

## Определение требуемого воздухообмена на линии метрополитена с двухпутным тоннелем

*Е. Л. Алферова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: alferova\_el@mail.ru

**Аннотация.** В работе исследовано воздухораспределение в сети тоннельной вентиляции метрополитена с двухпутным тоннелем в зависимости от протяженности исследуемой линии. Исследование статического воздухораспределения выполнено в аналитическом комплексе проектирования систем вентиляции, воздухоподготовки и кондиционирования горнодобывающих предприятий, основанном на методе контурных расходов. Показано, что при количестве на линии перегонов более двух обеспечение воздухообмена осуществляется одинаковыми вентиляторами в любом режиме работы тоннельной вентиляции. При этом максимальные параметры вентиляторов в штатном режиме работы тоннельной вентиляции составляют: производительность 73,8 м<sup>3</sup>/с и давление 684 Па, а в аварийном режиме: производительность 66 м<sup>3</sup>/с и давление 843 Па.

**Ключевые слова:** вентиляция, метрополитен, воздухораспределение

## Determination of the Required Air Exchange on a Metro Line with a Double-Track Tunnel

*E. L. Alferova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: alferova\_el@mail.ru

**Abstract.** The paper investigates the air distribution in the subway tunnel ventilation network with a double-track tunnel, depending on the length of the line under study. The study of static air distribution was carried out in the analytical complex of designing ventilation, air treatment and air conditioning systems of mining enterprises based on the contour flow method. It is shown that when the number of runs on the line is more than two, the provision of air exchange is carried out by the same fans in any mode of operation of tunnel ventilation. At the same time, the maximum parameters of the fans in the normal operation of tunnel ventilation are: 73.8 m<sup>3</sup>/s capacity and 684 Pa pressure, and in emergency mode: 66 m<sup>3</sup>/s capacity and 843 Pa pressure.

**Keywords:** ventilation, underground, air distribution

### *Введение*

Задача массовых пассажирских перевозок в крупных мегаполисах успешно решается путем строительства метрополитенов. Современные мировые тенденции свидетельствуют об изменении конструктивных решений и способов строительства метрополитенов: всё чаще применяют вместо двух однопутных тоннелей, традиционных для России и СНГ, один двухпутный, проходимый щитом большого диаметра [1].

Тоннельная вентиляция является системой жизнеобеспечения пассажиров и обслуживающего персонала. От нее зависит не только комфортное пребывание людей в подземных сооружениях метрополитена [2], но и безопасность в случае аварии. Разработка системы тоннельной вентиляции метрополитена с двухпутными тоннелями не решена в полной мере: опыт эксплуатации двухпутных линий метрополитенов в России накоплен недостаточно, а использовать в полной мере опыт других стран невозможно из-за разницы в требованиях строительных норм и условиях эксплуатации. Определение требуемого воздухообмена на линии метрополитена является одной из ключевых задач при разработке системы тоннельной вентиляции метрополитенов, потому что на этом этапе определяются параметры оборудования будущей системы [3].

При проектировании двухпутных тоннелей Некрасовской линии в Москве применена система продольно-поперечной системы вентиляции [4], которая обеспечивает проветривание в штатном режиме, а также нераспространение пожарных газов в аварийном режиме. Практически весь воздухообмен при проветривании двухпутного тоннеля, в отличие от однопутного [5, 6], обеспечивается системой тоннельной вентиляции. В связи с этим, требуемый расход воздуха при продольно-поперечной схеме перемещается через вентиляционный отсек. Ограниченное пространство тоннеля не позволяет устраивать вентиляционные отсеки большого сечения, поэтому вентотсек будет иметь относительно небольшое поперечное сечение. В итоге, использование продольно-поперечной схемы в штатном режиме работы тоннельной вентиляции приведет к более высоким потерям давления в вентиляционных каналах, чем при использовании, например, продольной схемы проветривания [7]. Обобщая историю аварий в метрополитенах [8 – 12], можно сделать вывод, что возникновение пожара в результате несчастного случая или намеренных действий является потенциально наиболее опасным для жизни людей видом чрезвычайной ситуации в метрополитене. Первоочередной задачей при ликвидации аварий является безопасная эвакуация пассажиров и обслуживающего персонала из аварийной зоны. Для этого необходимо, чтобы пути эвакуации остались незадымленными, что решается использованием комбинированной схемы вентиляции в аварийном режиме работы [7].

### ***Методы и материалы***

Ввиду большой разветвленности системы вентиляции метрополитена, определение потерь давления в вентиляционной сети производится сетевым моделированием методом контурных расходов [13, 14]. Расчет статического воздухо-распределения проведен в аналитическом комплексе проектирования систем вентиляции, воздухоподготовки и кондиционирования горнодобывающих предприятий, разработанном Горным институтом УрО РАН [13, 15, 16]. Этот расчетный комплекс применяется для моделирования воздухо-распределения в вентиляционных сетях горных предприятий и метрополитенов [17].

Проведено исследование воздухо-распределения на обобщенной модели тоннельной вентиляции метрополитена с двухпутным тоннелем и станциями за-

крытого типа с количеством перегонов от одного до девяти (рис. 1) для штатного и аварийного режима работы тоннельной вентиляции.

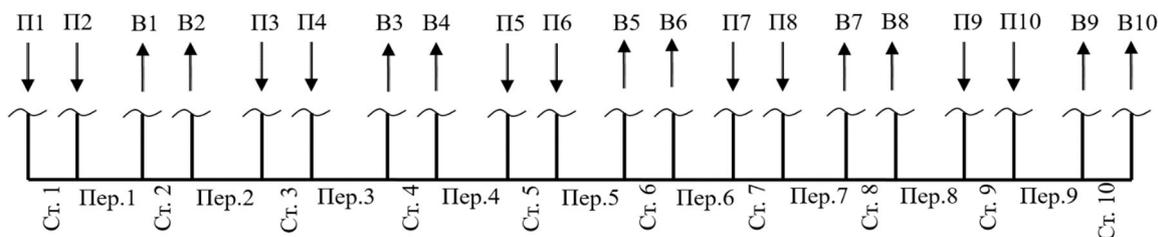


Рис. 1. Схема обобщенной линии метрополитена с двухпутпутным тоннелем из десяти станций

При расчете воздухораспределения и определении требований к вентиляторам в аварийном режиме работы вентиляции следует учитывать величину пожарно-тепловой депрессии (ПТД). Для определения значения ПТД  $\Delta P_{\text{ПТД}}$ , Па, используется формула для шахт и нагорных рудников [18, 19]:

$$\Delta P_{\text{ПТД}} = 12,25 \Delta h \left( \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}{273 + t_{\text{в}}} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – превышение отметок начала и конца рассматриваемого участка тоннеля, м.

$$\Delta h = i \cdot S_{\text{уч}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{уч}}$  – длина участка, м;  $i$  – уклон тоннеля, ‰. Максимальный уклон проектируемого тоннеля по требованиям [20] составляет 40 ‰, однако, для уже эксплуатирующихся тоннелей, а также спроектированных с учетом опубликованных до 2020 года редакций СП «Метрополитены», уклон тоннеля предусматривается до 50 ‰, он и принимается в расчет, как наибольший.  $t_{\text{п}}$  – температура воздуха в выработке после пожара, °С, принимается как средняя между температурой в очаге пожара, принимаемой по данным [21], и температурой на границе задымленного участка, равной температуре воздуха до пожара, при этом  $t_{\text{п}}$  определяется с учетом остывания и находится по формуле:

$$t_{\text{п}} = 0,11\tau + 16, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время от начала пожара, с.

### Результаты

Следует отметить, что каждую реальную линию нужно рассматривать в индивидуальном порядке, чтобы добиться выполнения требуемого воздухообмена.

Наглядно это показано на рис. 2, где представлен воздухообмен для обобщенной линии на рис. 1. Прямая 1 на рис. 2 показывает требуемый воздухообмен на перегонах, а столбцы 2 – фактический воздухообмен при использовании одинаковых настроек всех вентиляторов. При этом, в обоих случаях суммарный воздухообмен всей вентиляционной сети одинаков.

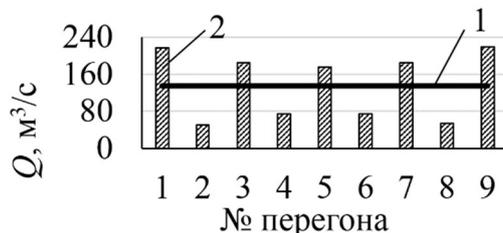
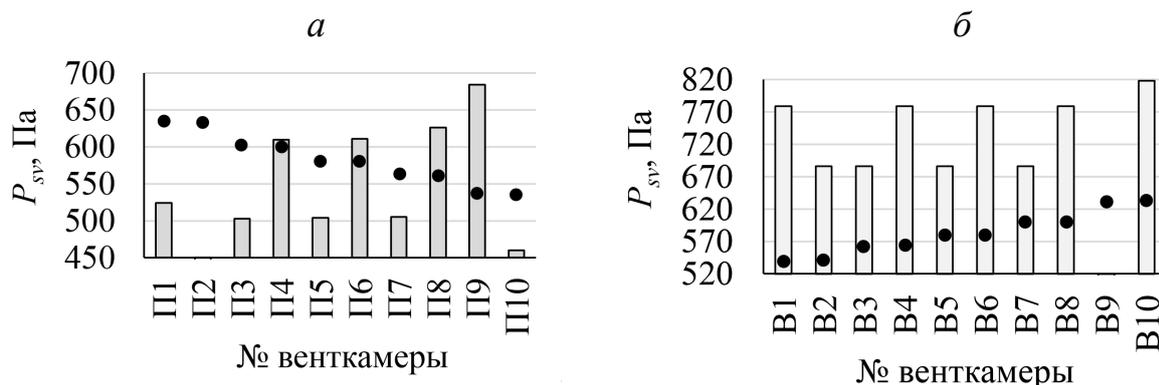


Рис. 2. Воздухообмен на перегонах:  
1 – требуемый; 2 – при одинаковых настройках вентиляторов

На рис. 3 показано давление приточных и вытяжных вентиляторов при одинаковых настройках вентиляторов и при настройках, обеспечивающих требуемый воздухообмен на перегонах линии из десяти станций.

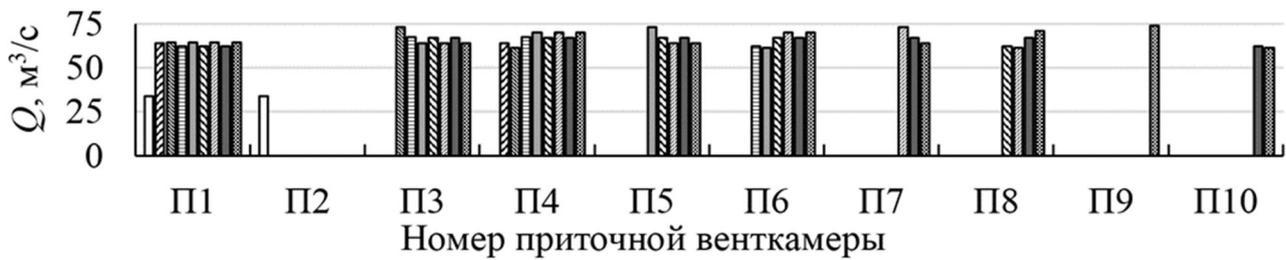


- Для обеспечения требуемого воздухообмена
- При одинаковых настройках вентиляторов

Рис. 3. Давление вентиляторов приточных (а) и вытяжных (б) венткамер при одинаковых настройках вентиляторов и при настройках вентиляторов, обеспечивающих требуемый воздухообмен на перегонах для линии из десяти станций

Требования к вентиляторам в зависимости от размеров линии представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Схема вентиляции и параметры тоннельных вентиляторов для аварийного режима работы тоннельной вентиляции для обобщенной сетевой модели вентиляционной сети метрополитена с двухпутным тоннелем из десяти станций показаны на рис. 5.



Количество перегонов: □ 1 ▨ 2 ▩ 3 ▪ 4 ▮ 5 ▯ 6 ▰ 7 ▱ 8 ▲ 9

Рис. 4. Производительность вентиляторов  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , приточных камер в зависимости от размеров линии метрополитена с двухпутным тоннелем

Таблица 1

Давление вентиляторов приточных вентиляционных камер, Па

Кол-во перегонов		П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10
Нечетное	1	186	183	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	524	откл.	666	456	-	-	-	-	-	-
	5	523	откл.	502	609	667	456	-	-	-	-
	7	524	откл.	502	609	503	610	667	457	-	-
	9	524	откл.	503	610	504	611	505	626	684	459
Четное	2	450	откл.	откл.	450	-	-	-	-	-	-
	4	422	откл.	494	494	откл.	422	-	-	-	-
	6	423	откл.	495	495	495	495	откл.	423	-	-
	8	424	откл.	496	496	496	496	496	496	откл.	424

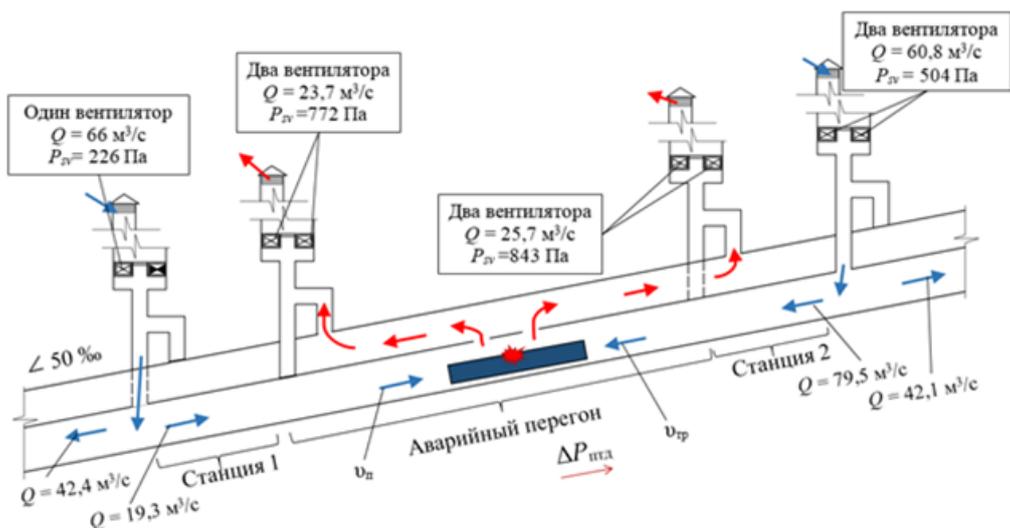


Рис. 5. Схема вентиляции и параметры вентиляторов для реализации аварийного режима работы тоннельной вентиляции при возгорании и остановке поезда в двухпутном тоннеле

## ***Обсуждение***

По рис. 3 видно влияние топологии сети на требования к вентиляторам – характеристики вентиляторов меняются в зависимости от положения венткамеры на линии.

Если линия состоит из одного перегона, то требования и к приточным, и к вытяжным вентиляторам (здесь и далее имеются в виду вентиляторы, обеспечивающие требуемый воздухообмен на перегоне) относительно невысокие: производительность 33,8 м<sup>3</sup>/с, напор 177 – 186 Па.

Если линия состоит из двух перегонов, то, при такой же производительности, требуемый напор возрастает до 570 – 610 Па для приточных и 270 Па для вытяжных вентиляторов, а параметры вентиляторов симметричны относительно центральной станции линии. При четном количестве перегонов от 4 до 8, параметры вентиляторов становятся постоянными для всех линий:

– на тупиковых станциях достаточно работы вентиляторов одной приточной венткамеры (вентиляторы во второй венткамере выключены), параметры вентиляторов: производительность 62,1 м<sup>3</sup>/с, напор 424 Па;

– на промежуточных станциях параметры вентиляторов приточных венткамер: производительность 67,1 м<sup>3</sup>/с, напор 496 Па; параметры вентиляторов вытяжных венткамер: производительность 66,8 м<sup>3</sup>/с, напор 683 Па.

Если на линии нечетное количество перегонов от 3 до 9, то во избежание появления слабо или излишне проветриваемых перегонов (как в случае на рис. 2), следует настраивать промежуточные венткамеры так, чтобы на всех перегонах был одинаковый воздухообмен.

В аварийном режиме работы тоннельной вентиляции требуемые рабочие параметры вентиляторов составляют: для венткамеры, работающей на приток, для одного вентилятора при двух параллельно работающих требуемый расход воздуха до 60,8 м<sup>3</sup>/с и напором 504 Па, подпорный вентилятор с расходом 66 м<sup>3</sup>/с и напором 226 Па; для венткамер, работающих на вытяжку, параметры составляют 23,7 м<sup>3</sup>/с и 772 Па и 25,7 м<sup>3</sup>/с и 843 Па. Работа аварийного режима реализуется теми же вентиляторами, что и в штатном режиме с учетом реверсирования. При этом, на соседних аварийному участку перегонах и станциях, происходит остановка линии, но остальные участки функционируют в штатном режиме с соблюдением в тоннеле требований по воздухообмену.

## ***Заключение***

Показано, что при количестве на линии перегонов более двух обеспечение воздухообмена осуществляется одинаковыми вентиляторами в любом режиме работы тоннельной вентиляции. При этом максимальные параметры вентиляторов в штатном режиме работы тоннельной вентиляции составляют: производительность 73,8 м<sup>3</sup>/с и давление 684 Па, а в аварийном режиме: производительность 66 м<sup>3</sup>/с и давление 843 Па.

## ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер гос. регистрации № 121052500147-6

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Krazyuk A.M., Lugin I.V., Alferova E.L., Kiyantsa L.A. Evaluation of Ventilation Flow Charts for Double-Line Subway Tunnels without Air Chambers // *Journal of Mining Science*, 2016. – Vol. 52. – № 4. P. 740-751.
2. Popov N.A., Krazyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A., Zedgenizov D.V. Improvement of Shallow Subway Tunnel Ventilation Procedures // *Journal of Mining Science*, 2014. – Vol. 50. – № 5. P. 943-952.
3. Krazyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. CIRCULATORY AIR RINGS AND THEIR INFLUENCE ON AIR DISTRIBUTION IN SHALLOW SUBWAYS // *Journal of Mining Science*, 2010. – Vol. 46. – № 4. – P. 431-437.
4. Maslak, Vladimir. Innovative engineering solutions for improving operational safety and efficiency of subways with two-way tunnels / Vladimir Maslak, Dmitry Boytsov, Andrey Danilov, Elena Levina, Semen Gendler // *Procedia Engenering*. – 2016. – №165. – P. 214-223.
5. Krazyuk, A.M., Lugin, I.V. Investigation of the Dynamics of air Flows Generated by the Disturbing Action of Trains in the Metro // *Journal of Mining Science*, 2007. №43(6). P. 655–661.
6. Алферова, Е. Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена / Е.Л. Алферова, И. В. Лугин, Л. А. Кияница // ГИАБ, 2016. –№6. – С.5–14.
7. Lugin I.V., Alferova E.L. Integrated Performance Analysis of Ventilation Schemes for Double-Line Subway Tunnel // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. – Vol.262. DOI 10.1088/1755-1315/262/1/012043
8. Хронология крупных аварий в метрополитенах мира [Электронный ресурс] // ТАСС. – 2021. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/11304327>
9. Carvel, R. Lessons learned from catastrophic fires in tunnels / R. Carvel // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil Engineering*– 2008. №161(6). P. 49–53. doi:10.1680/cien.2008.161.6.49 2008.
10. Список террористических актов в метрополитенах [Электронный ресурс] // Википедия. – 2021. – Режим доступа: [ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_террористических\\_актов\\_в\\_метрополитенах](ru.wikipedia.org/wiki/Список_террористических_актов_в_метрополитенах)
11. Okumura, T. Acute and chronic effects of sarin exposure from the Tokyo subway incident / T. Okumura, T.Hisaoka, T.Naito, H. Isonuma, S. Okumura, K. Miura, H. Maekawa, S. Ishimatsu, N. Takasu, K. Suzuki // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. – 2005. –№19(3). P. 447–450. doi:10.1016/j.etap.2004.12.005.
12. Jeon, G. Characteristic Features of the Behavior and Perception of Evacuees from the Daegu Subway Fire and Safety Measures in an Underground Fire / G. Jeon, W. Hong // *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. – 2009. –№8(2). P. 415–422. doi:10.3130/jaabe.8.415.
13. Зайцев, А.В. Аналитический комплекс «Аэросеть» / А.В. Зайцев, Б.П. Казаков, А.В. Кашников, Д.С. Кормщикова, Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин, П.С. Мальков, А.В. Шалимов / *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №ru2015610589*, 2015. № заявки: 2014613790. Дата регистрации: 24.04.2014. Дата публикации: 14.01.2015
14. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. –280 с.
15. Круглов, Ю.В. Исследование методов расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях и их реализация в программном комплексе «Аэросеть» / Ю.В. Круглов // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного Института УрО РАН по результатам НИР в 2007 г.* Пермь, 2008. –С. 232-235.
16. Казаков, Б.П. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников / Б.П. Казаков, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // ГИАБ, 2006. №S1. С. 21-33.

17. Бурлаков, Д.Д. Исследование влияния поршневого движения поездов метрополитена на обеспеченность воздухом станций метро / Д.Д. Бурлаков, В.П. Федотова, О.В. Скопинцева // ГИАБ, 2019. – №S19. С. 28–36.
18. Воропаев А. Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции / А.Ф. Воропаев. – М.: АН СССР. - 1950. – 230 с.
19. Медведев, Б. И. Тепловые основы вентиляции шахт при нормальных и аварийных режимах проветривания / Б. И. Медведев. – Киев – Донецк, «Вища школа», Головное изд-во, 1978. – 156 с.
20. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 – М.: Аналитик, 2013. – 269 с.
21. Голиков, А. Д. Требуемый предел огнестойкости обделок метрополитена / А. Д. Голиков, Г. Д. Негодаев, В. П. Чижиков // Борьба с пожарами в метрополитенах: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1992. – С. 71 – 81.

© Е. Л. Алферова, 2022