

## РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 624.191.5+624.191.24

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ТОННЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНОВ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

**Н. А. Попов, А. М. Красюк, И. В. Лугин,  
С. А. Павлов, Д. В. Зедгенизов**

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

Представлены результаты натурных экспериментов по определению температур обделки тоннеля и прилегающего грунта для метрополитена мелкого заложения при эксплуатации в условиях резко континентального климата. Приведены результаты математического моделирования потоков воздуха в системе тоннельной вентиляции. Разработаны рекомендации для архитектурного исполнения путей эвакуации из платформенного зала станции метрополитена. Предложена система управления расходом воздуха на участке вентиляционной сети, состоящая из канала регулирования производительности станционного вентилятора и канала управления расходом воздуха в тоннеле.

*Метрополитен мелкого заложения, тоннель, грунт, температура, теплообмен, воздухораспределение, горение поезда, дымоудаление, система управления, регулятор расхода воздуха*

#### ВВЕДЕНИЕ

В России постоянно увеличивается доля метрополитенов мелкого заложения в общем объеме их строительства. К ним относятся Новосибирский, Нижегородский, Самарский, Казанский и др. Многие вводящиеся в эксплуатацию перегоны и станции Московского метрополитена также имеют мелкое заложение. Задача разработки эффективной системы тоннельной вентиляции таких объектов существенно отличается от условий глубокого заложения, особенно для холодного периода года. Известно [1], что одна из основных функций тоннельной вентиляции состоит в удалении теплоизбытков, основным источником которых являются поезда. Поэтому в строительных нормах [2] говорится, что системы тоннельной вентиляции следует проектировать с учетом годового теплового баланса, обеспечивающего допустимые параметры температуры и относительной влажности воздуха и минимально возможный рост температуры окружающих грунтов. Для решения данной задачи необходимо знать изменения температуры воздуха, обделки тоннелей и прилегающего массива грунтов на протяжении достаточно длительного периода времени.

Одной из основных технологических особенностей вентиляции метрополитена являются движущиеся по тоннелям-воздуховодам поезда. В штатных режимах на параметры вентиляции метрополитена значительное влияние оказывает их поршневое действие — “поршневой эффект” [1]. В метрополитенах мелкого заложения на территориях с резко континентальным климатом в холодный период года тоннельные вентиляторы отключают, чтобы не переохла-

дить подземные сооружения атмосферным воздухом, имеющим отрицательную температуру. В этот период вентиляция тоннелей и станций осуществляется в основном за счет поршневого действия поездов. Поэтому при проектировании тоннельной вентиляции необходимо учитывать результаты расчета воздухораспределения, вызванного поршневым действием поездов.

С целью обеспечения безопасной эвакуации пассажиров и персонала необходимо исследовать режимы работы тоннельной вентиляции метрополитена при возгорании поезда в путевом тоннеле или на станции. Прогнозирование развития аварийной ситуации позволяет:

— выработать технические решения и план ликвидации аварии, которые снизят ее отрицательные последствия;

— обосновать требования к оборудованию, участвующему в процессе ликвидации аварии.

Следует заметить, что расчет аварийного вентиляционного режима достаточно сложен, так как необходимо учитывать большое количество переменных параметров. Например, реверсирование воздушного потока ведет к изменению значений аэродинамических сопротивлений элементов вентиляционной сети, наличие поездов в тоннеле и их месторасположение на перегоне существенно влияют на вентиляционные параметры системы. Значительное влияние на воздухораспределение оказывает пожарная тепловая депрессия, переменная по времени развития пожара. Для обеспечения безопасного передвижения пассажиров через пути эвакуации необходимо обеспечить: приток свежего воздуха со скоростью не менее 1.3 м/с, приток воздуха на станцию из смежных тоннелей со скоростью 0.5 м/с, перепад давления на наклонных участках путей эвакуации не менее 1 Па (для пересадочных станций нижнего уровня не менее 4 Па) [3, 4].

Проветривание метрополитенов характеризуется неравномерностью выделения преобладающих вредных компонентов. Это определяет требуемое количество воздуха, которое может изменяться в несколько раз, а периодичность колебаний потребности может составлять от нескольких месяцев до нескольких минут. Без суточного регулирования вентиляторов при их круглосуточной работе со 100 %-й расчетной производительностью перерасход электроэнергии составит 42–68 % [1]. Экономичное управление проветриванием станций метрополитенов мелкого заложения при соблюдении требований к микроклимату подземных сооружений может быть достигнуто взаимосвязанным изменением режима работы станционного вентилятора и регулятора воздухораспределения (РВ), установленного в тоннеле непосредственно перед его выходом на платформу станции.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТА

Институт горного дела СО РАН совместно с Новосибирским метрополитеном с 2004 г. проводит натурные исследования температурных процессов на перегоне между станциями “Площадь Гарина-Михайловского” – “Сибирская”. Профиль этого перегона и схема расположения датчиков для измерения температуры тоннельного воздуха, обделки тоннеля и грунта, показаны на рис. 1, 2.

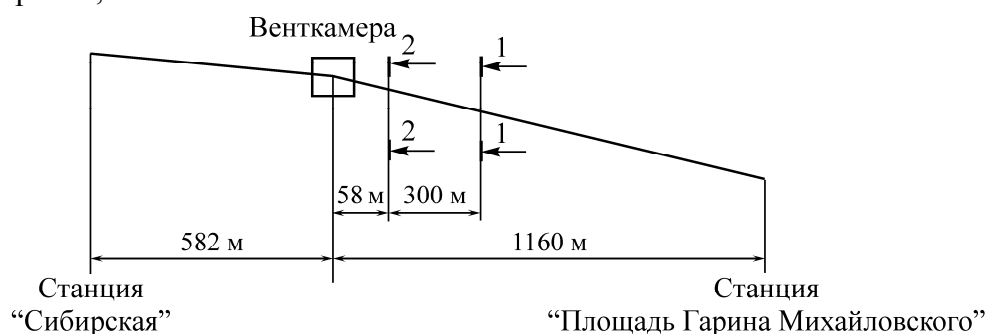


Рис. 1. Профиль перегона: 1–1 и 2–2 — места расположения измерительных пунктов

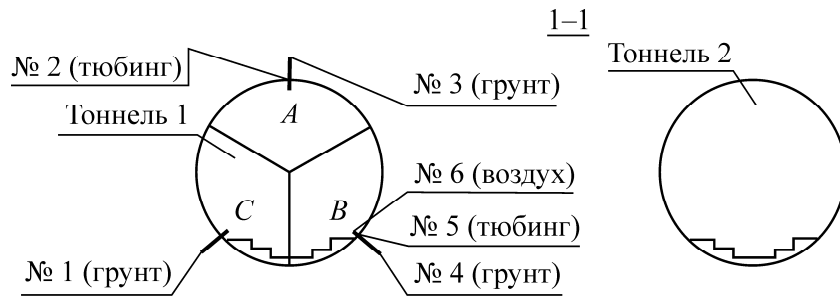


Рис. 2. Схема расположения датчиков температуры воздуха, обделки тоннеля и грунта в измерительном пункте 1–1

В качестве измерительной аппаратуры используется прибор “Термодат-26М1”. Установленные датчики температуры имеют погрешность от 0.6 до 0.2 °С. Датчики температуры грунта заглублены на расстояние 1.2 м от внутренней поверхности тубинга. Измерения всеми датчиками проводятся одновременно с интервалом 60 мин. Измеренные значения сохраняются в запоминающем устройстве “Термодат-26М1”. Один раз в три месяца информация переносится на ЭВМ через стандартный USB порт.

#### АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРУНТОВ

Проведен анализ графиков изменения температуры грунта (рис. 3) в измерительном пункте 1 – 1 за период с января 2008 по ноябрь 2010 г. Датчик № 3 располагается над тоннелем и находится на глубине 7.6 м от дневной поверхности. Максимальную температуру 15.4 °С датчик регистрирует в ноябре – декабре, когда прогретый за летний период грунт дополнительно ассимилирует тепло из тоннеля (нагревается за счет теплопоступлений от систем отопления со времени начала отопительного сезона). Отопительный сезон в Новосибирском метрополитене начинается 15 сентября. Подогретый воздух поднимается к верхнему своду тоннеля, нагревает верхние тубинги и грунт. К этому времени верхний слой грунта еще не промерз на большую глубину, чтобы существенно повлиять на температуру в окрестностях верхних тубингов тоннеля [1]. Наименьшую температуру 12 °С датчик температуры грунта № 3 показывает в мае. Согласно мониторингу, колебания температуры грунта над верхним сводом тоннеля находятся в пределах 3.6 °С.

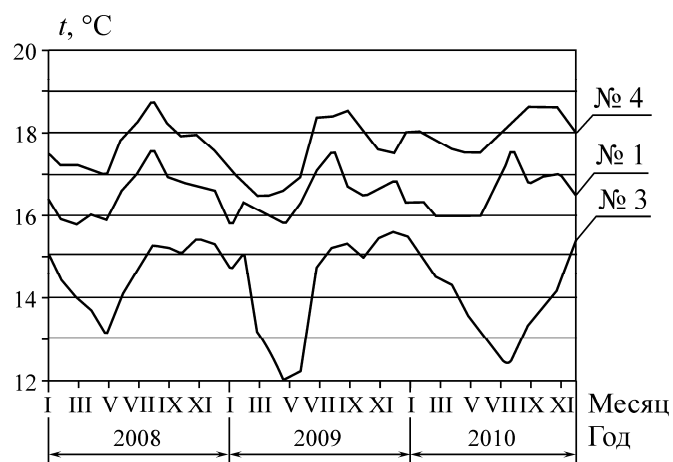


Рис. 3. Изменение температуры грунта за период с января 2008 по ноябрь 2010 г.: № 1, 3, 4 — номера датчиков в соответствии с рис. 2

Датчики № 1 и 4 показывают более стабильную температуру, чем датчик № 3. Амплитуда колебаний температуры грунта у этих датчиков в течение года находится в пределах 1.7–2.1 °С. Причем температура грунта между тоннелями (датчик № 4) на 1.5 °С выше, чем температура грунта с “внешней” стороны тоннеля. Это объясняется стабилизирующим тепловым влиянием обеих тоннелей на массив грунта, расположенный между ними.

**ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС В ТОННЕЛЕ**

Данные мониторинга температуры грунта и обделки тоннеля позволяют определить величину теплового потока по радиальному направлению в поперечном сечении тоннеля на 1 пог. м его длины в зависимости от периода года:

$$N = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\pi} \left( \ln \frac{\lambda_T R_{TG}}{R_T} + \ln \frac{\lambda_G R_G}{R_{TG}} \right)},$$

где  $N$  — тепловой поток, Вт/м;  $\Delta t = t_T - t_G$  — разность температуры тубинга и грунта, °С;  $\lambda_T = 2.04$  — коэффициент теплопроводности железобетонного тубинга, Вт/(м·°С);  $\lambda_G = 1.28$  — коэффициент теплопроводности грунта;  $R_T = 2.56$  — расстояние от оси тоннеля до датчика температуры в тубинге, м;  $R_{TG} = 2.85$  — расстояние от оси тоннеля до границы между тубингом и грунтом, м;  $R_G = 3.55$  — расстояние от оси тоннеля до датчика температуры грунта, м.

На рис. 4 показано изменение мощности теплового потока из тоннеля метрополитена в грунт. Обозначение кривых  $A, B, C$  соответствует секторам тоннеля (рис. 2), кривой  $M$  — среднему значению теплового потока.

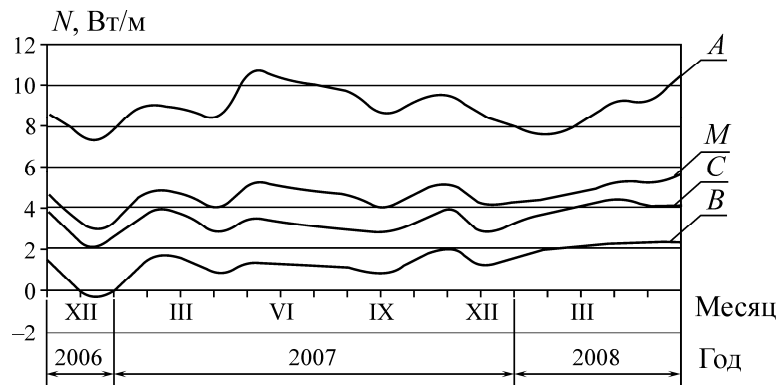


Рис. 4. Изменение мощности теплового потока

Зная зависимость изменения теплового потока в течение года, можно рассчитать режим работы тоннельной вентиляции для обеспечения теплового баланса с учетом ассимиляции грунтом избыточного тепла в тоннеле метрополитена мелкого заложения. Тепловой баланс для станций и тоннелей существенно различается. Это обусловлено неравномерностью тепловыделений от поездов, так как участки разгона и торможения находятся в окрестностях станций, и условиями отопления и теплоснабжения в зимний период. При отоплении тепло попадает сначала на станции, а от них подается в тоннели.

Как видно на рис. 4, в течение года теплопередача в грунт составляет примерно 4.5 Вт на 1 пог. м тоннеля. Следует отметить также существенную неравномерность теплопередачи различными участками тоннеля. Верхний свод тоннеля отдает тепла в 4 раза больше, чем нижние

участки. В [5] показано, что в разные периоды года значимость факторов, влияющих на тепловой баланс в тоннелях, не одинакова. В холодный период с декабря по апрель количество поступающего в тоннель тепла определяется тепловыделением поездов и теплоснабжением станций. Удаление тепла осуществляется в основном поршневым действием поездов. С мая по сентябрь основными факторами, влияющими на тепловой баланс, являются поршневое действие поездов и их тепловыделение. Из тоннеля в грунт поступает не более 7% тепла, выделяющегося от поездов. Действие тоннельных вентиляторов не оказывает решающего влияния на годовой тепловой баланс в тоннелях, а лишь незначительно корректирует его в теплый период года.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТОННЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

В [1] предложен метод решения задачи динамического распределения воздушных потоков, вызванных поршневым действием поезда в метрополитене мелкого заложения, путем использования статических моделей. Схема модели поезда приведена на рис. 5. Моделирование потока воздуха перед поездом и после него в статической модели представлено двумя источниками давления — фиктивными вентиляторами. Аэродинамические параметры этих вентиляторов определены на основе натурных экспериментов в Новосибирском метрополитене и хорошо коррелируют с результатами [6]. Это позволило адекватно описать фронт давления воздуха на лобовой и хвостовой поверхностях поезда. Вентиляторы связаны между собой аэродинамическим сопротивлением, соответствующим сопротивлению зазора между поездом и тоннелем.

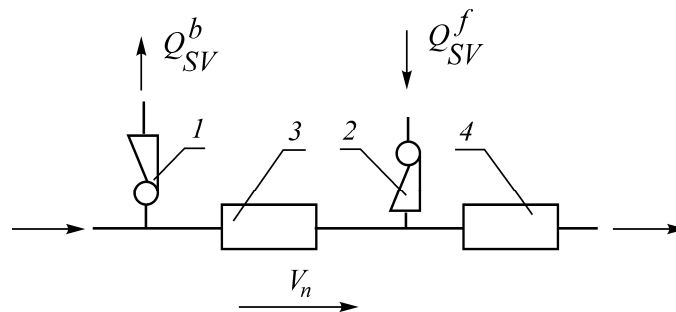


Рис. 5. Схема модели поезда: 1 — вентилятор, моделирующий разрежение воздуха за хвостовым вагоном; 2 — вентилятор, моделирующий повышение давления воздуха перед головным вагоном; 3 — аэродинамическое сопротивление зазора между поездом и стенками тоннеля  $R_Z$ ; 4 — сопротивление рассеяния  $R_d$ ;  $V_n$  — направление скорости поезда;  $Q_{SV}^f$ ,  $Q_{SV}^b$  — производительность вентиляторов 1 и 2. Стрелками показано направление движения воздуха

Аэродинамическое сопротивление зазора между стенками тоннеля и 4-вагонным поездом составляет 0.0074 кН. Вентилятор, моделирующий повышенное давление перед поездом, всасывающим входом соединен с атмосферой, а нагнетательным выходом — с тоннелем, причем перед поездом добавляется дополнительное переменное “сопротивлением рассеяния”  $R_d = f(S)$ . Сопротивление рассеяния является функцией расстояния  $S$  от передней поверхности поезда до точки в тоннеле, в которой определяется скорость воздуха.

Математическая модель потока воздуха [7], вызванная поршневым действием поезда, представляется совокупностью уравнений, включающих:  $P_{SV}^f$ ,  $P_{SV}^b$  — давления, развиваемые на лобовой и хвостовой поверхностях поезда соответственно, Па; сопротивление затухания  $R_d$  и зазора  $R_Z$ , кН; скорость движения поезда  $V_n$ , м/с:

$$\begin{cases} P_{SV}^f = 0.6V_n^2 + 0.64V_n + 1.94, \\ P_{SV}^f = \varphi_1(Q^f) = \text{const}, \\ P_{SV}^b = -0.238V_n^2 - 1.652V_n + 3.1, \\ P_{SV}^b = \varphi_2(Q^b) = \text{const}, \\ R_d = 7 \cdot 10^{-8} S^2 - 2.1 \cdot 10^{-7} S + 2.8 \cdot 10^{-4}, \\ R_Z = 0.0074. \end{cases}$$

С помощью этого метода исследовано воздухораспределение, вызванное поршневым действием поездов при различной частоте их движения [8].

Численные исследования воздухораспределения в обобщенной вентиляционной сети проведены при помощи программного обеспечения, разработанного в ИГД СО РАН [9]. Рассмотрены варианты воздухораспределения при различном расположении движущихся поездов на перегонах моделируемой линии. Расход воздуха на станциях исследовался для различных режимов работы тоннельных вентиляторов: зимний — вентиляторы выключены, вентиляционные затворы закрыты; весенне-осенний — вентиляционные затворы открыты, вентиляторы выключены, их шиберующие аппараты открыты; летний — станционные вентиляторы работают на вытяжку, перегонные выключены, а их шиберующие аппараты открыты.

Анализ полученных результатов для весенне-осеннего режима работы тоннельных вентиляторов показывает, что при прохождении одиночных поездов или при низкой частоте движения поездов на линии их поршневое действие эффективно проветривает станции. Чем чаще встречаются поезда на линии, тем меньше воздуха от поршневого эффекта перемещается через платформенные залы станций. Это объясняется возникновением циркуляционных контуров внутри перегона (рис. 6).

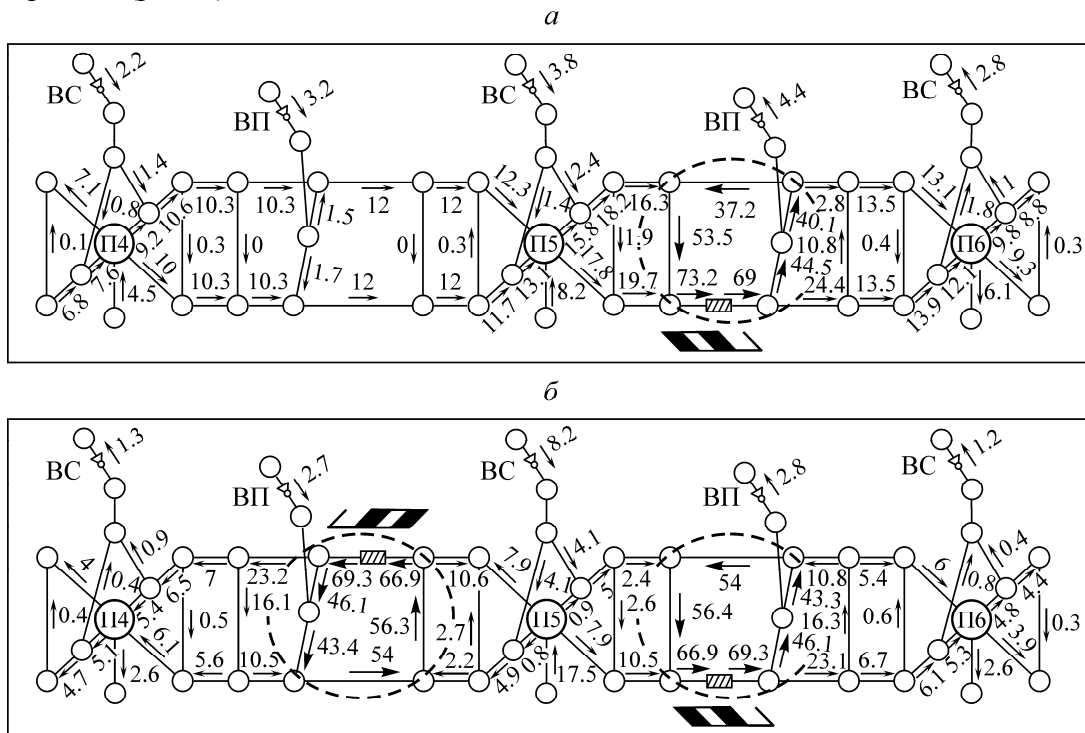


Рис. 6. Циркуляция воздуха в окрестностях станции № 5: а — один поезд отходит от станции; б — два поезда отходят от станции; жирными стрелками показана циркуляция воздуха во внутреннем циркуляционном кольце

Установлено, что при движении одного поезда по линии метрополитена под действием “поршневого эффекта” через станции перемещается количество воздуха, сравнимое с воздухообменом от действия тоннельных вентиляторов. Полученные данные подтверждают эффективность проветривания тоннелей и станций метро поршневым действием от движущихся поездов. При встрече поездов вблизи станции расход воздуха на ней значительно снижается по сравнению с одиночным проходом поезда. С увеличением количества поездов на линии и их встреч расход воздуха на станциях, обусловленный поршневым действием одной пары поездов, уменьшается при проходе каждой пары.

#### АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ВОЗГОРАНИИ ПОЕЗДА В ТОННЕЛЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Для исследований аварийных вентиляционных режимов в методику расчета естественного воздухораспределения в вентиляционных сетях метрополитенов [9] внесены уравнения технической теплофизики [10].

Тоннель с горящим поездом (рис. 7) делится на два участка: участок чистого воздуха, в котором осуществляется эвакуация, и участок задымленный, через который проводится дымоудаление [10]. На задымленном участке также могут оказаться люди и, следовательно, там будут работать спасатели. В работе рассмотрен такой опасный фактор пожара, как температура пожарно-дымовых газов (ПДГ) в задымленном участке тоннеля [11, 12]. Верхняя граница температур, при которых возможно проведение аварийно-спасательных работ подразделениями ВГСЧ [13], составляет  $40^{\circ}\text{C}$  (без специальных теплозащитных костюмов). Скорость движения фронта ПДГ с такой температурой по тоннелю позволит определить пространственно-временные рамки проведения спасательных операций на задымленном участке, чтобы повысить их эффективность.

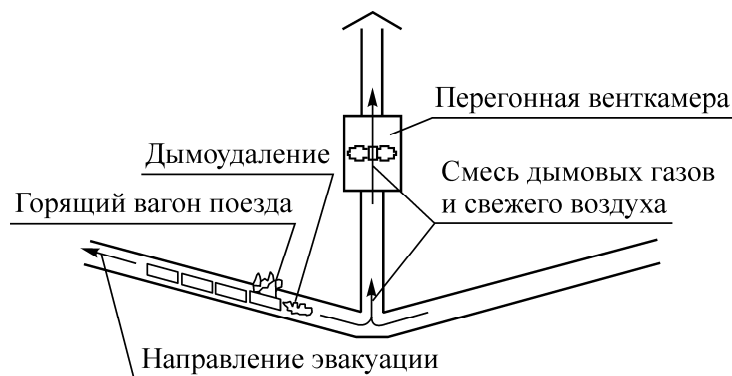


Рис. 7. Схема дымоудаления от горящего поезда в тоннеле

Результаты расчета сопряженной задачи теплообмена на конечно-элементной модели представлены на рис. 8 (сечение по продольной оси тоннеля, торец горящего вагона на левой границе расчетной области, движение ПДГ слева направо) для моментов времени 60, 80, 100 с от начала пожара.

Установлено, что остывание потока ПДГ за счет теплообмена по длине выработки незначительно и температура потока определяется динамикой изменения температуры и скоростью движения потока ПДГ от очага горения. На основе оценки скорости распространения температуры по длине тоннеля  $s$  (м) для рассматриваемых условий (горизонтальный однопутный тоннель, скорость воздуха  $u$  (м/с), горит один крайний вагон, начальная температура воздуха в тоннеле  $16^{\circ}\text{C}$ ) в период максимального роста температур ( $0-1200^{\circ}\text{C}$  от начала пожара) выведена зависимость температуры ПДГ  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в тоннеле от времени  $\tau$  и расстояния  $s$  от очага горения:

$$T(s, \tau) = \begin{cases} 16 & \text{при } s > u \cdot \tau, \\ 0.303 \left( \tau - \frac{s}{u} \right) + 16 & \text{при } s \leq u \cdot \tau. \end{cases}$$

Для защиты людей при задымлении станции необходимо обеспечить скорость воздушного потока не ниже 1.3 м/с навстречу пассажирам в зоне примыкания эвакуационных путей к платформенному залу [14].

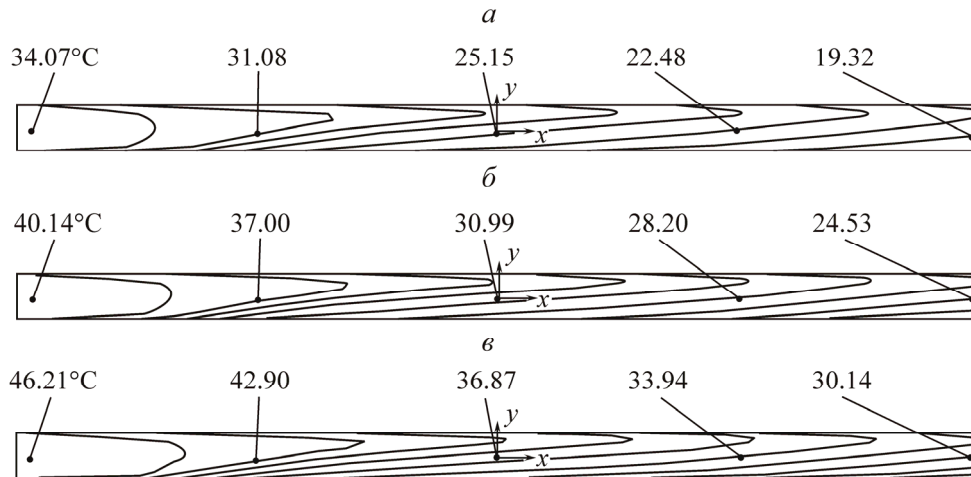


Рис. 8. Температурное поле потока ПДГ в тоннеле в моменты времени, с: *a* — 60; *б* — 80; *в* — 100 от начала горения

Для защиты людей от проникновения дыма на пути эвакуации рекомендуется не только отделение верхней зоны зала станции от путей эвакуации противоподымной перегородкой с высотой от уровня пола не более 2.5 м и не менее 2.2 м, но и выгораживание путей эвакуации от платформенного зала станции перегородкой с боков лестниц (рис. 9*а*).

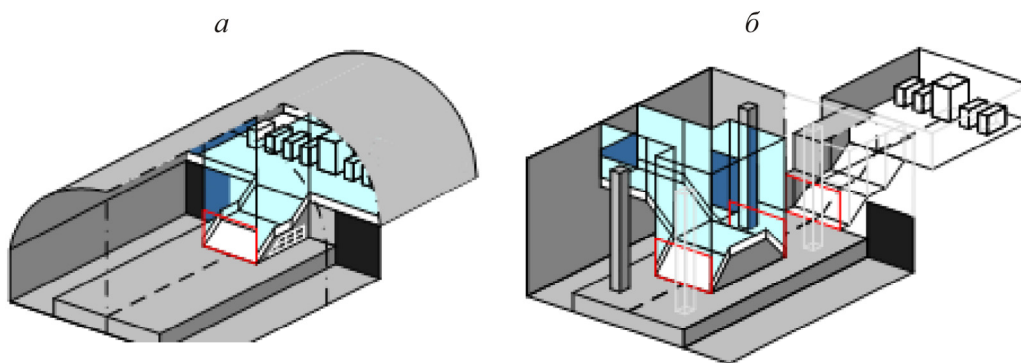


Рис. 9. Станции односводчатого (*а*) и колонного типа (*б*) с островной пассажирской платформой

Аналогичные конструктивные решения следует принять и для пересадочных станций (рис. 9*б*). В случае задымления платформенного зала станций верхний выход, находящийся под потолком станции, не будет виден эвакуирующимся пассажирам. Установка жалюзийных или стационарных светопрозрачных перегородок, согласно рис. 9, позволит обеспечить требования СП [14] по скорости движения воздуха на путях эвакуации независимо от типа и конструкции платформенного зала станции. Рекомендации использованы при проектировании станций Омского метрополитена.



### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОЗДУХА НА УЧАСТКЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

Неоднозначность режимов работы тоннельной вентиляции во времени требует создание систем автоматического управления расходом воздуха на участке вентиляционной сети. На технологической схеме участка вентиляционной сети метрополитена мелкого заложения (рис. 10) показано, что воздушный поток  $Q_2$ , создаваемый вентилятором, после смешения с потоком воздуха, поступающим из тоннеля  $\Delta Q$ , может быть ограничен регулятором створчатого типа. Переменное значение  $\Delta Q$  учитывает несколько факторов: поршневое действие от движения поездов, влияние изменения вентиляционных параметров соседней станции на режим проветривания рассматриваемой станции, а также переменную естественную тягу.

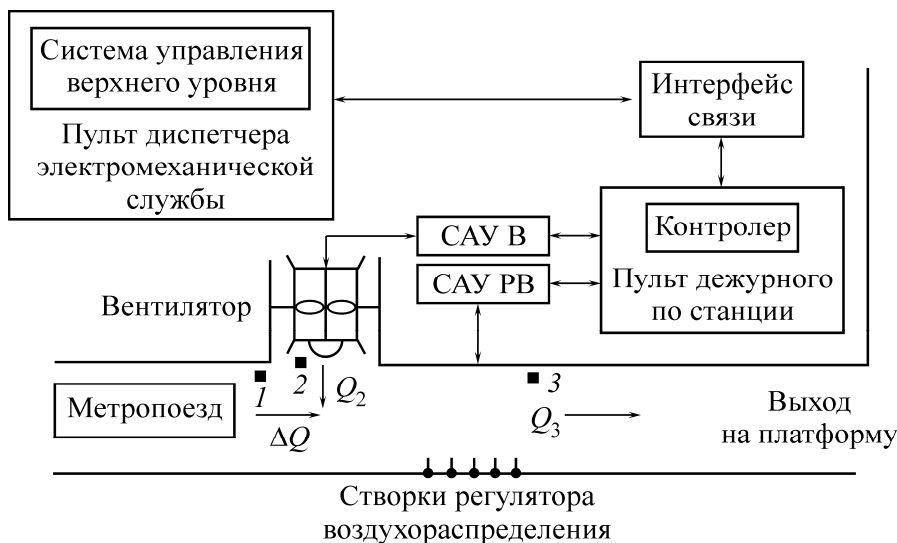


Рис. 10. Технологическая схема участка вентиляционной сети метрополитена мелкого заложения: САУ В — система автоматического управления станционным вентилятором; САУ РВ — система автоматического управления регулятором воздухораспределения;  $Q_3$  — расход воздуха, поступающий на платформу из тоннеля;  $\Delta Q$  — приращение расхода воздуха, приходящего из тоннеля;  $Q_2$  — производительность станционного вентилятора; 1 — датчик расхода воздуха в тоннеле; 2 — датчик производительности вентилятора; 3 — датчик расхода воздуха, поступающего на платформу

С учетом изложенного предполагается создание двухканальной системы управления проветриванием, включающей в себя систему автоматического управления (САУ) станционным вентилятором (САУ В) и регулятором воздухораспределения (САУ РВ). Контроллер, установленный у дежурного по станции, выполняет функцию устройства управления, в которое поступает информация с датчиков локальных систем и сигналы задания требуемых параметров микроклимата от системы управления верхнего уровня. Контроллер на основе заложенных алгоритмов оптимального управления вычисляет и подает в каждый момент времени сигналы задания на САУ В и САУ РВ, поддерживая расход воздуха на платформе в соответствии с требуемым в данный момент времени значением. При низком расходе воздуха на платформе подается сигнал на открытие створок РВ на требуемый угол, при полностью открытом регуляторе в условиях нехватки воздуха — на увеличение производительности станционного вентилятора.

Функциональная схема двухканальной системы управления расходом воздуха на участке вентиляционной сети представлена на рис. 11. Производительность станционного вентилятора  $Q_2$  регулируется изменением частоты вращения его рабочего колеса  $n$  с помощью преобразователя

частоты. На величину  $Q_2$  аддитивно влияет возмущающее воздействие  $\Delta Q$ , что также учтено в схеме. Полученный таким образом расход воздуха в тоннеле перед РВ  $Q_T$  поступает в САУ РВ, где изменяется до требуемого значения переводом створок регуляторов на угол  $\alpha$ . Ограниченный регулятором расход воздуха  $Q_3$  поступает на платформу. Устройство управления по сигналу с датчика производительности вентилятора и сигналу задания требуемых параметров проветривания станции формирует и выдает на преобразователь частоты управляющее воздействие на изменение скорости вращения вала вентилятора.

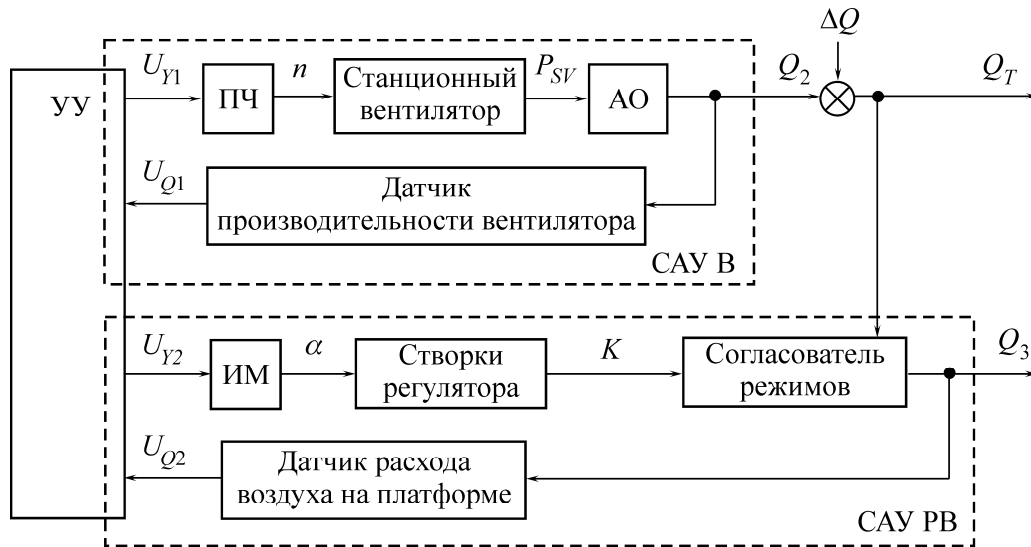


Рис. 11. Функциональная схема двухканальной системы автоматического управления проветриванием станции метрополитена: УУ — устройство управления; ПЧ — преобразователь частоты питающего напряжения; АО — аэродинамический объект; ИМ — исполнительный механизм перемещения створок регулятора;  $U_{Y1}$  — сигнал управления производительностью вентилятора;  $U_{Y2}$  — сигнал управления расходом воздуха в тоннеле;  $P_{SV}$  — статическое давление вентилятора;  $U_{Q1}$  — сигнал обратной связи с датчика производительности вентилятора;  $U_{Q2}$  — сигнал обратной связи с датчика расхода воздуха, поступающего на платформу;  $K$  — коэффициент эффективности регулятора

Математическая модель канала регулирования производительности вентилятора может быть представлена передаточной функцией

$$W_1(p) = \frac{Q_T(p)}{U_{Y1}(p)} = \frac{K_1 K_J K_V K_A}{(T_J p + 1)(T_A p + 1)} + \Delta Q(p),$$

а канала управления расходом воздуха, поступающим из тоннеля,

$$W_2(p) = \frac{Q_3(p)}{U_{Y2}(p)} = \frac{K_M K_R}{p} + 1,$$

где  $K_1$  — коэффициент усиления преобразователя частоты;  $K_J$  — коэффициент передачи, характеризующий степень изменения скорости вращения рабочего колеса вентилятора при изменении частоты тока статора двигателя;  $K_V$  — коэффициент усиления вентилятора;  $K_A$  — коэффициент усиления объекта, определяемый при линеаризации характеристики вентиляционной сети;  $T_J$  — постоянная времени, характеризующая инерционность разгона вентилятора;  $T_A$  — постоянная времени участка вентиляционной сети;  $K_M$  — коэффициент усиления испол-

нительного механизма поворота створок РВ;  $K_R$  — коэффициент усиления, отражающий взаимосвязь между углом поворота створок РВ  $\alpha$  и расходом воздуха  $Q_3$ , поступающим из тоннеля на станцию.

Таким образом, уравнение для нахождения расхода воздуха, поступающего на платформу из тоннеля, можно записать в следующем виде:

$$Q_3(p) = U_{Y1}(p)W_1(p)U_{Y2}(p)W_2(p).$$

В результате численного эксперимента по моделированию переходных процессов вентиляционного режима станции “Маршала Покрышкина” Новосибирского метрополитена [15] установлено, что при увеличении угла закрытия  $\alpha$  створок регулятора от 0 до 90° расход воздуха  $Q_3$ , поступающий из тоннеля, уменьшается на 55–60% от первоначального значения (рис. 12).

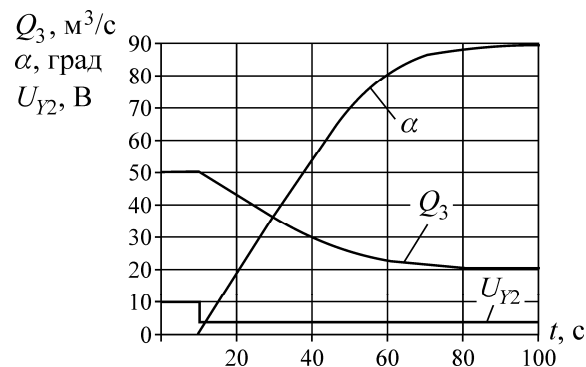


Рис. 12. Переходные процессы изменения расхода воздуха, поступающего на платформу из тоннеля, и угла поворота створок РВ при изменении сигнала задания  $U_{Y2}$  САУ РВ

## ВЫВОДЫ

Основным фактором, влияющим на вынос тепла из тоннелей метрополитена мелкого заложения, является поршневое действие поездов. Дополнительные факторы — теплопотери в грунт и действие тоннельной вентиляции — оказывают незначительное или корректирующее действие на поддержание теплового баланса в метрополитене.

Проектирование механической тоннельной вентиляции для метрополитенов мелкого заложения должно быть направлено на выполнение ею, в первую очередь, противопожарной функции. При расчете воздухообмена для штатных режимов тоннельной вентиляции по удалению теплоизбытков необходимо учитывать поршневое действие поездов.

При движении поезда по тоннелю на перегоне образуется главное циркуляционное кольцо, причем расход воздуха, вовлекаемый в кольцо, увеличивается с увеличением количества поездов на линии. Это приводит к снижению расхода воздуха на станциях.

При горении поезда в тоннеле температура смеси пожарно-дымовых газов и воздуха на задымленном участке тоннеля определяется скоростью воздуха и динамикой температур от очага горения. В случае горения крайнего вагона поезда выведены инженерные зависимости для использования при составлении плана ликвидации аварии и проведения спасательных мероприятий.

Разработаны рекомендации для архитектурного исполнения путей эвакуации из платформенного зала станции метрополитена, способствующие выполнению нормативных требований по обеспечению скорости воздуха навстречу эвакуирующимся людям при пожаре или задымлении.

Численным моделированием доказана возможность и эффективность регулирования расхода воздуха, поступающего на платформу станции метрополитена, в диапазоне до 60% путем изменения угла поворота створок регулятора от 0 до 90° и регулирования частоты вращения рабочего колеса стационарного вентилятора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красюк А. М.** Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006.
2. **СНиП 32-02-203:** Метрополитены. Введ. 2004-01-01. — М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.
3. **Красюк А. М., Лугин И. В., Чигишев А. Н.** Взаимное влияние режимов вентиляции станций линии метрополитена // *Метро*. — 2002. — № 2.
4. **Цодиков В. Я.** Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975.
5. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование процессов теплопередачи в тоннеле метрополитена мелкого заложения // *ФТПРПИ*. — 2008. — № 6.
6. **Socket H.** Formulae for the calculation of pressure effects in railway tunnels, Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels.-Luz-ern, Switzerland, July 2003.
7. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // *ФТПРПИ*. — 2007. — № 6.
8. **Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А.** Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения // *ФТПРПИ*. — 2010. — № 4.
9. **Кузнецов А. С., Лукин С. М.** О применении потоковых алгоритмов для расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях // *ФТПРПИ*. — 1989. — № 5.
10. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование режимов работы тоннельной вентиляции при возгорании поезда в тоннеле метрополитена // *ФТПРПИ*. — 2005. — № 4.
11. **Адеев А. А., Лугин И. В.** Динамика температуры пожарно-дымовых газов в тоннеле метрополитена при горении поезда // *Изв. вузов. Строительство*. — 2012. — № 10.
12. **Naack A., Schreyer J.** Emergency scenarios for Tunnels and underground stations in Public Transport, fourth International symposium on Tunnel safety and security, Frankfurt, Germany, March 17-19, 2010.
13. **Устав** профессиональной горноспасательной службы по организации и ведению горноспасательных работ на строительстве подземных сооружений / Госстрой России, Управление горного надзора и военизированных горноспасательных частей. — М.: ГУП ЦПП, 2002.
14. **СП 32-105-2004:** Метрополитены. — М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.
15. **Зедгенизов Д. В.** Система управления расходом воздуха на участке вентиляционной сети метрополитена мелкого заложения // *ФТПРПИ*. — 2009. — № 1.

*Поступила в редакцию 28/VIII 2014*