Д-р техн. наук,
профессор кафедры ПБС
Академии ГПС МЧС РФ
В. М. Есин

Адъюнкт кафедры ПБС
Академии ГПС МЧС РФ
С. П. Калмыков

УДК 614.841

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНУЮ РАБОТУ СИСТЕМЫ ДЫМОУДАЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ АВТОСТОЯНКИ ЗАКРЫТОГО ТИПА ПРИ ПОМОЩИ СТРУЙНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

На основе математического моделирования проведен ряд теоретических экспериментов работы системы дымоудаления и вентиляции автостоянки закрытого типа при помощи струйных вентиляторов с целью выявления и обоснования основных параметров, обеспечивающих эффективную работу этой системы. По результатам исследований сформулированы предложения по применению струйных вентиляторов.

1. Постановка проблемы исследования

Для правильной и эффективной работы системы струйной вентиляции необходимо учесть ряд параметров. К ним относятся напор, создаваемый вентилятором, его производительность, скорость воздуха на выбросном патрубке, КПД, количество оборотов и диаметр рабочего колеса и т.п., а также пространственные характеристики размещения струйных вентиляторов.

Наряду с вышеуказанными актуальным параметром для струйного вентилятора является также величина *тяги*, определяемая следующим образом [5]:

$$T_m = \rho q_{VF} V_F = \frac{\rho q_{VF}^2}{A_F} = \rho V_F^2 A_F,$$

где T_m — тяга, создаваемая вентилятором, Н;

ρ — плотность воздуха, кг/м^3;

q_{VF} — объемный расход воздуха через струйный вентилятор, м^3/с;

V_F — скорость потока воздуха на выбросном патрубке вентилятора, м/с;

A_F — площадь поперечного сечения вентилятора, м^2.

Необходимо учитывать геометрические характеристики помещения и влияние работы других систем. К геометрическим параметрам помещения относятся его линейные размеры, конфигурация, места размещения воздухо- и дымоприемных отверстий вытяжных шахт, возможные препятствия для перемещения воздуха (балки, коммуникации и т.п.), расположение выходов из помещения автостоянки, через которые возможна эвакуация, во избежание воздействия динамического давления на двери этих выходов. Системой, которая может оказать влияние на работу системы струйной вентиляции, может являться система автоматического пожаротушения.

Для выявления и обоснования основных параметров, обеспечивающих эффективную работу системы дымоудаления и вентиляции автостоянки закрытого типа при помощи струйных вентиляторов, был проведен ряд численных экспериментов.

2. Принципы работы системы струйной вентиляции

В качестве противодымной защиты автостоянок закрытого типа, как и транспортных тоннелей, система струйной вентиляции используется для создания необходимой скорости потока воздуха — большей, чем скорость дымовых газов, образующихся при пожаре автомобиля, для перемещения потока дыма в заданном направлении (рис. 1).

В работе [6] выполнены расчеты скорости потока дымовых газов, возникающего при горении автомобиля в тоннеле. Так, например, в тоннеле шириной 10 м и высотой 5 м с очагом горения в 3 МВт скорость потока дымовых газов составит 1,3 м/с. Дымовые газы от подобного очага горения в автостоянке будут растекаться во всех направлениях. В табл. 1 приведены результаты расчетов [6], произведенных для тоннелей и применяемых при моделировании пожаров в закрытых автостоянках.

На рис. 2 показана картина движения воздуха вблизи контура струи. Поток воздуха от струйных вентиляторов вовлекает за собой воздух из нижних "неподвижных" зон (ниже 1,8 м), что показано движением в направлении, противоположном направлению струи.

При использовании системы струйной вентиляции для целей противодымной защиты закрытых автостоянок возможно частичное дымоудаление из таких помещений за счет ограничения растекания дымовых газов по ширине автостоянки при определенных скоростях воздушных струй, выходящих из вентиляторов [15]. На рис. 3 показана схема частичного дымоудаления из помещения автостоянки.

При обнаружении очага пожара приборами автоматики активизируются струйные вентиляторы, причем возможно включение не всех вентиляторов в помещении, а лишь тех, работа которых будет препятствовать растеканию дымовых газов от очага горения и перемещать их к отверстиям вытяжных шахт. Скорость воздушных струй должна быть выше скорости дымовых газов на границах вентилируемой зоны для предотвращения распространения дыма на остальную часть помещения.

В табл. 2 приведены значения необходимой скорости воздушных струй в зависимости от ширины задымленной зоны при горении автомобиля с мощностью теплового потока 3 МВт [15].

Из сравнения значений скоростей воздушного потока (табл. 2) и дымовых газов (табл. 1) видно, что для вентиляции задымленной зоны шириной 20 м возможно ограничить распространение дыма в пределах 5 м от очага пожара. Это будет гарантировать перемещение основного потока к дымоприемным отверстиям вытяжных шахт и предотвратит распространение дыма на остальную площадь автостоянки. Такое решение отсутствует у систем противодымной и общеобменной вентиляции с воздуховодами.

Для уменьшения расходов, связанных с оснащением помещений закрытых автостоянок системой струйной вентиляции, целесообразно предусматривать оптимальное количество струйных вентиляторов для максимально эффективной работы такой системы. Согласно данным [8] максимальная величина тяги струйных вентиляторов, применяемых в закрытых автостоянках, составляет 53–56 Н при диаметре рабочего колеса вентилятора 400 мм. Такая тяга соответствует скорости потока воздуха на выбросном патрубке вентилятора, равной 18–20 м/с

Таблица 1. Скорость потока дымовых газов при горении автомобиля (очаг горения мощностью 3 МВт)

Расстояние от очага горения, м	Скорость потока дыма, м/с
3	1,52
16	0,89
32	0,7
80	0,5

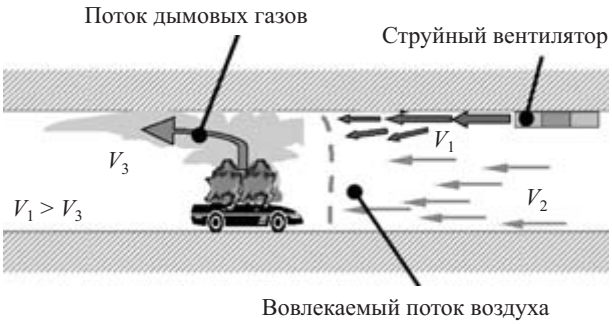

Рис. 1. Схема работы струйной противодымной вентиляции

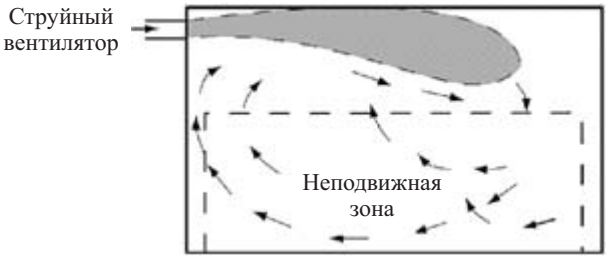

Рис. 2. Схема движения воздуха вблизи струй

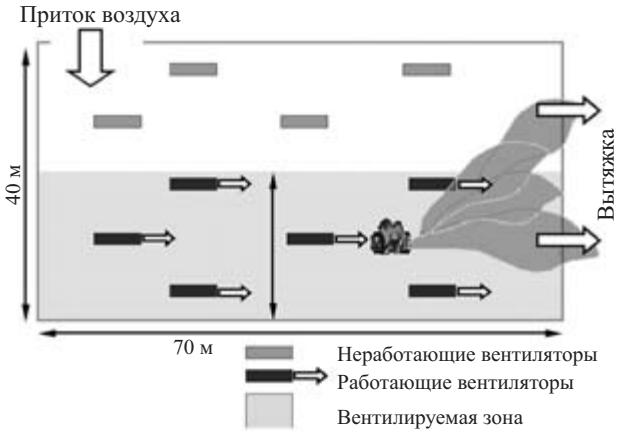

Рис. 3. Схема частичного дымоудаления из помещения автостоянки

Таблица 2. Значения необходимой скорости воздушных струй в зависимости от ширины задымленной зоны

Ширина задымленной зоны, м	Необходимая скорость воздуха, м/с
10	2,8
20	1,4
30	0,95
50	0,57

при нормальных условиях. Эта величина скорости воздушного потока и будет максимальной при проведении теоретических расчетов.

3. Проведение численных экспериментов

3.1. Условия однозначности задачи

Математическая модель, используемая в рассматриваемых задачах, включает в себя балансовые уравнения энергии, движения и массы отдельных компонентов продуктов горения в форме Навье–Стокса. Для реализации математических моделей на ЭВМ был использован программный комплекс SOFIE [14], специально разработанный для моделирования пожаров Международным консорциумом научных и исследовательских организаций. Реализация процессов турбулентного переноса осуществлялась с помощью k–ε-модели турбулентности, учитывающей эффекты плавучести, а процессов горения — диффузионно-вихревой модели Магнуссена–Хавьертагера [7, 9]. Для оценки образования сажи и ее распространения в объеме помещения использована модель Теснера [3]. При определении поправок давления и скоростей применена итерационная схема Патанкара и Сполдинга [2]. Все уравнения решались с помощью построчного алгоритма тридиагональной матрицы (ТДМА) [2]. При расчете скоростных, температурных и концентрационных полей использовалась трехмерная декартова система координат. Поля переменных определялись на совмещенной сетке.

3.2. Результаты численных экспериментов работы системы струйной вентиляции и их анализ

В ходе теоретических исследований было проведено десять численных экспериментов. В 1–3-м расчетах моделировалась работа системы струйной вентиляции на примере двух последовательно расположенных струйных вентиляторов в помещении (автостоянке). Расстояние между вентиляторами принималось равным 20 м. При этом варьировалась скорость потока воздуха, выходящего из выбросных патрубков вентиляторов.

Площадь моделируемого помещения составляла 900 м^2. Общее количество контрольных объемов — 67500 (90×15×50). Размеры струйного вентилятора принимались равными 3,0×0,4×0,4 м. Скорость потока воздуха, выходящего из выбросного патрубка струйного вентилятора, составляла 20 м/с для 1-го, 10 м/с для 2-го и 5 м/с для 3-го расчетов. В модели предусматривалось наличие отверстий вытяжной и приточной шахт. Очаг горения представлял собой прямоугольную горелку размерами 1,88×3,0 м. В качестве горючего использовалась комплексная горючая нагрузка, приведенная для автомобиля (резина, бензин, ППУ, искожа, ПВХ и эмаль) [1]. Мощность тепловыделения была постоянной и равнялась 4165 кВт. Предполагалось, что в начальный момент времени расчетная область заполнена неподвижной газовой смесью (воздухом) с температурой 278,6 К. Расчеты проводились с временным шагом 0,1 с и сходимостью по разности масс 0,1%.

На рис. 4 и 5 показаны вертикальные профили скорости воздушного потока (в плоскости оси вентиляторов) на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка первого вентилятора соответственно. Профили скоростей приведены для момента времени 300 с от начала моделируемого процесса.

Скорость воздушного потока, выходящего из выбросного патрубка струйного вентилятора, варьировалась от 5 до 20 м/с.

Как видно из вышеприведенных профилей скорости, лучшие результаты получены при скорости потока воздуха, равной 20 м/с. Отрицательные значения скорости свидетельствуют о циркуляции воздуха (дыма) внутри помещения.

На рис. 6 и 7 показаны горизонтальные профили скорости воздушного потока для плоскости, отстоящей от уровня пола на 2,6 м и на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка первого вентилятора соответственно.

Профили скоростей не являются симметричными относительно оси вала вентилятора. Это объясняется тем, что в рассматриваемых задачах моделируется очаг горения, центр которого находится в плоскости оси вентиляторов, а также наличием отверстий в помещении для притока и вытяжки воздуха.

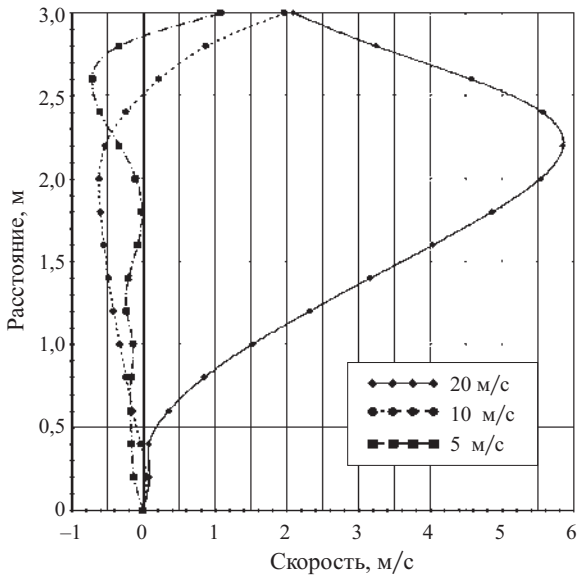

Рис. 4. Вертикальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

При скоростях воздушных струй 5 и 10 м/с ограничение распространения дыма происходит не в должной степени: при скорости струи 5 м/с над очагом горения наблюдаются отрицательные значения скоростей общего потока, что свидетельствует о распространении продуктов горения в направлении, противоположном направлению струй.

В 4–7-х расчетах моделировалась работа системы струйной вентиляции на примере двух последовательно расположенных струйных вентиляторов в помещении автостоянки. Расстояние между вентиляторами варьировалось от 10 до 40 м: 10 м в 4-м расчете, 20 м — в 5-м, 30 м — в 6-м и 40 м — в 7-м расчетах. Скорость на выбросных патрубках вентиляторов принималась постоянной и равной 20 м/с. Площадь моделируемого помещения составляла 700 м^2 в 4-м расчете, 900 м^2 — в 5-м, 1100 м^2 — в 6-м и 1300 м^2 — в 7-м расчетах. Остальные условия принимались, как и в первых трех расчетах.

На рис. 8 показаны горизонтальные профили скорости воздушного потока в плоскости оси вентиляторов на участке от выбросного патрубка первого вентилятора до входного патрубка второго вентилятора на расстоянии 2,6 м от уровня пола помещения. Профили скоростей приведены для момента времени 300 с от начала моделируемого процесса.

Согласно [15] в помещении шириной 20 м скорость воздушного потока должна составлять 1,4 м/с. Из рис. 8 видно, что скорость струи, выходящей из первого струйного вентилятора, меньшая 1,4 м/с, наблюдается на профиле скорости струи, когда расстояние между последовательно расположенными вентиляторами составляет 40 м.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что расстояние между последовательно расположенными вентиляторами должно составлять при данных условиях не более 30 м.

В следующих трех расчетах моделировалась работа системы струйной вентиляции на примере четырех струйных вентиляторов в помещении автостоянки. Их расположение предполагалось в два ряда, в каждом ряду по два вентилятора. Расстояние между последовательно расположенными вентиляторами принималось равным 20 м. При этом варьировалось расстояние между параллельно расположенными вентиляторами: 10 м в 8-м расчете, 20 м — в 9-м и 30 м — в 10-м расчетах.

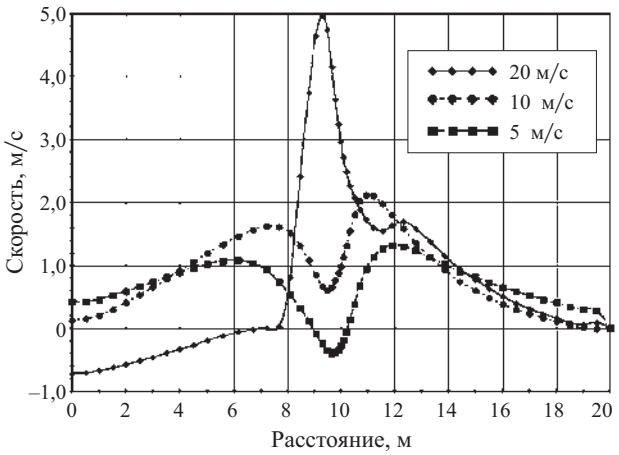

Рис. 6. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

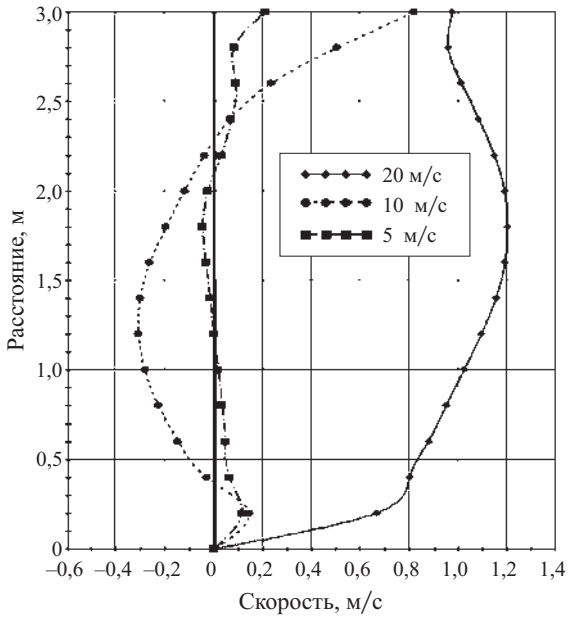

Рис. 5. Вертикальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

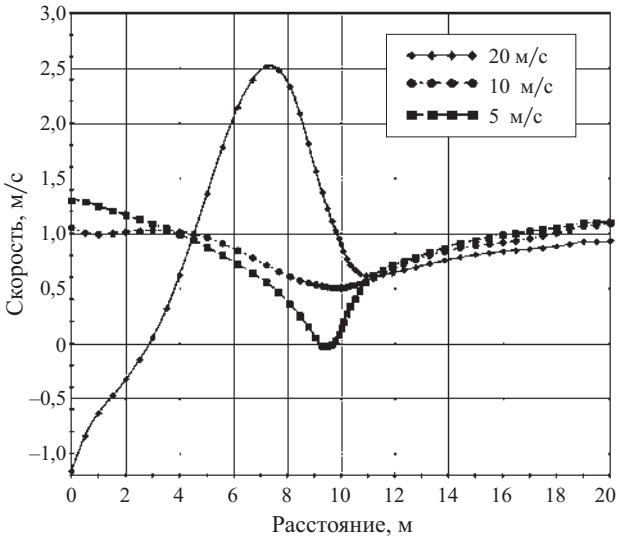

Рис. 7. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

Площадь моделируемого помещения составляла 1800 м^2. Общее количество контрольных объемов 135000 (90×15×100). Остальные условия принимались, как и в первых трех расчетах.

На рис. 9 и 10 показаны горизонтальные профили скорости воздушного потока для плоскости, отстоящей от уровня пола на 2,6 м, на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка первого вентилятора

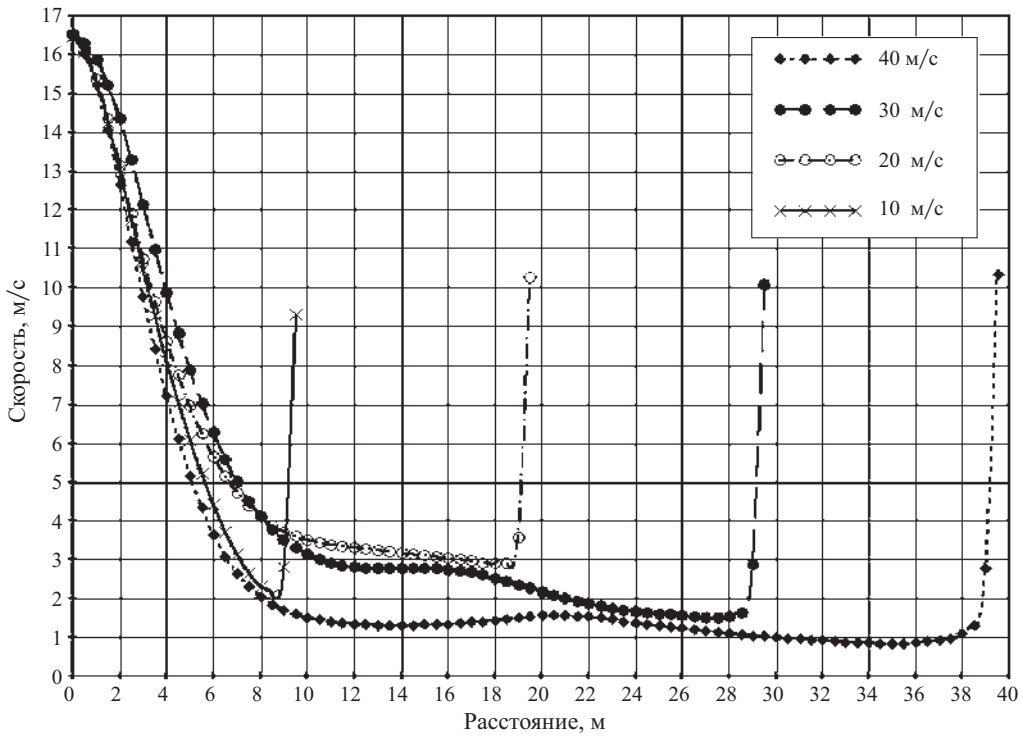

Рис. 8. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на участке от выбросного патрубка первого вентилятора до входного патрубка второго вентилятора

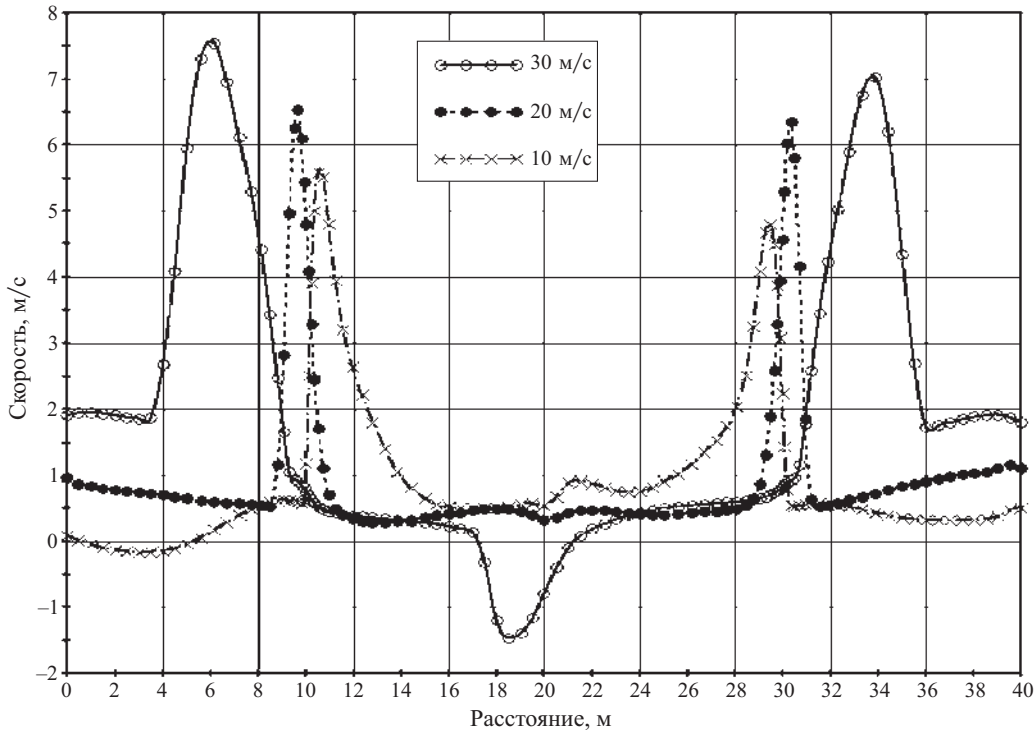

Рис. 9. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

соответственно. Профили скоростей приведены для момента времени 300 с от начала моделируемого процесса.

Из рис. 9 видно, что профили скоростей, соответствующие расстояниям между параллельно расположенными струйными вентиляторами 10 и 20 м, не имеют отрицательных значений в области помещения между этими вентиляторами, а профиль скорости, соответствующий расстоянию между параллельно расположенными струйными вентиляторами 30 м, имеет такие значения.

Из рис. 10 видно, что отрицательных значений не имеет только профиль скоростей, соответствующий расстоянию между параллельно расположенными струйными вентиляторами 10 м.

Из этого можно сделать вывод о том, что для эффективной работы системы струйной вентиляции расстояние между параллельно расположенными струйными вентиляторами при условиях данного эксперимента должно составлять 10 м.

3.3 Сравнение полученных результатов

Для проверки адекватности полученных в работе результатов было проведено их сравнение с аналитическими и численными расчетами других авторов [4, 11, 16], а также с экспериментальными данными [10, 12, 13].

Сравнение результатов проводилось для двух случаев. В первом случае рассматривалась работа системы струйной вентиляции на примере отдельно стоящего струйного вентилятора (рис. 11–14), во втором — двух параллельно расположенных струйных вентиляторов (рис. 15 и 16).

Аналитический расчет значений поля скорости затопленных турбулентных осесимметричных струй производился по формуле [4, 16]:

$$u^2 = U_\infty^2 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \left(\frac{k_{0i} D_i U_{0i}}{x - x_i} \right)^2 e^{-\frac{r_i^2}{k_i^2 (x - x_i)^2}},$$

где U_∞ — средняя скорость потока, м/с;

a_i, k_{0i}, k_i — модельные константы;

D_i — диаметр насадка, м;

U_{0i} — скорость при выходе из насадка, м/с;

x — координата по оси, м;

x_i — координата начала отсчета струи, м;

r_i — радиальная координата, м.

В ходе численных расчетов в работе [11] использовалась модель помещения автостоянки. Размеры моделируемых помещений, граничные и начальные условия задачи описываются в вышеуказанной работе. Величина тяги струйного вентилятора принималась равной 50 Н, а площадь поперечного сечения выбросного патрубка вентилятора — 0,09 м^2.

Условия проведения экспериментов в помещении закрытой автостоянки описываются в работе [10].

На рис. 11 и 12 показаны вертикальные профили скорости воздушного потока в плоскости оси

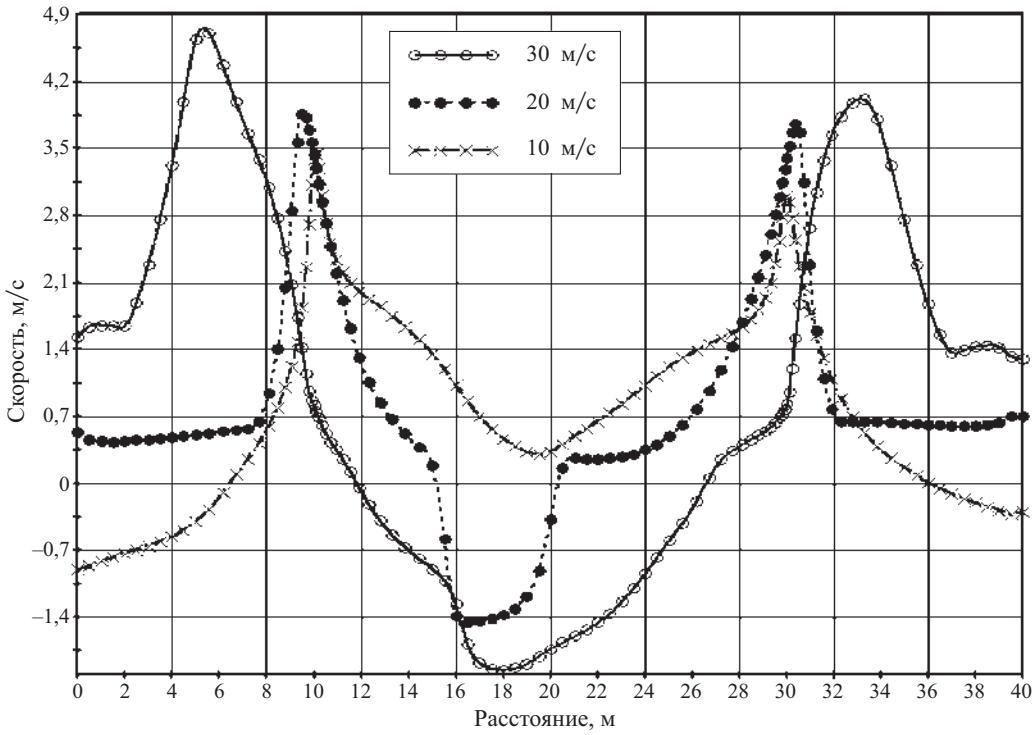

Рис. 10. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

вентиляторов на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка вентилятора соответственно. Расстояние по вертикали принято от потолка моделируемого помещения. Профиль с обозначением *result* соответствует профилю скорости, полученному в этой работе, *sim* — численному решению других авторов, *an* — аналитическому решению, *test* — показаниям в эксперименте. Эти же обозначения используются и на последующих рисунках.

На рис. 13 и 14 показаны горизонтальные профили скорости воздушного потока для плоскости, отстоящей от уровня потолка на 0,4 м, на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка вентилятора соответственно.

На рис. 15 и 16 показаны горизонтальные профили скорости воздушного потока для плоскости, отстоящей от уровня потолка на 0,4 м, на расстоянии 8 и 16 м от выбросного патрубка вентилятора соответственно. На нижеследующих рисунках рас-

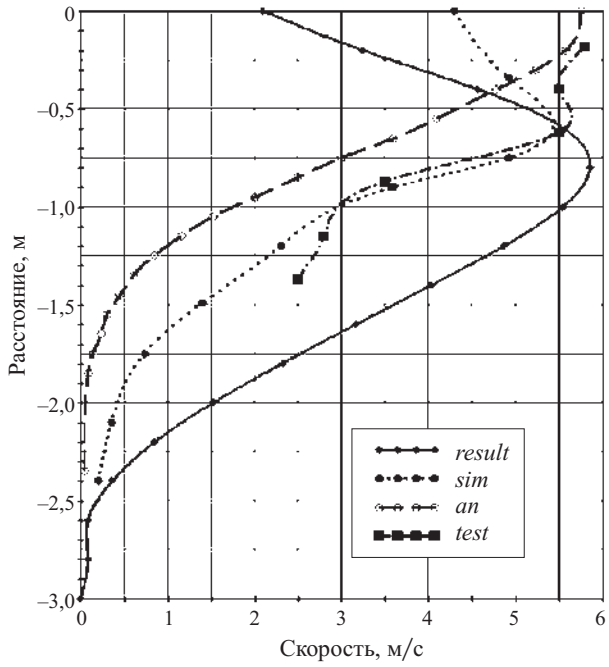

Рис. 11. Вертикальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

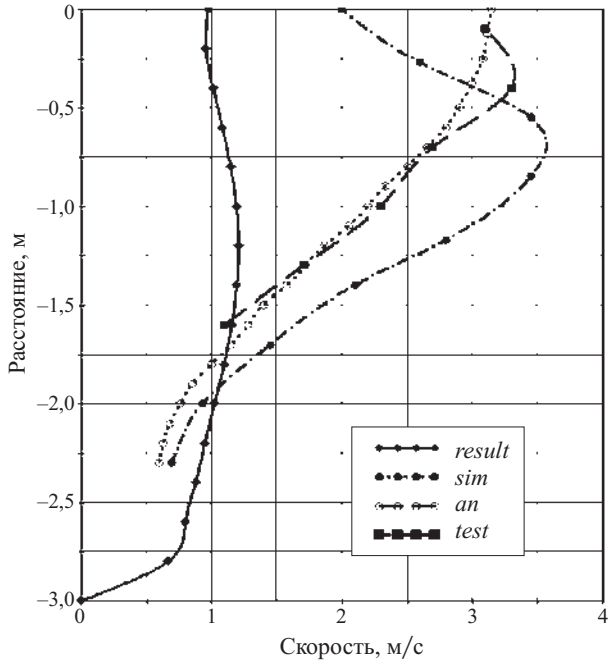

Рис. 12. Вертикальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

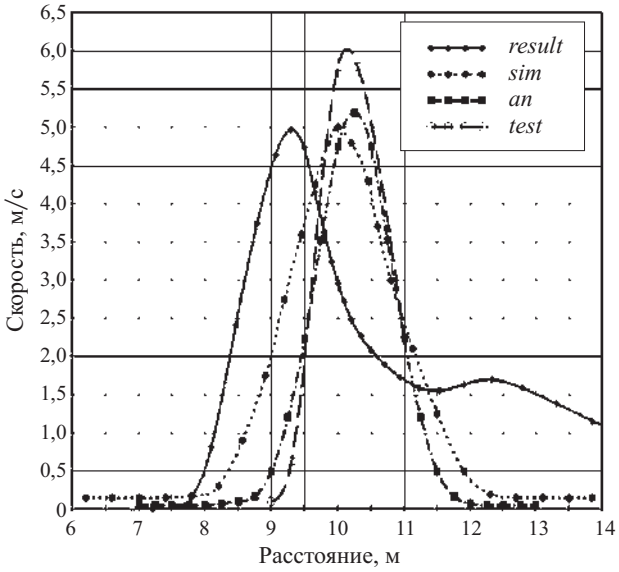

Рис. 13. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

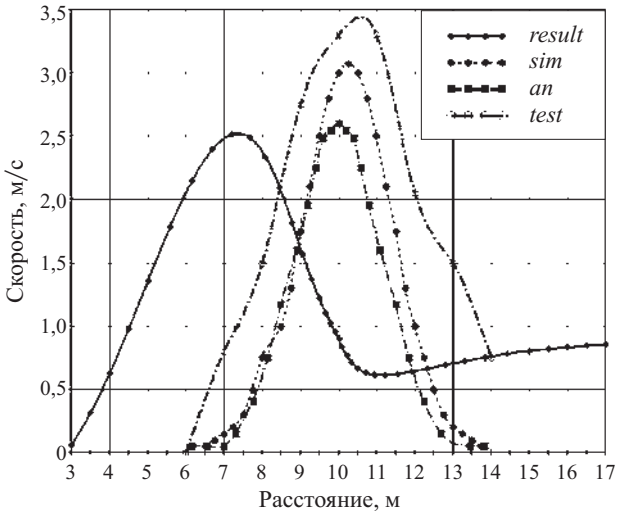

Рис. 14. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

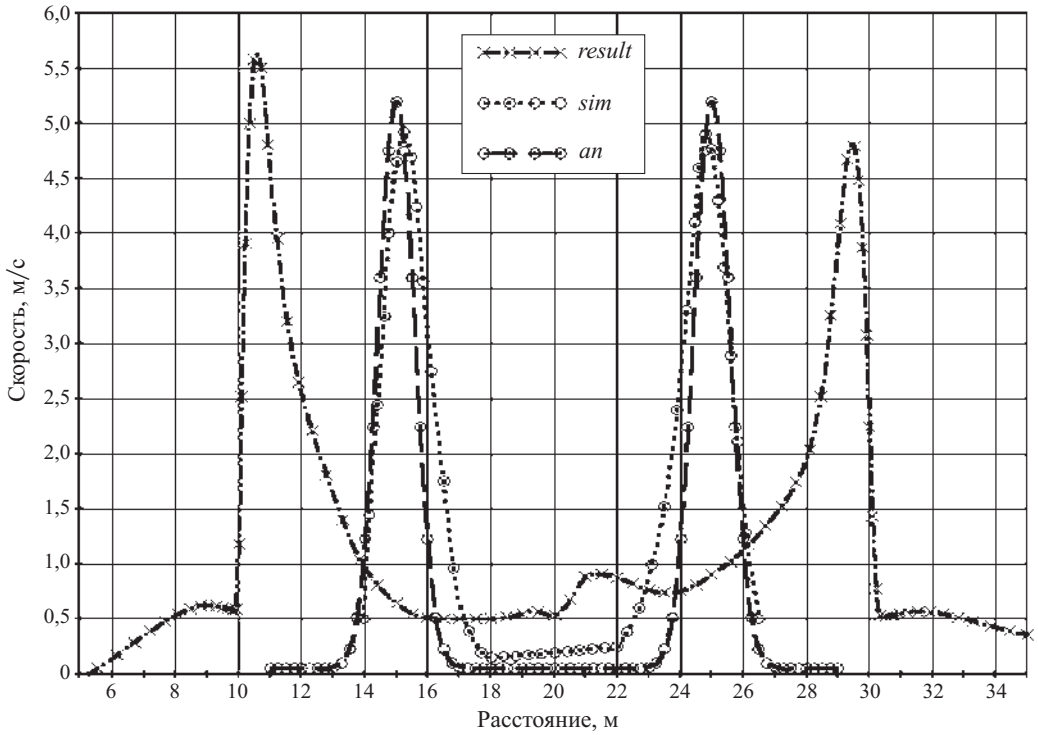

Рис. 15. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 8 м от выбросного патрубка вентилятора

сматривается работа системы струйной вентиляции на примере двух параллельно расположенных струйных вентиляторов.

На всех вышеприведенных рисунках наблюдается некоторое отличие в распределении и значениях скоростей воздушных потоков. Это отличие объясняется тем, что в тех задачах, откуда взяты данные для сравнения, не рассматривался и не учитывался очаг горения в отличие от задачи в данной публикации. Так, например, это заметно на рис. 12, на котором профиль скоростей *result* имеет несколько меньшие значения по сравнению с осталь-

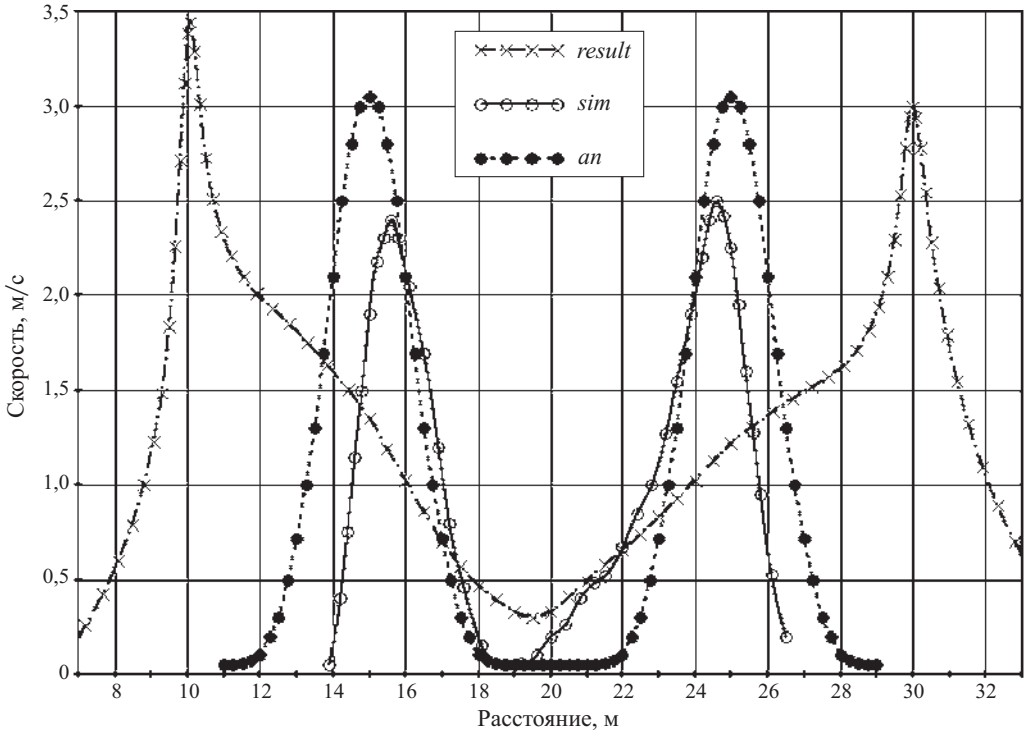

Рис. 16. Горизонтальные профили скорости воздушного потока на расстоянии 16 м от выбросного патрубка вентилятора

ными профилями. Или на рис. 15 и 16 в профиле скоростей *result* наблюдается смещение максимальных значений скоростей от центральной линии, так как между вентиляторами моделировалось горение автомобиля. В целом полученные авторами данные соответствуют данным из других работ. Картина работы системы струйной вентиляции, полученная на основе математического моделирования, согласуется с практической картиной.

Заключение

1. На основе математического моделирования было осуществлено исследование работы системы струйной вентиляции автостоянок закрытого типа.
2. Выявлены основные закономерности при работе системы струйной вентиляции автостоянок закрытого типа.
3. Установлены параметры, обеспечивающие эффективную работу системы дымоудаления и вентиляции автостоянки закрытого типа при помощи струйных вентиляторов.
4. Проведено сравнение полученных в работе результатов с аналитическими и численными расчетами других авторов, а также с экспериментальными данными. Эти результаты вполне согласуются с опубликованными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. — М.: Академия ГПС МВД России, 2000. — С. 115.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамика жидкостей. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 150.
3. Теснер П. А. Образование сажи при горении // Физика горения и взрыва. — 1979. — № 2. — С. 3–47.
4. Blevins R. D. Applied fluid dynamics handbook // Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
5. Daley B. B. Woods Practical Guide to Fan Engineering // Fläkt Woods Ltd, Colchester, 1978, 3rd Edition.
6. Heselden A. J. M. Studies of Fire & Smoke Behaviour Relevant to Tunnels // CP66/78 Fire Research Station, Watford, UK, 1978.
7. Hjertager B. H., Magnessen B. F. Computer simulation of flow, heat transfer and combustion in three-dimensional furnaces // Arch. combust. — 1982. — V. 2, № 1/2S. — P. 23–48.
8. Fläkt Woods Ltd. Technical data sheet. Car Park Jet Thrust Fan [Электронный ресурс] / Fläkt Woods. – Электронные данные. — Colchester: Fläkt Woods, 2007. http://www.flaktwoods.com.
9. Magnussen B. F. and Hjertager B. H. On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symp. (Int.) Combust. — The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1976. — P. 719–729.
10. Oerle, N. J. van, A. D. Lemaire, P. H. E. van de Leur, R. van Beek. The effectiveness of thrust ventilation in closed car parks. Fire tests and simulation. Version 2.1. — Delft: TNO, 1999.
11. Viegas J. C. The Use of Jet Fans to Improve the Air Quality in Underground Car Parks // Healthy Buildings 2006 Conference, Lisboa, Portugal, 2006.
12. Viegas J. C., Saraiva J. G. CFD Study of smoke control inside enclosed car parking // Interflam 2001, 9th International Fire Science & Engineering Conference. — Edinburgh: Interscience communications, 2001.
13. Viegas J. C., Saraiva J. G. Avaliação com recurso a CFD da aplicação de ventiladores de impulso a parques de estacionamento cobertos. Métodos Numéricos en Ingenieria V. — Madrid: SEMNI, 2002.
14. Welch S., Rubini P. SOFIE, Simulation of Fire in Enclosures: User Guide. — Cranfield University, England, 1996.
15. Wild J. A., Critchlow R. Fans in fire safety. Fume and smoke control in enclosed car parks. [Электронный ресурс] / FläktWoods, Fire Engineering Associates. — Электронные данные. — [England?]: Fire Engineering Associates, [2005?]. — (REF: FEA 001). http:// www.smoke-control.co.uk.
16. Viegas D. Xavier. Uma técnica de erosã aplacada ao estudo da interacção de jastos turbulentos com uma superficie plana. — Coimbra, 1981.

Поступила в редакцию 14.05.07.