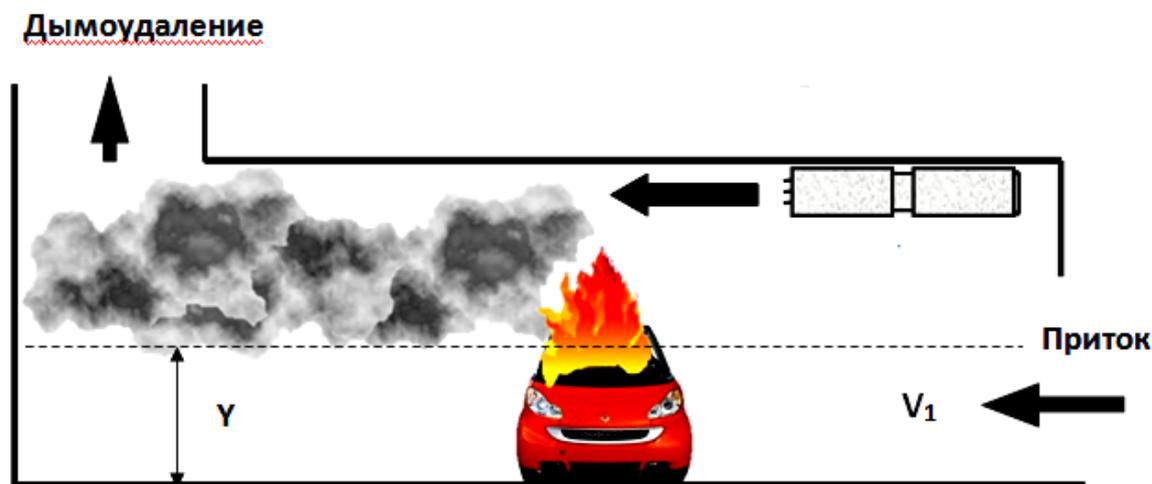


Рис. 2. Схема продольной, струйной системы дымоудаления автостоянки

В зоне очага горения разделение потоков холодного приточного воздуха и горячих дымовых газов без перемешивания и обратного движения газозвушной смеси обеспечивается при значениях Fr от 4,5 до 6,0 [12]. Обычно при расчетах принимают значение $Fr = 4,5$ или менее при наличии больших пожарных рисков.

Значение Fr для рассматриваемой модели может быть вычислено по формуле:

$$Fr = \frac{9,8Y(T_m - T_0)}{T_m V_1^2}, \quad (7)$$

где T_0 – температура холодного приточного воздуха, К; T_m – температура газозвушной смеси за очагом горения, К; V_1 – скорость приточного воздуха перед очагом горения, м/с.

Приняв условия по температурам T_m и T_0 100 и 15 °С построим график (см. рис. 3) скорости V_1 в близких к критическим значениям числа Fr .

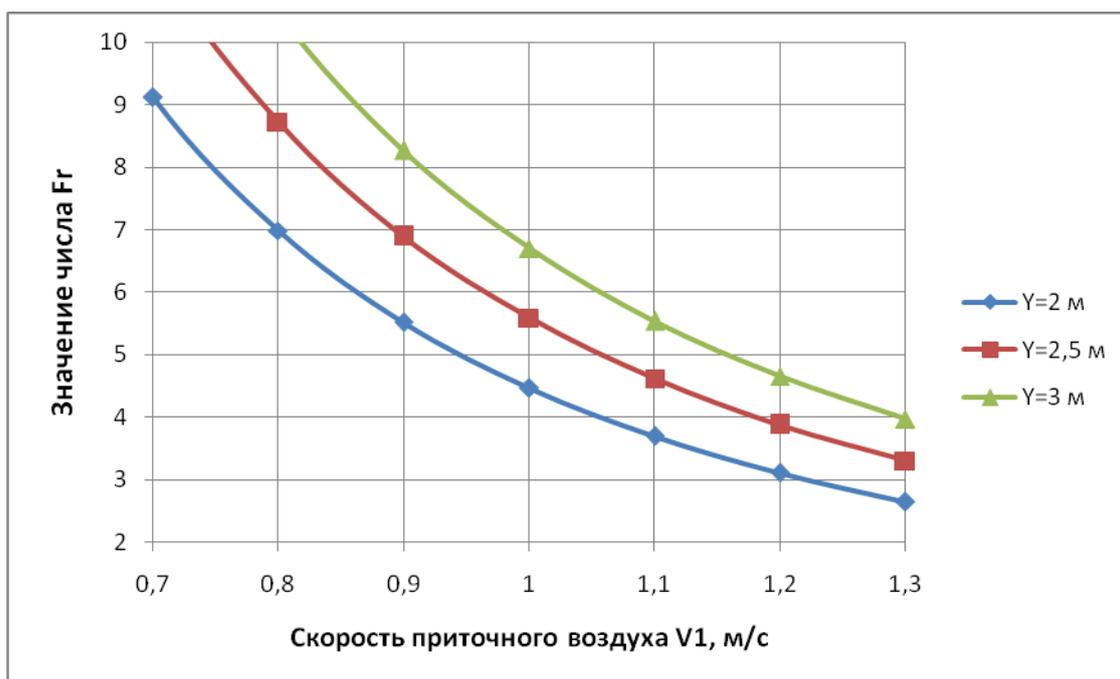


Рис. 3. График зависимости значения числа F_r от скорости приточного воздуха V_1 при заданных значениях высоты нижней границы горячих дымовых газов Y

В работе [13] показано, что дополнительным фактором риска при пожаре в подземной многоярусной автостоянке является возможный локальный перегрев в зоне пожара, поскольку в данном случае ограждающие конструкции не являются эффективным стоком теплоты. Продольные струйные системы дымоудаления обеспечивают удаления избытков теплоты за счет увеличения производительности приточной и вытяжной систем противодымной вентиляции. Струйные вентиляторы охлаждают зону перегрева на потолочном перекрытии. Снижение температуры газовой смеси происходит по мере движения дымовых газов от очага горения к отверстиям дымоудаления при перемешивании с приточным воздухом.

Влияние температуры газовой смеси на выбор скорости приточного воздуха при $Y=2$ м показано на рис. 4.

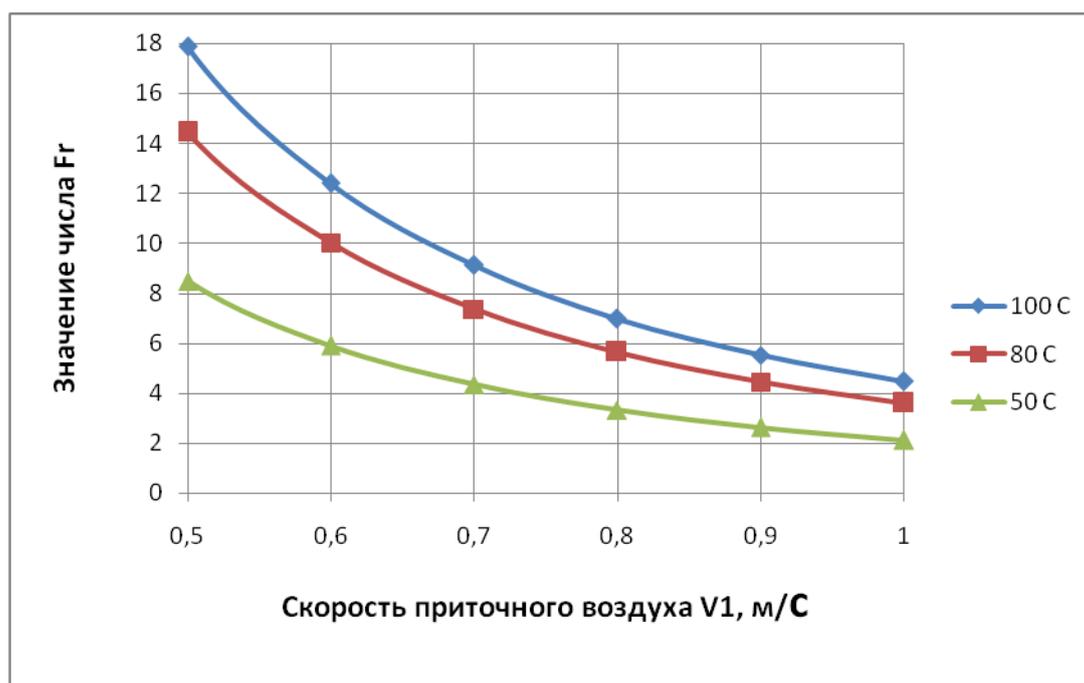


Рис. 4. График зависимости значения числа F_{rom} от скорости приточного воздуха V_1 при заданных значениях температуры газовой смеси T_m

Из представленных данных (см. рис. 3 и 4) следует, что оптимальное значение скорости воздуха V_1 находится в пределах от 0,7 до 1,0 м/с.

Однако, приближенная оценка значения V_1 недостаточна. При проектировании необходимо определить минимально допустимое значение V_1 которое считается критическим $V_{1кр}$. Данный параметр определяет производительность вентиляторов дымоудаления и размер вентиляционных шахт, одновременно являясь гарантией безопасности и защиты путей эвакуации при пожаре.

Основной нормируемый параметр пожара на автостоянке – это конвективная мощность очага горения Q_k . Пожар одного автомобиля $Q_k = 2,7$ МВт при наличие автоматической системы пожаротушения. При ее отсутствии предполагается пожар двух автомобилей $Q_k = 5,4$ МВт.

Используя (7) можно получить выражение для $V_{1кр}$:

$$V_{1кр} = \sqrt{\frac{9,8Y(T_m - T_0)}{FrT_m}}. \quad (8)$$

Для замены T_m используем выражение:

$$T_m = T_0 + \frac{Q_k}{\rho_g C_p B Y V_{1кр}}, \quad (9)$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость продуктов сгорания и воздуха, кДж/(кг·К); принимают равной 1,09; ρ_g – плотность приточного воздуха, кг/м³; B – ширина парковки, перпендикулярная вентиляционному воздушному потоку, м.

После ряда операций получим кубическое уравнение:

$$V_{1кр}^3 + DV_{1кр}^2 - DA = 0, \quad (10)$$

где

$$D = \frac{Q_k}{T_0 \rho_g C_p B Y}; \quad A = \frac{9,8Y}{Fr}.$$

Для решения уравнения (10) используем метод Кардано:

$$V_{1кр} = \sqrt[3]{-\frac{M}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} + \frac{L^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{M}{2} - \sqrt{\frac{M^2}{4} + \frac{L^3}{27}}} - \frac{D}{3}, \quad (11)$$

где

$$L = -\frac{D^2}{3}; \quad M = D \left(\frac{2D^2}{27} - A \right).$$

Уравнение (11) имеет важное практическое значение. Показано влияние на искомое значение $V_{1кр}$ не только константы Q_k , Y , Fr , но и параметров наружного воздуха. Для практических целей важно показать влияния параметра B , который называют размером зоны локализации очага горения. На стадии принятия объемно – планировочных решений следует учитывать, что за счет уменьшения поперечного сечения помещения автостоянки B и правильного расположения вент. шахт можно существенно уменьшить производительность вентиляторов дымоудаления и размер сечения вент. шахт.

На рис. 5 показано влияние B на $V_{1кр}$ при $Y = 2$ м и $Fr = 4,5$ при пожаре одного и двух автомобилей.

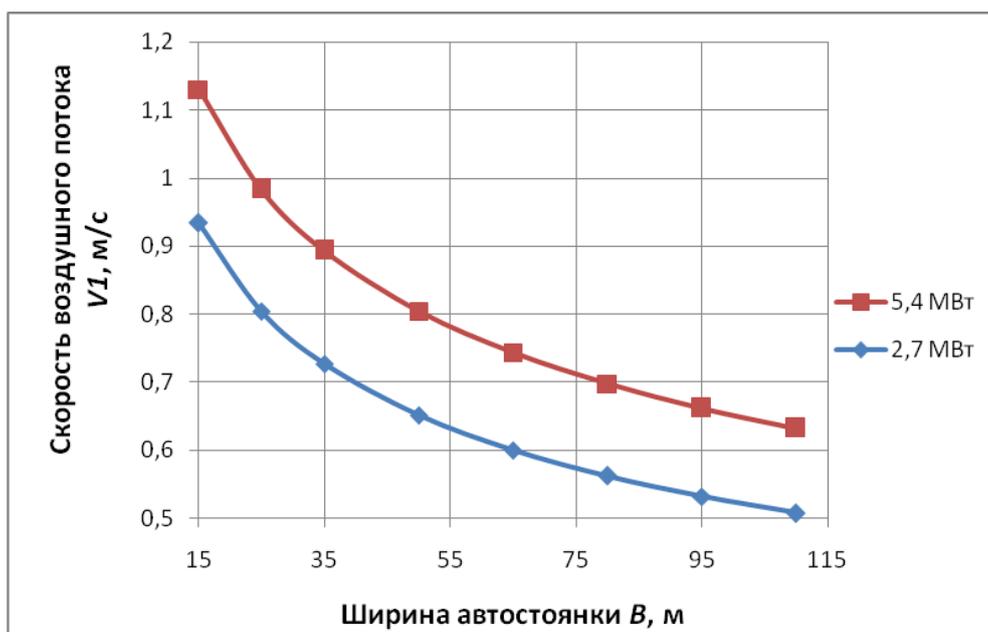


Рис. 5. График зависимости скорости $V_{1кр}$ от ширины помещения автостоянки B при пожаре одного и двух автомобилей

Температура продуктов горения T_m (К) за очагом горения перед вентилятором дымоудаления не должна превышать 673 К:

$$T_m = T_0 \left(1 + \frac{D}{V_{кр}} \right). \quad (12)$$

При повышенных пожарных нагрузках конфигурация помещения оказывает влияние на температурный режим автостоянки во время пожара, что показано на рис. 6.

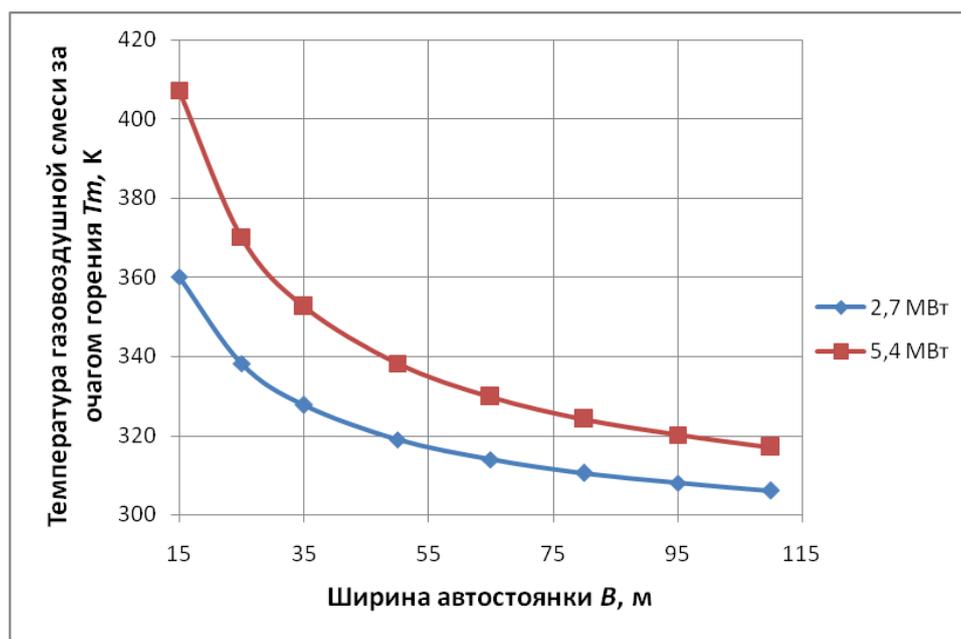


Рис. 6. График зависимости температуры T_m от ширины помещения автостоянки B при пожаре одного и двух автомобилей

Минимальная производительность вентилятора дымоудаления, м³/ч:

$$V_{ex} = 3600V_{1кр} BY \frac{T_m}{T_0} \quad (13)$$

V_{ex} представлена на рис. 7.

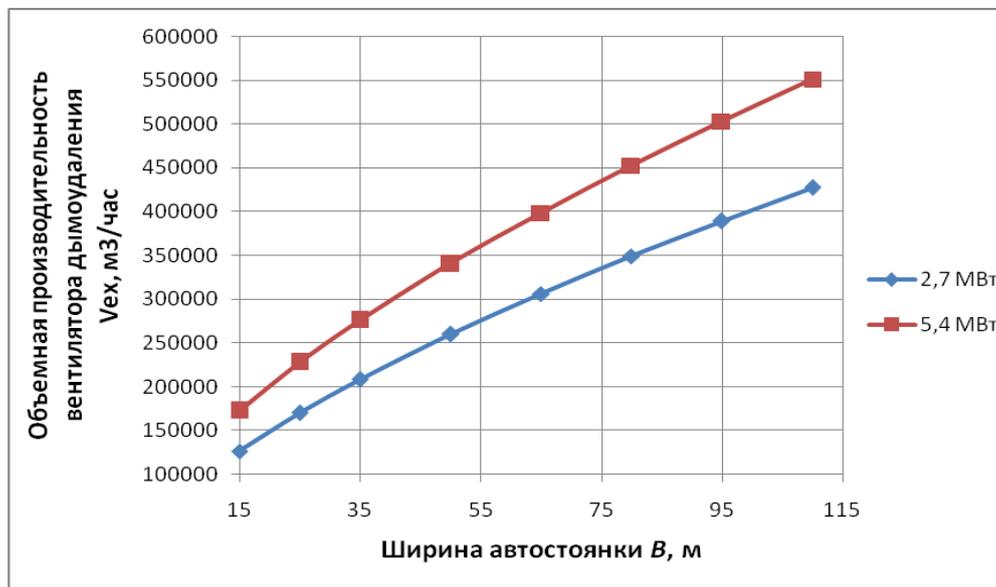


Рис. 7. График зависимости объемной производительности вентилятора дымоудаления V_{ex} от ширины помещения автостоянки B при пожаре одного и двух автомобилей

Струйные вентиляторы, закрепленные на потолочном перекрытии, должны обеспечивать скорость продольного высокотемпературного вентиляционного потока не менее $V_{1кр}$. В работе [14] было показано, что в этом случае должны выполняться условия:

$$V_1 \geq V_{1кр}; v_{x\min} \geq V_1, \quad (14)$$

где $v_{x\min}$ минимальное значение осевой скорости воздушной струи осевого струйного вентилятора.

В соответствии с графиками, представленными в [14] осуществляется выбор расстояния (в оси) между вентиляторами L_n , обеспечивающего выполнение условия (14) в зависимости от осевой реактивной тяги струйного вентилятора, определяют максимальную площадь проветриваемую одним струйным вентилятором.

Представленные результаты исследования закономерностей процессов тепло и массообмена при дымоудалении пожарных газов из помещения закрытой автостоянки при помощи продольной струйной противодымной вентиляции стали основой новых правил проектирования СП 300.1325800.2017 [15].

Отметим, что все расчеты выполнялись в пакетах прикладных программ [16–18].

Выводы:

1. Показана тенденция к увеличению производительности систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа.
2. Проанализированы математические модели процессов тепло и массообмена с использованием числа Фруда применительно к традиционным канальным и новым струйным системам дымоудаления автостоянок.
3. Приведены результаты численного анализа основных проектных параметров системы струйной вентиляции автостоянок.
4. Представлены новые правила проектирования системы струйной вентиляции и дымоудаления автостоянок СП 300.1325800.2017 [15].

Литература

1. *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.
2. *Wojciech Vengzhinsky, Grzegorz Krajewski.* Systemy wentylacji pożarowej garaży. Projektowanie, ocena, akceptacja / Системы противопожарной вентиляции гаражей. Проектирование, оценка, приемка. Пособие // Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 2015 – ISBN 987 – 83 – 249 – 6792 – 6. <http://www.flaktwoods.ru/about-us/media/news/sistemy-protivopozharnoj-ventilyatsii-garazhej/>
3. *Волков А.П., Свердлов А.В.* Реверс воздушного потока при продольной вентиляции и дымоудалении подземных и крытых автостоянок // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. 2015. №1. С. 34–38.
4. *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. С. 27–36.
5. *Волков А.П., Свердлов А.В., Рыков С.В.* Управление экологической безопасностью подземных транспортных сооружений при различных режимах движения транспортных средств // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2015. № 3. С. 179–192.
6. *Волков А.П., Свердлов А.В., Рыков С.В.* Экология и расчет воздухообмена подземных автостоянок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 3. С. 9–16.
7. *Рыков С.А., Кудрявцева И.В., Рыков С.В.* Мобильные широкополосные демпферы для демпфирования колебаний пластинчатых конструкций // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 3. С. 90–97.
8. *Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Климович М.В., Волков М.А.* Расчетные методы проектирования продольных струйных систем вентиляции автостоянок закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 4. С. 23–32.
9. *Nii D., Niita K., Harada K., Yamaguchi J.* Air entrainment into mechanical smoke vent on ceiling // Fire Safety Science – Proc. 7th Int. Symp. Fire Safety Science, IAFSS, Worcester, MA, 2003, pp. 729–740.
10. *Nii D., Harada K.* Prediction formula of air entrainment ratio into wall-equipped mechanical smoke vent. // J. Environ. Eng., AIJ, No. 600, Feb. 2006, pp. 1–6.
11. *McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J.* Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide // NIST Special Publication 1019-5, 2008.
12. *Вишневецкий Е.П., Волков А.П.* Системы струйной (импульсной) вентиляции крытых и подземных автостоянок // Мир строительства и недвижимости. 2012. № 43. с. 54–57 с.
13. *Вишневецкий Е.П., Волков А.П.* Противодымная защита крытых и подземных автопарковок, оборудованные струйной (импульсной) вентиляцией // Мир строительства и недвижимости. 2012. № 44. С. 54–56.
14. *Волков А.П., Гримитлин А.М., Рыков С.В.* Методика расчета вентиляционной системы парковки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014. № 2 (15). С. 45–57.
15. СП 300.1325800.2017 «Системы струйной вентиляции и дымоудаления подземных и крытых автостоянок. Правила проектирования».
16. *И.В. Кудрявцева, С.А. Рыков, С.В. Рыков, Е.Д. Скобов.* Методы оптимизации в примерах в пакете MathCAD 15. Ч. I: // Учеб. пособие – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, 2014. 166 с.
17. *Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Рыков С.А., Рыков В.А.* Практикум по работе в математическом пакете MathCad // Учебное пособие – Санкт-Петербург, 2015. 87 с.
18. *Буткарев А.Г., Рыков В.А., Рыков С.А.* Эффективное использование редактора ms word для оформления документов большого объема // Пособие для самостоятельной работы / А.Г. Буткарев, В.А. Рыков, С.А. Рыков; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. ун-т низкотемпературных и пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2007. 183 с.

References

1. *Sverdlov A.V., Volkov A.P.* Analiz evropejskih i rossijskih pravil proektirovaniya tradicionnyh kanal'nyh sistem protivodymnoj ventilyacii avtostoyanok zakrytogo tipa // AVOK Ventilyaciya. Otoplenie. Kondicionirovanie. – 2017. № 6, S. 34–37.
2. *Wojciech Vengzhinsky, Grzegorz Krajewski.* Systemy wentylacji pożarowej garaży. Projektowanie, ocena, akceptacja / Systemy protivopozharnoj ventilyacii garazhej. Proektirovanie, ocenka, priemka. Posobie // Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa 2015 – ISBN 987 – 83 – 249 – 6792 – 6. <http://www.flaktwoods.ru/about-us/media/news/sistemy-protivopozharnoj-ventilyatsii-garazhej/>

3. Volkov A.P., Sverdlov A.V. Revers vozdušnogo potoka pri prodol'noj ventilyacii i dymoudalenii podzemnyh i krytyh avtostoyanok // *AVOK Ventilyaciya. Otoplenie. Kondicionirovanie*. 2015. №1, S. 34–38.
4. Volkov A.P., Sverdlov A.V., Rykov S.V., Volkov M.A. Faktor ehnergoehffektivnosti pri vybore parametrov sistemy ventilyacii avtostoyanki zakrytogo tipa // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2015. № 3. S. 27–36.
5. Volkov A.P., Sverdlov A.V., Rykov S.V. Upravlenie ehkologicheskoy bezopasnost'yu podzemnyh transportnyh sooruzhenij pri razlichnyh rezhimah dvizheniya transportnyh sredstv // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: EHkonomika i ehkologicheskij menedzhment*. 2015. № 3. S. 179–192.
6. Volkov A.P., Sverdlov A.V., Rykov S.V. EHkologiya i raschet vozduhoobmena podzemnyh avtostoyanok // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2014. № 3. S. 9–16.
7. Rykov S.A., Kudryavceva I.V., Rykov S.V. Mobil'nye širokopolosnye dempfery dlya dempfirovaniya kolebanij plastinchatykh konstrukcij // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2014. № 3. S. 90–97.
8. Sverdlov A.V., Volkov A.P., Rykov S.V., Klimovich M.V., Volkov M.A. Raschetnye metody proektirovaniya prodol'nyh strujnyh sistem ventilyacii avtostoyanok zakrytogo tipa // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2016. № 4. S. 23–32.
9. Nii D., Niita K., Harada K., Yamaguchi J. Air entrainment into mechanical smoke vent on ceiling // *Fire Safety Science – Proc. 7th Int. Symp. Fire Safety Science, IAFSS, Worcester, MA, 2003*, pp. 729–740.
10. Nii D., Harada K. Prediction formula of air entrainment ratio into wall-equipped mechanical smoke vent. // *J. Environ. Eng., AIJ*, No. 600, Feb. 2006, pp. 1–6.
11. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide // *NIST Special Publication*. 1019-5, 2008.
12. Vishnevskij E.P., Volkov A.P. Sistemy strujnoj (impul'snoj) ventilyacii krytyh i podzemnyh avtostoyanok // *Mir stroitel'stva i nedvizhimosti*. – 2012, № 43, s. 54–57 c.
13. Vishnevskij E.P., Volkov A.P. Protivodymnaya zashchita krytyh i podzemnyh avtoparkovok, oborudovannye strujnoj (impul'snoj) ventilyaciej // *Mir stroitel'stva i nedvizhimosti*. – 2012, № 44, S. 54–56.
14. Volkov A.P., Grititlin A.M., Rykov S.V. Metodika rascheta ventilyacionnoj sistemy parkovki zakrytogo tipa // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: Holodil'naya tekhnika i kondicionirovanie*. 2014. № 2 (15). S. 45–57.
15. SP 300.1325800.2017 «Sistemy strujnoj ventilyacii i dymoudaleniya podzemnyh i krytyh avtostoyanok. Pravila proektirovaniya».
16. I.V. Kudryavceva, S.A. Rykov, S.V. Rykov, E.D. Skobov. Metody optimizacii v primerah v pakete MathCAD 15. CH. I: // *Ucheb. posobie – SPb.: NIU ITMO, IHiBT*, 2014. 166 s.
17. Rykov S.V., Kudryavceva I.V., Rykov S.A., Rykov V.A. Praktikum po rabote v matematicheskom pakete MathCad // *Uchebnoe posobie – Sankt-Peterburg*, 2015. 87 s.
18. Butkarev A.G., Rykov V.A., Rykov S.A. EHffektivnoe ispol'zovanie redaktora ms word dlya oformleniya dokumentov bol'shogo ob"ema // *Posobie dlya samostoyatel'noj raboty / A. G. Butkarev, V. A. Rykov, S. A. Rykov; Federal'noe agentstvo po obrazovaniyu, Sankt-Peterburgskij gos. un-t nizektemperaturnyh i pishchevyh tekhnologij. Sankt-Peterburg*, 2007. 183 c.

Статья поступила в редакцию 18.03.2018 г.