

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 625.42 ÷ 622.445

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ДВУХПУТНЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ БЕЗ ПЕРЕГОННЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ КАМЕР

А. М. Красюк, И. В. Лугин, Е. Л. Алферова, Л. А. Кияница

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: krasuk@cn.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проведены исследования работы системы вентиляции метрополитена с двухпутным тоннелем. Показана существенная разница в требуемых расходах для вентиляции тоннелей и пассажирских помещений станций. Для штатных режимов работы обоснована продольная технологическая схема тоннельной вентиляции без устройства перегонных вентиляционных камер, что значительно снижает стоимость строительства вентиляционных сооружений метрополитенов. Определены колебания статического давления на наружной поверхности двух поездов при их встрече в тоннеле. Выполнены исследования аварийного режима работы тоннельной вентиляции при пожаре поезда в тоннеле и обоснована продольно-поперечная технологическая схема дымоудаления. Определены концентрации вредных веществ от пожарно-дымовых газов на пути эвакуации из аварийного поезда. Предложено устройство в тоннеле продольного экрана, которое позволяет обеспечить безопасные концентрации угарного и углекислого газа на путях эвакуации в обе стороны от аварийного поезда до станции.

Метрополитен, тоннельная вентиляция, двухпутный тоннель, аварийный режим, концентрация угарного газа, продольный экран

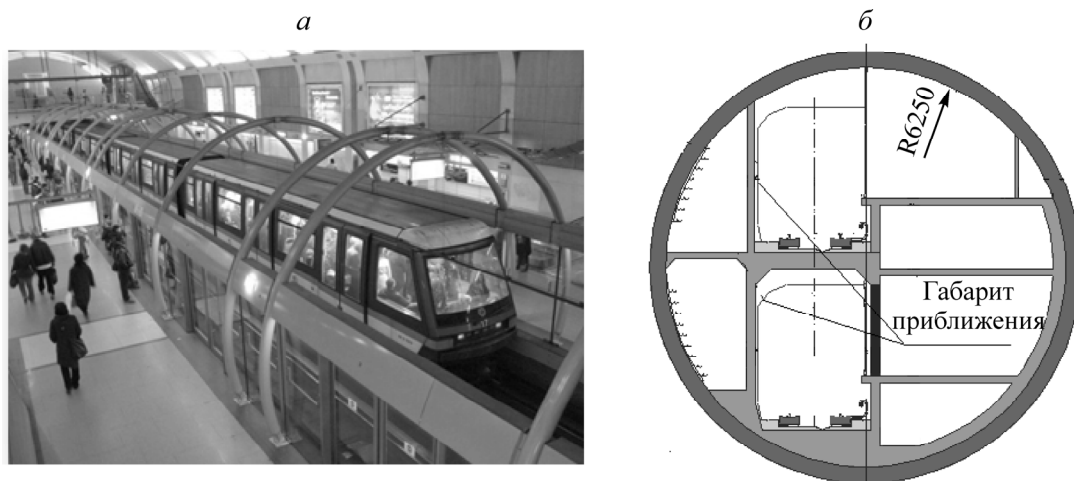
Современные мировые тенденции свидетельствуют об изменении конструктивных решений и способов строительства метрополитенов. Все чаще вместо двух однопутных тоннелей, традиционных для России и СНГ, применяют один двухпутный, проходимый щитом большого диаметра 8.9–12 м (табл. 1) [1].

ШТАТНЫЕ РЕЖИМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ

Эксплуатация линии метрополитена с двухпутным тоннелем требует новых подходов в проектировании тоннельной вентиляции. Известно, что до 2020 г. планируется пустить в эксплуатацию участки в Новосибирском (станции “Гусинобродская” и “Молодежная”), Московском (Кожуховская линия) и Екатеринбургском метрополитенах (вторая линия). Опыта эксплуатации таких линий метрополитенов в России нет, поэтому задачи разработки систем тоннельной вентиляции и режимов их работы актуальны. Как показывает мировой опыт эксплуатации, для метрополитенов с двухпутными тоннелями наиболее часто принимается отдельная вентиляция станционных пассажирских помещений и тоннелей [2]. При этом тоннель отделен от платформенного зала станции берегового типа сплошной перегородкой с автоматическими дверями (рис. 1). Это станция “закрытого типа”.

ТАБЛИЦА 1. Применение тоннельных проходческих комплексов (ТПК) большого диаметра для строительства перегонных тоннелей метрополитена

Город (страна)	Диаметр ТПК, м	Длина тоннеля, км
Дюссельдорф (Германия)	9.49	2.253
Порто (Португалия)	8.90	2.626
Мадрид (Испания)	9.37	33.106
Каир (Египет)	9.40	5.100
Хихон (Испания)	10.55	3.910
Рим (Италия)	9.755	6.950
Марсель (Франция)	9.755	1.965
Брешия (Италия)	9.150	5.344
Лион (Франция)	9.43	1.400
София (Болгария)	9.36	3.770
Сан-Паулу (Бразилия)	9.46	6.444
Барселона (Испания)	12.06 и 9.37	12.3 и 12.12

Рис. 1. Конструктивное исполнение станций: *а* — метрополитен в Париже, линия 14; *б* — размещением путей по принципу “Бокфлинт”

Наиболее существенное конструктивное отличие, влияющее на вентиляцию, состоит в том, что в двухпутном тоннеле поезд перекрывает площадь сечения, в два раза меньшую, чем в однопутном тоннеле. Это приводит к следующим очевидным преимуществам: снижается поршневое действие поездов и уменьшается “дутье” на станциях [3]. При этом повышается эффективность работы тоннельных вентиляторов, так как при продольной системе вентиляции аэродинамическое сопротивление участка тоннеля с поездом значительно ниже, чем в случае однопутного тоннеля. Пониженное аэродинамическое сопротивление двухпутных тоннелей ведет к снижению требуемого давления вентиляторов и к меньшей затрачиваемой электрической энергии на проветривание.

Анализ воздухораспределения в метрополитене и аэродинамических сопротивлений элементов тоннеля перегонов между станциями показал, что можно создавать систему тоннельной вентиляции без устройства перегонных вентиляционных камер [4]. В такой системе каждая станция оборудована двумя вентиляционными камерами тоннельной вентиляции, по одной на каждом торце станции (рис. 2). Это значительно снижает затраты на строительство метрополитена за счет уменьшения строительного объема подземных сооружений.

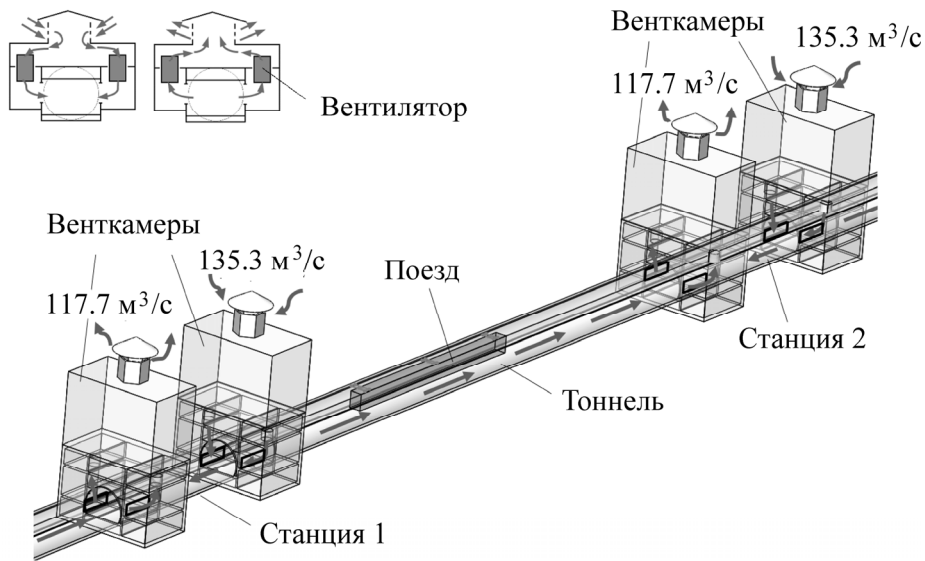


Рис. 2. Схема работы системы тоннельной вентиляции в штатном режиме с расходами воздуха через подающие и удаляющие вентиляционные камеры

К положительным аспектам такого решения системы вентиляции следует отнести: 1) отсутствие места под дополнительные строительные площадки и места под вентиляционные киоски перегонных вентиляционных камер, что особенно актуально в условиях плотной городской застройки; 2) повышение удобства обслуживания — венткамеры только на станции и доступны в любое время, что позволяет оперативно устранять неисправности. К отрицательным аспектам можно отнести необходимость дополнительных затрат по устройству вентотсека для реализации продольно-поперечной схемы вентиляции и оборудование его вентиляционными клапанами.

В такой системе вентиляции в каждой станционной камере находятся по два осевых тоннельных вентилятора, связанных воздушными клапанами с путевым отсеком тоннеля и с вентиляционным отсеком, расположенным в верхней части двухпутного тоннеля и служащим каналом дымоудаления. Расчет требуемого количества подаваемого воздуха на участке Новосибирского метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями закрытого типа “Гусинобродская” и “Молодежная” показал существенные различия в количестве требуемого воздуха на вентиляцию станций и тоннелей. Расчет проводился в соответствии с нормативными требованиями [5] для обеспечения трехкратного воздухообмена для пассажирских помещений станции, подачи не менее $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха на одного пассажира и удаления теплоизбытков. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Требуемый воздухообмен является расчетным для подбора вентиляционного оборудования и проектирования элементов системы тоннельной вентиляции.

ТАБЛИЦА 2. Требуемый расход воздуха на участке, включающем один перегон и одну станцию закрытого типа (условия Новосибирского метрополитена)

Критерий	Расход, м³/с	
	на станции	в тоннеле
Трехкратный воздухообмен	10.7	33.2
Расчет $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха на одного на пассажира	9.5	14.7
Удаление теплоизбытков	3.9	85
Требуемый (расчетный) расход воздуха	10.7	85

Расчет показывает необходимость разделения системы штатной вентиляции станции и тоннеля, так как требуемые расходы воздуха значительно различаются. Рассмотрим конструктивное исполнение метрополитена, при котором система вентиляции пассажирских помещений станции отделена от тоннельной вентиляции. Настоящая статья посвящена исследованию систем тоннельной вентиляции по схеме без перегонных венткамер.

Проведем анализ требуемых расходов воздуха для условий Московского метрополитена, как самого загруженного в Российской Федерации. В режиме максимальной загруженности его эксплуатационные параметры ограничены следующими значениями, вытекающими из нормативных требований (в том числе и строительных), конструкции станций и свойств метропоездов: частота движения поездов 40 пар/ч, скорость движения 90 км/ч, в поезде 8 вагонов. Результаты расчета представлены в табл. 3. Длина расчетного участка 1200 м (из них 1000 м — перегон, 200 м — станция).

ТАБЛИЦА 3. Требуемый расход воздуха в системе тоннельной вентиляции на участке, включающем один перегон и одну станцию закрытого типа (условия Московского метрополитена)

Критерий	Расход, м ³ /с
Трехкратный воздухообмен в 1 ч	39.8
Расчет 30 м ³ /ч воздуха на одного пассажира	59.4
Удаление теплоизбытков	117.7
Требуемый (расчетный) расход воздуха	117.7

На рис. 2 показана схема движения воздуха для штатного проветривания в условиях Московского метрополитена. Воздухораспределение в метрополитене осуществляется под действием таких источников давления, как механическая вентиляция (тоннельные вентиляторы), естественная тяга и поршневое действие поездов. В период интенсивного движения поездов действие естественной тяги незначительно по сравнению с двумя другими источниками давления, поэтому ее влиянием можно пренебречь [6].

Рассмотрим действие “поршневого эффекта”. Проведен численный эксперимент для исследования воздухораспределения на участке двухпутного тоннеля метрополитена длиной 1200 м. С одного до другого конца исследуемого участка тоннеля навстречу друг другу движутся метропоезда. При частоте движения 40 пар/ч на каждом перегоне в тоннеле одновременно находится два поезда. Схема поперечного сечения путевого отсека приведена на рис. 3.

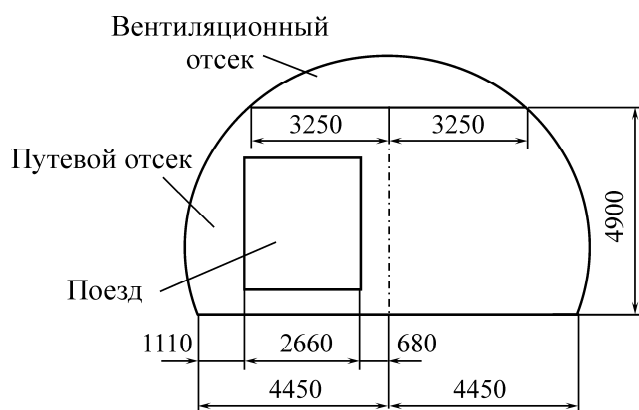


Рис. 3. Схема поперечного сечения путевого отсека двухпутного тоннеля метрополитена

В режиме движения поезда по участку тоннеля можно выделить следующие характерные фазы:
 — разгон поезда на участке длиной 100 м от состояния покоя до крейсерской скорости 90 км/ч, время разгона 8 с;
 — равномерное движение со скоростью 90 км/ч в течение 31.76 с;
 — торможение на участке длиной 200 м со скорости 90 км/ч до полной остановки, время торможения 16 с.

Общее физическое время численного эксперимента 55.76 с.

Рассматриваемый участок тоннеля — только часть протяженной линии метрополитена без перегонных камер. Для определения динамики воздухораспределения в тоннеле необходимо учесть аэродинамическое сопротивление линии метрополитена до и после исследуемого участка. Как показано в [6], аэродинамическое сопротивление потоку воздуха на разных участках существенно различается. В качестве допущения принято, что исследуемый участок тоннеля расположен на значительном удалении как от тупиковых, так и от пересадочных станций линии метрополитена, поэтому аэродинамическое сопротивление по обе стороны от исследуемого участка одинаковое.

Аэродинамическое сопротивление линии метрополитена представляет собой сложное параллельно-последовательное соединение участков. Можно выделить характерные сопротивления перегонного тоннеля, станционной венткамеры и пешеходных путей от платформы до дневной поверхности. Определено, что сопротивление линии метрополитена до и после исследуемого участка составляет $4.143 \cdot 10^{-3}$ кД.

Процессы тепло- и массообмена с точки зрения механики сплошных сред могут быть описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [7], уравнениями Навье–Стокса. В работе применена реализация модели аэродинамических процессов, вызванных возмущающим движением поезда в тоннеле, в программном пакете ANSYS Fluent.

Принято, что на порталах исследуемого участка есть только одномерное, направленное вдоль оси тоннеля сопротивление потоку воздуха. Потери давления в пористом теле, согласно [8]:

$$\Delta p = C_2 \Delta n \frac{1}{2} \rho V^2, \quad (1)$$

где C_2 — коэффициент потерь давления через пористое тело, отнесенный к единице ее толщины вдоль оси туннеля, м^{-1} ; Δn — толщина пористого тела вдоль оси Ox , м; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; V — скорость воздуха через пористое тело, м/с.

Коэффициент местного сопротивления пористого тела C_2 , пересчитанный на единицу его толщины вдоль оси тоннеля, при известном аэродинамическом сопротивлении сети R определится как

$$C_2 = \frac{2F^2 R}{\Delta n \rho}, \quad (2)$$

где F — площадь поперечного сечения тоннеля, м^2 ; R — аэродинамическое сопротивление, кД. Подставляя входные данные: $F = 42.7 \text{ м}^2$, $R = 0.0041425 \text{ кД}$, $\rho = 1.17 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\Delta n = 0.5 \text{ м}$, получим: $C_2 = [(2 \cdot 42.7 \cdot 0.0041425) / (0.5 \cdot 1.17)] \cdot 9.8 \approx 253$, где 9.8 — переводной коэффициент из мм вод. ст. в Па.

В рамках принятой $k\varepsilon$ -модели турбулентности для лучшего разрешения пограничного слоя значение y^+ (безразмерное расстояние от первого узла сетки до неподвижной стенки) должно находиться в пределах от 30 до 300 [9]. В результате расчета получено значение характерного размера пристеночной ячейки, равное 0.05 м. Качество построенной конечно-элементной сетки по критериям Orthogonal Quality не ниже 0.2, а Skewness — не выше 0.75, поэтому можно говорить об удовлетворительном разбиении модели на конечно-элементную сетку.

Для описания состояния тоннельного воздуха применена модель идеального газа. Согласно рекомендациям [9], выбрана модификация $k\varepsilon$ -модели турбулентности *k-epsilon Realizable* – *RKE* и неравновесная пристеночная функция *Non Equilibrium Wall Functions*. Граничные условия на порталах — давление окружающей среды 10^5 Па. Порталы закрыты пробками в виде пористого тела с коэффициентом сопротивления $C_2 = 253$ (в поперечном сечении повторяющими форму тоннеля) и толщиной 0.5 м — для моделирования сопротивления сети метрополитена. Для реализации нестационарной задачи с движущимся поездом использована динамическая сетка с полойным методом перестроения *Layering*.

Так как скорости движения воздуха меньше 0.1 числа Маха, то принята модель турбулентного течения слабосжимаемой жидкости. Опорные параметры: атмосферное давление 101 325 Па, температура воздуха 20 °С. Геометрические размеры тоннеля и поезда соответствуют реальным, с упрощением деталей, несущественно влияющих на аэродинамическое сопротивление движению потоков воздуха. Базовый размер ячеек 0.5 м, со сгущением до 0.25 м ближе к стенкам метropоездов. Задача решалась в нестационарной постановке. Время движения поездов по рассматриваемому участку 55.76 с. При расчете сделано 11 152 шага по 0.005 с каждый. Согласно расчету, встреча поездов происходит на 24-й секунде от начала движения. При распараллеливании вычислений на 72 ядрах задача решалась в течение 15 сут.

В результате проведенного численного расчета получены изменения параметров воздушных потоков на исследуемом участке тоннеля: поле скоростей и давлений в объеме тоннеля; поле статических давлений на поверхностях поезда; расходы воздуха на выходах из моделируемого участка тоннеля.

Рассмотрим влияние поршневого действия поездов на воздухораспределение в тоннеле. На рис. 4 показаны изменения расхода воздуха через поперечные сечения входов исследуемого участка при движении по тоннелю встречных поездов, а также баланс расхода воздуха, проходящего через тоннель. Вектор расхода имеет положительное направление, если направлен внутрь участка тоннеля.

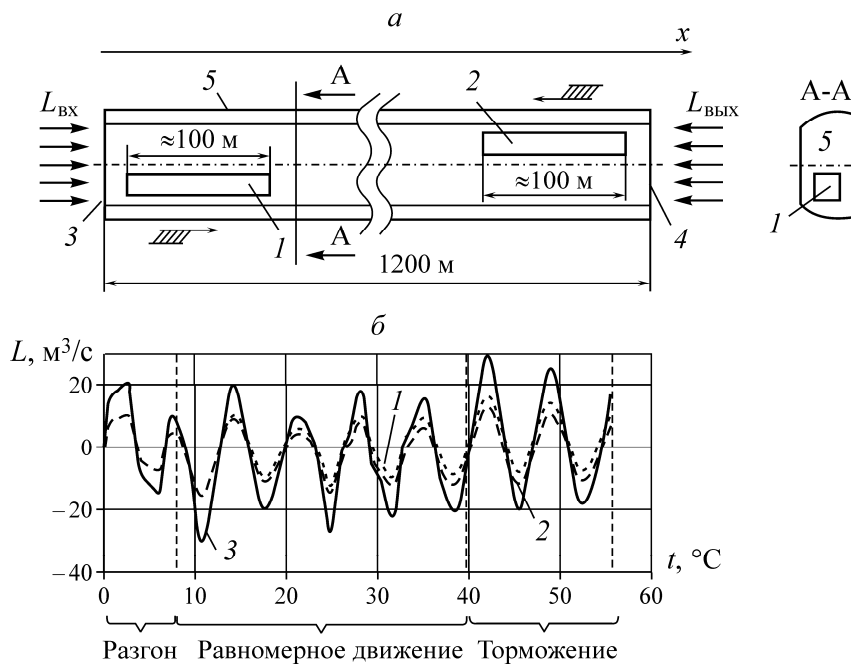


Рис. 4. Изменение расхода воздуха через поперечное сечение тоннеля на границах участка, $\text{м}^3/\text{с}$: *a* — 1, 2 — пятивагонные поезда; 3 — левый портал; 4 — правый портал; 5 — участок двухпутного тоннеля; *б* — 1 — $L_{\text{ВХ}}$ у левого входа, 2 — $L_{\text{ВЫХ}}$ у правого входа, 3 — L_{Σ} баланс расходов

Анализ воздушораспределения (рис. 4) в двухпутном тоннеле показывает, что встречное движение поездов не создает однонаправленного потока воздуха вдоль тоннеля и не оказывает существенного влияния на аэродинамический режим смежных с ним участков линий метрополитена. При этом на поверхностях поездов происходят значительные изменения статического давления, что может приводить к ухудшению самочувствия пассажиров и машинистов. Резкий перепад давления на стенке поезда передается во внутреннее пространство вагона и может негативно воздействовать как на пассажиров в вагоне метропоезда, так и на конструктивные элементы вагонов.

Статическое давление вычислялось на лобовой, хвостовой и боковой поверхностях поезда, результаты расчетов приведены на рис. 5.

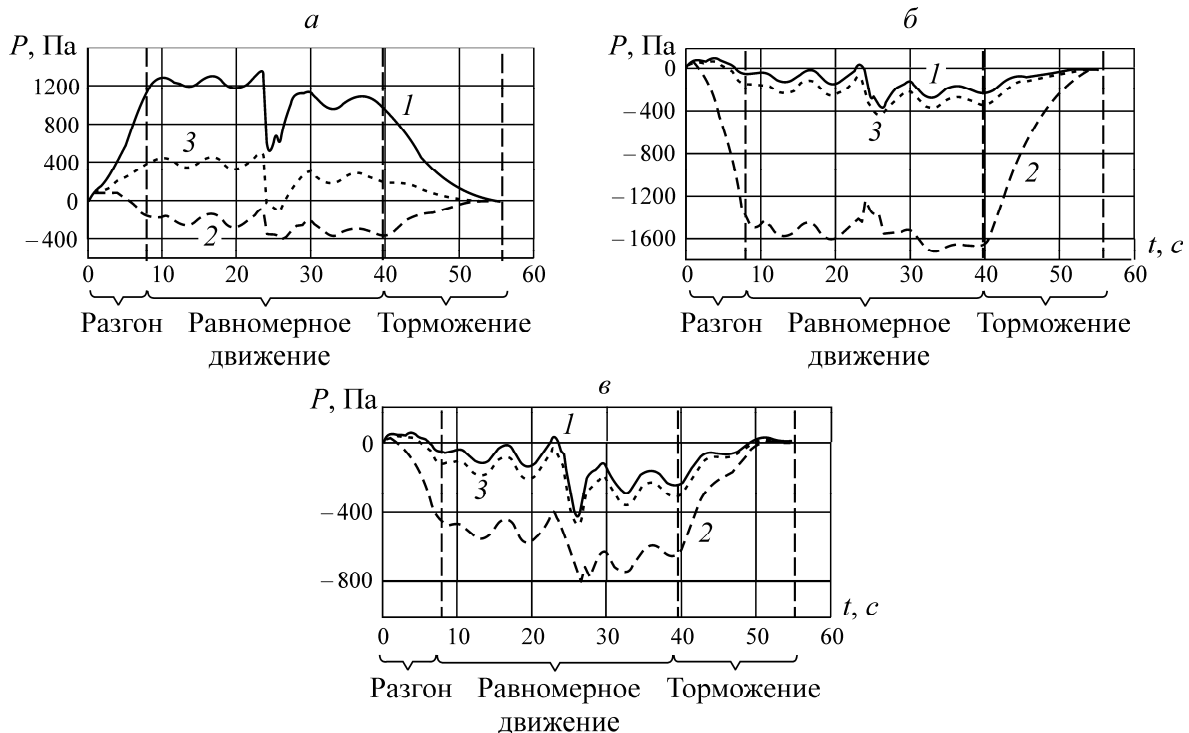


Рис. 5. Изменение статического давления на лобовой (а), хвостовой (б) и боковой (в) поверхностях второго вагона поезда (считая от головного): 1 — P_{\max} ; 2 — P_{\min} ; 3 — P_{cp}

На рис. 5а видно, что статическое давление на лобовой поверхности поезда в момент встречи двух поездов в тоннеле при $t = 24$ с резко падает до ~ 490 Па за промежуток времени 0.56 с. Скорость изменения давления составляет ~ 890 Па/с, или 6.7 мм рт. ст./с

Известно [10, 11], что при изменении давления окружающей среды более чем на 1 мм рт. ст. (133.3 Па) за 1 ч даже у здорового человека может появиться ухудшение самочувствия, сонливость, снижение трудоспособности, вялость в конечностях. Гораздо тяжелее скачки давления переносят люди с заболеванием соединительных тканей, болезнями сердца, с расстройствами центральной нервной системы. Поэтому перепад в 6.7 мм рт. ст. в течение 1 с для человека следует считать значительным. Особенно опасны скачки давления для машинистов метропоезда, поскольку при высокой частоте движения встречи поездов происходят на каждом перегоне.

Аналогичная картина на рис. 5б, в: на боковую и хвостовую поверхности метропоезда действует разрежение от 50 до 1700 Па. Здесь в момент встречи двух поездов также происходит изменение давления, но в течение более длительного интервала времени, чем на лобовой поверхности состава. Наиболее резкие изменения давления на хвостовой поверхности поезда составляют 300 Па/с, на боковой — 380 Па/с.

Таким образом, влияние поршневого действия поездов состоит в активном перемешивании воздуха в двухпутном тоннеле, но не способствует воздухообмену. Основная нагрузка по обеспечению подачи и удаления воздуха в тоннель ложится на тоннельную вентиляцию. Для создания этого воздухообмена определены требования к тоннельным вентиляторам по производительности на основе данных, приведенных в табл. 2 и 3. Проведен расчет аэродинамического сопротивления элементов вентиляционных сооружений и тоннеля для различных режимов работы вентиляторов. Выявлено, что аэродинамическое сопротивление вентиляционного отсека при прохождении через него требуемых расходов воздуха приводит к неоправданно завышенным значениям давления, развиваемого тоннельными вентиляторами, и завышенным эксплуатационным затратам на проветривание. Этого можно избежать при использовании путевого отсека для вентиляции по продольной схеме для штатного проветривания (см. рис. 2). Результаты сравнительных расчетов параметров вентиляторов для продольной схемы и продольно-поперечной (с использованием вентиляционного отсека) показывают, что требуемая мощность на проветривание в первом случае будет в 2.7 раза меньше.

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТОННЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Метрополитен с двухпутным тоннелем, как сложный технический объект, подвержен авариям, в том числе пожарам. Прогнозирование развития аварийной ситуации позволяет выработать технические решения, снижающие ее отрицательные последствия, и обосновать требования к оборудованию (в том числе вентиляционному), причастному к ликвидации аварии. Одно из наиболее опасных аварийных ситуаций в метрополитене — возгорание и остановка горящего поезда в тоннеле [6]. Опасность этого случая обусловлена большим скоплением пассажиров в непосредственной близости от очага возгорания, наличием единственного эвакуационного пути (тоннеля) и продолжительным временем эвакуации. Чтобы разработать эффективный план ликвидации аварии и повысить безопасность эвакуации пассажиров, нужно исследовать опасные факторы пожара: динамику температуры воздуха вблизи очага возгорания и изменение на путях эвакуации концентрации отравляющих веществ, выделяющихся при горении.

Время эвакуации устанавливается из расчета времени движения людского потока через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей [12]. Путь эвакуации начинается у последней двери горящего вагона и разделяется на участки: 1) от выхода из последней двери горящего вагона по тоннелю вдоль горящего вагона поезда до начала поезда; 2) проход по свободному тоннелю до безаварийного участка (рис. 6). Время движения потока эвакуирующихся по отдельным участкам пути τ_i вычисляют по [12]. Суммарное время эвакуации составляет $\tau_p = 468$ с: 120 с — по первому участку и 348 с — по второму.

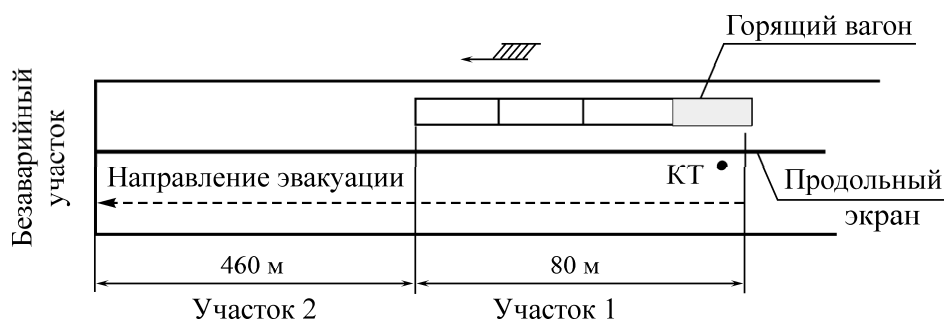


Рис. 6. Схема эвакуации пассажиров при возгорании крайнего вагона поезда на перегоне длиной 1000 м (горизонтальное сечение тоннеля); КТ — контрольная точка

При пожаре в двухпутном тоннеле к вентиляции предъявляется требование [5]: $V_p > V_{тр}$, где V_p — расчетная скорость воздуха в тоннеле при введении аварийного вентиляционного режима, м/с; $V_{тр}$ — скорость воздуха в тоннеле, требуемая для предотвращения распространения дыма навстречу вентиляционному потоку, м/с. Для двухпутного тоннеля наибольшая расчетная требуемая скорость составляет 2.07 м/с [5]. Следует отметить, что схема вентиляции аварийного режима принципиально отличается от схемы при штатном режиме работы. При пожаре поезда в тоннеле над горящим вагоном открываются люки 1, а на двух станциях, примыкающих к аварийному тоннелю, включаются на вытяжку вентиляционные камеры 3, которые соединены с вентиляционным отсеком 6 (рис. 7). Свежий воздух подается навстречу эвакуирующимся пассажирам по путевому отсеку через вентиляционные камеры 4, а задымленный воздух удаляется через вентиляционный отсек. Свежий воздух подается навстречу пассажирам вдоль путевого отсека, по которому осуществляется эвакуация.

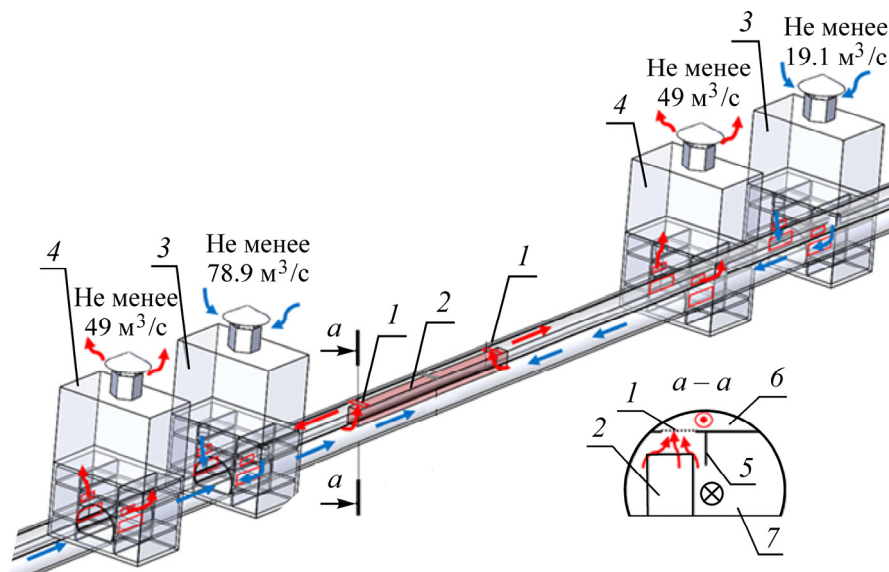


Рис. 7. Схема дымоудаления и подачи свежего воздуха при возгорании и остановке поезда на перегоне: 1 — люки в вентканал; 2 — аварийный вагон; 3 — подающая венткамера; 4 — удаляющая венткамера; 5 — продольный экран; 6 — вентканал дымоудаления; 7 — путевой отсек; А-А — поперечный разрез тоннеля; красным показано движение дыма, синим — свежего воздуха

Для исследования распределения концентрации пожарно-дымовых газов использовался модуль Flow Simulation программного комплекса SolidWorks. Задача описывается системой уравнений, в состав которой входит:

— уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} = -(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{\nabla p}{\rho} + \vec{f},$$

где \vec{v} — векторное поле скоростей; τ — время, с; ∇ — оператор Набла; Δ — векторный оператор Лапласа; ν — кинематическая вязкость, м²/с; $\rho(t)$ — плотность, кг/м³; $p(t)$ — давление, Па; \vec{f} — векторное поле массовых сил;

— уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_{ист},$$

где t — температура; a — теплопроводность; $q_{ист}$ — производительность источников тепла.

Гравитация моделируется уравнением $S_{\text{gravity}} = -\rho g_i$, g_i — i -я составляющая ускорения свободного падения, м/с².

Граничные условия для моделирования:

1) “на входе” в расчетную область:

— постоянная подача свежего воздуха навстречу эвакуирующимся с требуемой скоростью $V_{\text{тр}}$;

— постоянная подача свежего воздуха для обеспечения незадымления второго плеча тоннеля со скоростью $V_{\text{нз}}$;

— в аварийном вагоне — расход выделяющихся пожарно-дымовых газов (ПДГ) — смесь из воздуха, угарного и углекислого газов $L_{\text{ПДГ}}$ в зависимости от времени;

— там же поверхностный источник тепла W , выделяемого при сгорании обшивки вагона в зависимости от времени;

2) “на выходе” из расчетной области:

— на границах вентиляционного отсека задается давление, моделирующее действие тоннельных вентиляторов;

— в аварийном вагоне — расход воздуха, который участвует в реакции горения $L_{\text{возд}}$ в зависимости от времени.

В качестве исходных данных принимались проектные геометрические размеры путевого отсека двухпутного тоннеля, оборудованного вентиляционным отсеком, расчетное время эвакуации, экспериментальные данные по теплогазовыделениям и поглощению кислорода при горении вагона [12–15]. Исходные данные и параметры для моделирования: время эвакуации вдоль аварийного поезда 120 с, мощность тепловыделений W_i , Вт, при горении вагона; расход кислорода на поддержание горения L_{O_2} , кг/с, выделяющиеся расходы углекислого и угарного газов L_i^{CO} , $L_i^{\text{CO}_2}$, кг/с.

Тепловая мощность горения вагона $W = Q\mu_i g_{\text{O}_2}$, Вт, где Q — теплотворная способность горючих материалов вагона на единицу массы израсходованного на горение кислорода для большинства материалов практически одинакова и может быть принята равной 13 940 кДж на 1 кг израсходованного на горение кислорода [14, 15]; μ_i — скорость выгорания вагона за промежутки времени $\Delta\tau_i$, кг/с; g_{O_2} — масса кислорода, расходуемая на горение материалов, кг/кг.

В конструкции и отделке вагонов, эксплуатирующихся в метрополитенах РФ, используется значительное количество горючих материалов. Начальная масса горючих материалов вагона рассчитывается по [16]: $M = F \cdot q$, где $q = 35$ кг/м² — пожарная нагрузка [17]; $F = 39$ м² — площадь пола вагона; $M = 39 \cdot 35 = 1\,365$ кг. Используя зависимость [18] изменения массы вагона метро m_i по времени горения, находим значения скоростей выгорания вагона, кг/с:

$$\mu_i = \frac{M(m_{i+1} - m_i)}{\Delta\tau_i}.$$

Расход воздуха, участвующего в горении, выделяющиеся расходы угарного и углекислого газов можно определить как:

$$\frac{L_{\text{O}_2}}{0.2315} = \frac{\mu_i g_{\text{O}_2}}{0.2315}, \quad L_{\text{CO}} = \mu_i g_{\text{CO}}, \quad L_{\text{CO}_2} = \mu_i g_{\text{CO}_2},$$

где 0.2315 — массовая доля кислорода в воздухе [19]; $g_{\text{CO}_2} = 9.72$, $g_{\text{CO}} = 0.47$ — выделение соответственно угарного и углекислого газов из 1 кг материала в процессе горения, кг/кг, $g_{\text{O}_2} = 12.11$ кг/кг [13].

Расход выделяющихся за промежутки времени $\Delta\tau_i$ пожарно-дымовых газов:

$$L_{\text{ПДГ}} = L_{\text{возд}} + L_{\text{СО}} + L_{\text{СО}_2}.$$

Рассчитанные значения, необходимые для моделирования процесса горения вагона электропоезда в двухпутном тоннеле, приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Тепловая мощность, поглощение воздуха и выделение пожарно-дымовых газов в различные моменты процесса горения вагона

Момент времени τ , с	Тепловая мощность W , кВт	Расход, кг/с	
		воздуха $L_{\text{возд}}$	выделяемых ПДГ* $L_{\text{ПДГ}}$
0	0	0	0
85	8640	2.68	3.2
120	7977	2.47	2.95

*Из них доля по массе: воздуха — 0.8325, углекислого газа — 0.16, угарного газа — 0.0075

Назначим точку, в которой будем контролировать концентрацию вредных веществ. Она определяется из следующих условий: 1) должна находиться на высоте 2 м от уровня головки рельсов — на верхнем краю зоны для стоящего человека [20]; 2) на расстоянии 1.4 м от стенки горящего поезда, что соответствует минимальному расстоянию от стенки вагона до границы пути эвакуации; 3) в месте с наиболее высокими концентрациями отравляющих веществ — на оси симметрии предпоследнего окна горящего вагона. Этим условиям удовлетворяет точка КТ (рис. 6, 8).

На рис. 8 представлены результаты исследования распределения объемной концентрации угарного газа в тоннеле (столбец “без продольного экрана”). Видно, что в сечениях 3–3 и 4–4, концентрации угарного газа достигают опасных значений. Для снижения концентрации СО и СО₂ на пути эвакуации предложено устройство продольного экрана в путевом отсеке, разделяющего его верхнюю часть [21]. Проведен численный эксперимент по определению концентраций вредностей на пути эвакуации, но с продольным экраном (рис. 8, столбец “с продольным экраном”).

Углекислый газ в концентрации до 500 ppm входит в норму дыхания человека. При содержании углекислого газа в воздухе свыше 20 000 ppm (линия 1, рис. 9а) наблюдаются признаки отравления — головная боль, повышенная сонливость, слабость [22]. Наиболее опасным фактором пожара в данном случае является угарный газ. Признаки отравления при воздействии угарного газа на организм проявляются при содержании его во вдыхаемом воздухе от 940 ppm (линия 1, рис. 9б). Отмечаются нарушения работы органов чувств, головная боль, угнетение дыхания, обмороки [22], т. е. невозможность движения по пути эвакуации.

На рис. 9 показано изменение опасных для здоровья человека концентраций углекислого и угарного газов в контрольной точке тоннеля без продольного экрана и при его использовании. Продольный экран позволяет значительно снизить значения концентраций опасных факторов пожара на пути эвакуации пассажиров вдоль горящего вагона в течение всего времени движения пассажиров вдоль поезда (время эвакуации по первому участку (см. рис. 6). При этом нижняя кромка экрана находится на одном уровне с верхом дверных и оконных проемов вагонов, т. е. экран не будет создавать пассажирам затруднений при выходе из поезда на пути эвакуации. Без применения продольного экрана концентрация углекислого газа превышает допустимую через 38 с от начала пожара, а угарного газа — через 35 с.

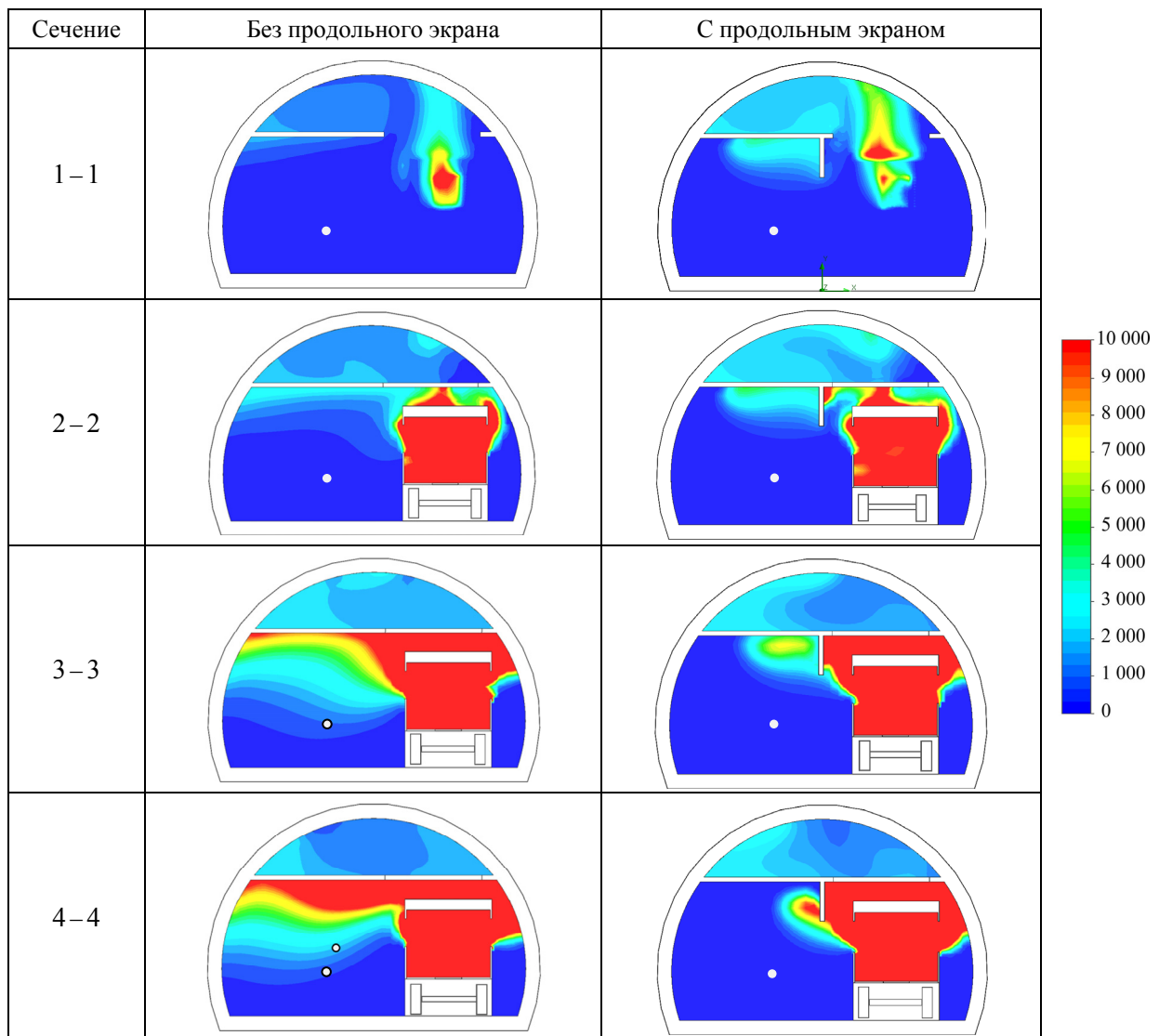
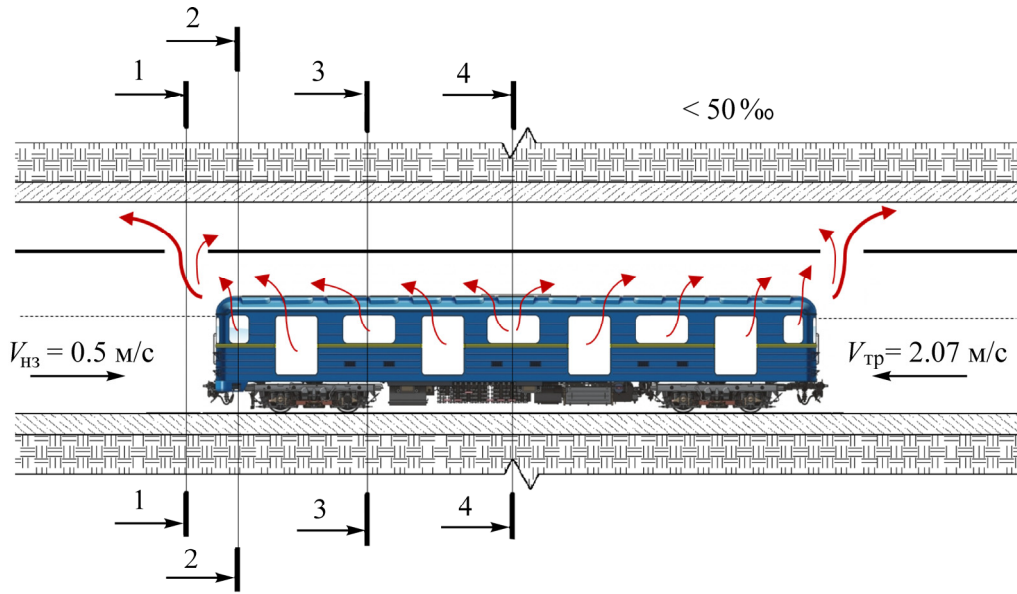


Рис. 8. Объемная концентрации угарного газа в сечениях 1–4 в тоннеле без продольного экрана и с экраном в конце расчетного интервала времени: ○ — точка КТ

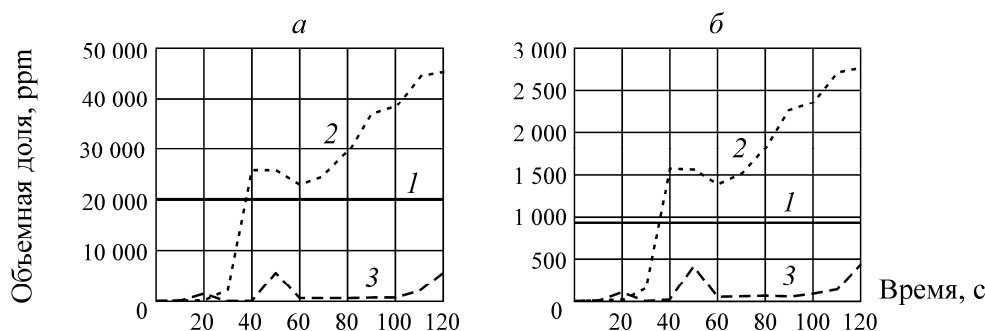


Рис. 9. Опасные факторы пожара в контрольной точке: *а* — углекислый газ; *б* — угарный газ; *1* — предельно допустимая объемная доля; *2* — без продольного экрана; *3* — с экраном при высоте его установки 3.06 м от уровня головки рельса

ВЫВОДЫ

Обоснована технологическая схема вентиляции для двухпутного тоннеля без перегонных вентиляционных камер: венткамеры устанавливаются с обоих торцов станции и оборудуются двумя вентиляторами каждая. В верхней части тоннель оборудуется перекрытием, разделяющим его на путевой и вентиляционный отсеки. В штатном режиме схема работы системы вентиляции продольная: движение воздушного потока осуществляется только по путевому отсеку. Это обусловлено более низким аэродинамическим сопротивлением путевому отсеку по сравнению с вентиляционным и значительно меньшими затратами энергии на проветривание. В аварийном режиме работы тоннельной вентиляции применяется продольно-поперечная схема, при которой свежий воздух подается по путевому отсеку навстречу эвакуирующимся, а удаляется через люки, расположенные над аварийным поездом, и далее по вентиляционному отсеку.

Определяющим критерием для выбора оборудования тоннельной вентиляции метрополитена с двухпутным тоннелем является количество воздуха, необходимое для выноса теплоизбытков. Для максимально полного режима эксплуатации (частота поездов 40 пар/ч, 8 вагонов в поезде, скорость движения 90 км/ч) требуемый воздухообмен с участка “станция – перегон” составляет 117.7 м³/с.

При движении двух поездов на перегоне двухпутного тоннеля образуется внутренний циркуляционный контур, который замыкается внутри перегона, поэтому влияние поршневого действия поездов на воздухообмен за пределами перегона несущественно. Подачу свежего и удаление нагретого отработанного воздуха с перегона необходимо осуществлять тоннельными вентиляторами, так как поршневого действия поездов недостаточно для обеспечения требуемого воздухообмена.

Устройство продольного экрана в двухпутном тоннеле позволяет избежать появления отравляющих продуктов горения в опасной концентрации в окрестностях очага горения за все время эвакуации из аварийного поезда, а также осуществлять эвакуацию в любую сторону (до ближайшей станции) от очага горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков А. Ю. Технология строительства двухпутного перегонного тоннеля Санкт-Петербургского метрополитена // Метро и тоннели. — 2011. — № 2. — С. 8–9.
2. Фролов Ю. С. Опыт и перспективы развития транспортной инфраструктуры Испании // Метро и тоннели. — 2012. — № 3. — С. 1–9.
3. Krasnyuk A. M., Lugun I. V., Pavlov S. A. Circulatory Air Rings and Their Influence on Air Distribution in Shallow Subways, Journal of Mining Science, 2010, Vol. 46, Issue 4. — P. 431–437.

4. Пат. 2556558. Способ вентиляции метрополитена / А. М. Красюк, И. В. Лугин, С. А. Павлов, В. И. Романов, Г. А. Мельник // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 19.
5. СП 120.13330.2012. Метрополитены. — Введ. 2013.01.01. — М.: Минрегион России.
6. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006. — 164 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
8. ANSYS Fluent User's Help, Version 14.57.
9. Батурин О. В., Батурин Н. В., Матвеев Н. В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2009. — 151 с.
10. Погодные факторы во влиянии на здоровье человека: атмосферное давление. URL: <http://meteorpathy.ru/meteofactory/pogodnye-factory-vo-vliyanii-na-zdorove-cheloveka-atmosfernoe-davlenie> (дата обращения 15.01.2015).
11. Белов С. В., Ильницкая А. В., Козьяков А. Ф. и др. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов. — М.: Высш. шк., 2007. — 616 с.
12. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. — Введ. 1992-07-01. — М.: Изд-во стандартов.
13. Красников А. В., Кулев Д. Х., Федоров А. И., Гитцович А. В. Состав продуктов горения основных материалов вагонов метрополитена // Противопожарная защита подземных сооружений метрополитенов: сб. науч. тр. — М.: ВНИИПО, 1986. — С. 5–8.
14. Huggett C. Estimation of the rate of heat release by means of oxygen consumption, Journal of Fire and Flammability, 1980, No. 12. — P. 61–65.
15. Ingason H., Gustavsson S., Dahlberg M. Heat release measurements in tunnel fires, Brandforsk Project 723-924. SP Swedish National Testing and Research Institute, 1994.
16. ГОСТ Р 50850-96. Вагоны метрополитена. Общие технические условия. — Введ. 1996-01-17. — М.: Изд-во стандартов.
17. НПБ 109-96. Вагоны метрополитена. Требования пожарной безопасности. Введ. 1997-01-01 [Электронный ресурс]: Техэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. — режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50850-96>, свободный.
18. Ильин В. В. Необходимое время эвакуации // Сб. науч. тр. “Борьба с пожарами в метрополитенах”. — М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. — С. 13–31.
19. Глизманенко Д. Л. Кислород и его получение. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1951. — 346 с.
20. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 2013.01.01. [Электронный ресурс]: Техэксперт. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. — режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095527>, свободный.
21. Алферова Е. Л., Лугин И. В. Использование линейного экрана для снижения действия опасных факторов пожара при горении поезда в двухпутном тоннеле метрополитена // Сб. науч. тр. IV Междунар. науч. конф. “Актуальные проблемы механики и машиностроения”. — Алматы, 2014. — С. 90–97.
22. Лазарев Н. В., Гадаскина И. Д. Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. — Л.: Химия, 1977. — 608 с.

Поступила в редакцию 12/IV 2016