

## Обоснование параметров кольцевых моделей при декомпозиции вентиляционной сети протяженной линии метрополитена для расчета воздухораспределения

*И. В. Лугин<sup>1\*</sup>, С. А. Павлов<sup>1</sup>, Т. И. Иргобаев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> НАО Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

\* e-mail: ivlugin@misd.ru

**Аннотация.** Влияние поршневого действия поездов на воздухораспределение и воздухообмен в тоннельных и пассажирских сооружениях метрополитена с однопутным тоннелем стоит на втором месте после действия механической тоннельной вентиляции. При выключении тоннельных вентиляторов (например, в холодный период года в местности с резко континентальным климатом) практически весь воздухообмен в метро обеспечивается поршневым действием. Поскольку все элементы вентиляционной сети метрополитена при общепринятой схеме продольной вентиляции связаны тоннелями, взаимовлияние вентиляционных режимов соседних участков метрополитена весьма существенно. Поэтому для получения корректного результата моделирования воздухораспределения в расчетную схему следует включать не менее 8 перегонов со станциями, что ведет к повышенным требованиям по вычислительной мощности и времени расчета. В статье рассматривается декомпозиция протяженной линии метрополитена с помощью кольцевых моделей и обосновывается количество расчетных участков со станциями для различной частоты движения поездов. Приведено сравнение результатов расчета для кольцевой и линейной моделей. Исследования выполнены с использованием сетевых методов расчета воздухораспределения.

**Ключевые слова:** метрополитен, вентиляция, кольцевые модели, поршневой эффект, воздухораспределение, вычислительное моделирование, расход воздуха

## Justification of the parameters of ring models in the decomposition of the ventilation network of an extended metro line for the calculation of air distribution

*I. V. Lugin<sup>1\*</sup>, S. A. Pavlov<sup>1</sup>, T. I. Irgibaev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

\* e-mail: ivlugin@misd.ru

**Abstract.** The piston effect of trains on air distribution and air exchange in tunnel and passenger structures of the metro with a single-track tunnel is in second place after the action of mechanical tunnel ventilation. When the tunnel fans are turned off (for example, during the cold season in an area with a sharply continental climate), almost the entire ventilation load is provided by the piston action. Since all elements of the metro ventilation network are connected by tunnels under the generally accepted scheme of longitudinal ventilation, the mutual influence of the ventilation modes of neighboring metro sections is very significant. Therefore, in order to obtain the correct result of air distri-

bution modeling, at least 8 runs with stations should be included in the calculation scheme, which leads to increased requirements for computing power and calculation time. The article considers the decomposition of an extended metro line using ring models and justifies the number of calculated sections with stations for different train frequencies. A comparison of the calculation results for the ring and linear models is given. Calculations are performed using network methods for calculating air distribution.

**Keywords:** metro, ventilation, ring models, piston effect, air distribution, computational modeling, air flow

### *Введение*

В современных метрополитенах с однопутными тоннелями и продольной схемой вентиляции взаимосвязность вентиляционных режимов соседних участков (под участком подразумевается станция и прилегающий к ней перегон) весьма существенна [1, 2]. Это объясняется низким аэродинамическим сопротивлением тоннелей, выполняющих функции воздухопроводов, в связи с их большой площадью поперечного сечения. Поэтому, для получения корректных результатов расчета воздухораспределения, необходимо моделировать вентиляционную сеть участка линии метрополитена, состоящего минимум из девяти станций и соединяющих их перегонов.

Для исследования вентиляционной сети линии метро необходимо иметь полные сведения о ее топологии и аэродинамическом сопротивлении элементов [3]. Основу топологической схемы сети тоннельной вентиляции метрополитена составляют станции и перегонные тоннели. Для исследования воздухораспределения и выявления общих закономерностей, характерных для этих станций, разработаны обобщенные модели вентиляционных сетей метрополитенов (рис. 1) [4-8]. Воздухораспределение в разветвленных вентиляционных сетях метрополитенов определяется с помощью сетевых методов расчета и разработанных на их основе компьютерных программ [9].

Существенное влияние на воздухораспределение в вентиляционных сетях метрополитенов оказывает поршневое действие движущихся поездов. При этом объем воздуха, перемещаемый поездами по тоннелям, соизмерим с производительностью тоннельных вентиляторов [3-6, 10]. При отключении механической вентиляции в холодный период года при расположении метрополитена в местности с резко континентальным климатом, практически вся вентиляционная нагрузка обеспечивается именно поршневым действием. Поэтому задача определения воздухораспределения от поршневого действия поездов весьма актуальна.

Расчет количества воздуха, инициируемого поездами, движущихся по однопутным тоннелям, существенно сложнее расчета статического воздухораспределения. Динамика движения воздуха математически описывается системой дифференциальных уравнений [1]. На воздухораспределение влияет скорость движения поезда, площадь перекрытия поперечного сечения тоннеля, его конструкция (в том числе количество вагонов) и условия обтекания подвижного состава потоком воздуха [11-25]. Воздухораспределение, рассчитанное с применением модели поршневого действия поезда [4, 6] с использованием методов статиче-

ского сетевого воздухораспределения, называется квазидинамическим. Основным преимуществом такого метода расчета является возможность проведения многовариантных расчетов воздухораспределения в вентиляционной сети протяженной линии метрополитена с учетом поршневого действия поездов, не требующая существенных вычислительных мощностей. При этом время расчета составляет 0,5-2 с.

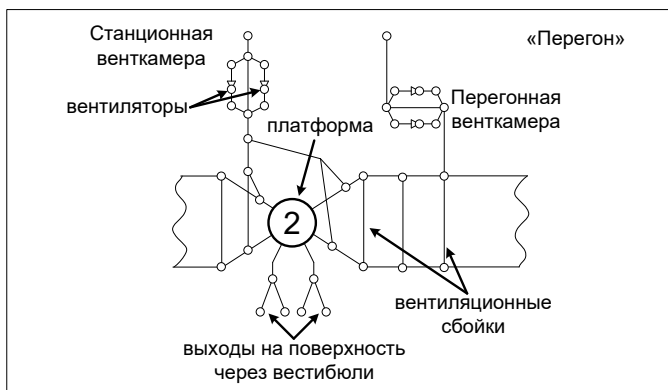


Рис. 1. Элемент «перегон» обобщенной линии метрополитена

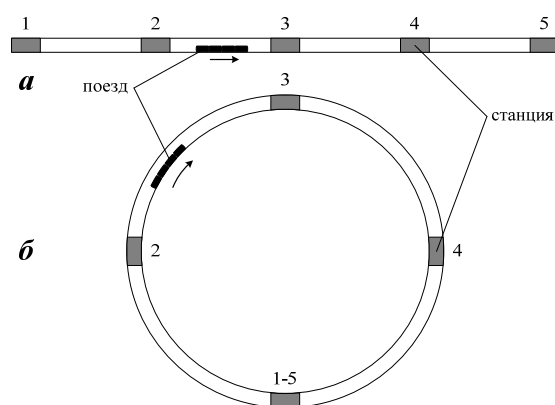


Рис. 2. Декомпозиция линейной модели (а) линии метрополитена в кольцевую (б)

Однако, сетевые методы расчета относятся к задачам с сосредоточенным параметрами и не дают возможности определить воздухораспределение в объеме сооружений метрополитена, необходимое для проведения ряда исследований. В этом случае применяются методы вычислительной аэродинамики, например, метод конечных объемов, которые требуют гораздо большей вычислительной мощности и временных затрат, напрямую зависящих от размерных параметров модели и качества ее дискретизации.

Уменьшение размеров расчетного участка линии метрополитена с сохранением корректности расчета воздухораспределения проводится путем декомпозиции вентиляционной сети применением кольцевых моделей [26, 27]. Идея кольцевой модели заключается в использовании линейной периодичности распределения станций, тоннелей и поездов на линии метро, выделении минимального участка и передаче условий на выходе из участка на его вход, т.е. замыкании его в кольцо (рис. 2). В данной работе рассматривается определение минимального количества перегонов и станций на расчетном участке при различных эксплуатационных условиях в метрополитене.

### ***Расчетная модель и методы исследования***

При помощи программы статического воздухораспределения [9], с реализованной на ее основе моделью «поршневого эффекта», проведено исследование изменения расхода воздуха в обобщенной вентиляционной сети, на примере Алматинского метрополитена. Для разработки обобщенной сети потребовалось провести упрощение модели с использованием методов описанных в [7, 8]. Ос-

новным ее элементом является «перегон» (рис.1), который включает в себя станцию, станционную венткамеру, пассажирские пути, перегонные тоннели, вентсбойки и перегонную венткамеру [4, 6]. При расчете аэродинамических сопротивлений элементов использованы усредненные значения для соответствующих участков вентиляционной сети станций и тоннелей Алматинского метрополитена. Длина перегона между станциями принята равной 1000.

Для определения влияния «поршневого эффекта» на воздухораспределение подземных станций линии метрополитена, исследования проведены при весенне-осеннем режиме работы вентиляции. В этом режиме вентиляционные установки выключены, их шиберные аппараты открыты, а вентиляция линии осуществляется за счет поршневого действия поездов.

При исследовании воздухораспределения на обобщенной модели, были приняты следующие допущения: поезд движется с постоянной скоростью 60 км/ч на протяжении всего пути; поезда начинают одновременное движение навстречу друг другу с противоположных сторон исследуемой линии с заданным интервалом; при расчете воздухораспределения не учитывалось влияние естественной тяги.

### Результаты

Рассмотрим количество воздуха, перемещающегося через платформенные залы станций, при движении одного поезда по обобщенной линии метрополитена (рис.3). Анализ полученных результатов воздухораспределения показал, что при движении поезда по линии метрополитена, его поршневое действие оказывает значительное влияние на расход воздуха на одной станции перед подвижным составом и на трех ближайших станциях позади него. Сравним полученные результаты на линейной модели обобщенной линии метрополитена и на кольцевой (рис.3), состоящей из пяти станций и перегонов. Видно, что максимальное расхождение полученных результатов не превышает 10%. Соответственно, при моделировании прохождения одного поезда по линии можно ограничиться пятью перегонами в кольцевой модели.

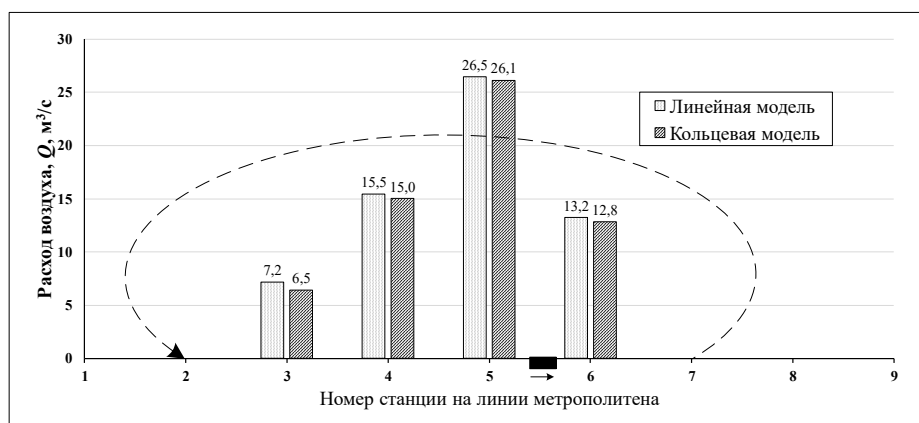
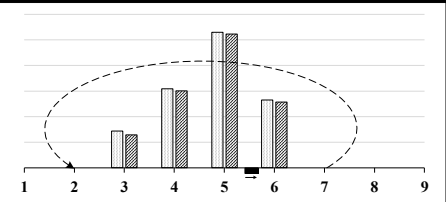
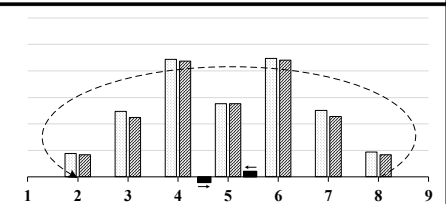
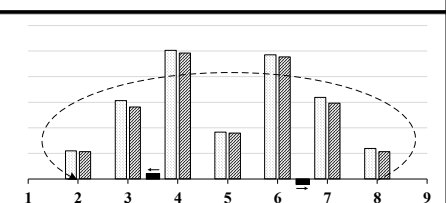
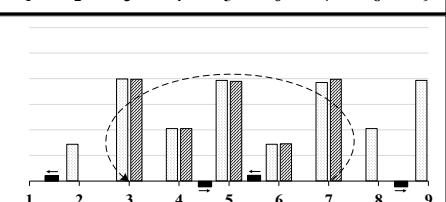
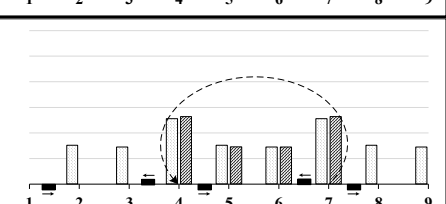
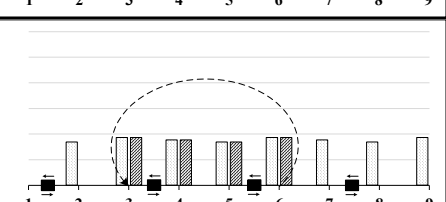


Рис. 3. Расход воздуха ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) через платформенные залы станций при перемещении одного поезда по линии метрополитена; – черный прямоугольник и стрелка – расположение и направление движения поезда на линии; – пунктирная стрелка – соединенные в кольцевой модели станции

Аналогичные исследования проведены для других частот движения поездов, результаты сведены в таблицу. Обозначения и оси рисунков в таблице соответствуют обозначениям и осям на рисунке 3.

**Результаты расчета воздухораспределения при исследованиях  
на линейной и кольцевой моделях**

№	Частота движения поездов, пар/ч	Число поездов на линии	Минимальное число перегонов в кольцевой модели	Расхождение, не более, %	Расход воздуха на станциях линии на линейной и кольцевой моделях
1	0,5	1	6	10	
2	1	2	6	10	
3	5	2	6	10	
4	10	4	4	2	
5	15	5	3	3	
6	20	8	3	0,5	

**Обсуждение**

Показано, что минимально необходимое количество станций и перегонов на кольцевых моделях обуславливается интенсивностью движения поездов по линии метрополитена. При малой интенсивности до 5 пар/ч необходимо учитывать

шесть перегонов, при 10 пар/ч – четыре перегона, свыше 15 пар/ч – минимум три перегона. При увеличении частоты движения количество станций для кольцевой модели снижается. Теоретически, при одновременном нахождении на каждом перегоне по поезду, движущемуся в противоположных направлениях, для исследования воздухораспределения достаточно кольцевой модели размером в один перегон и одну станцию.

### ***Заключение***

Проведено обоснование параметров расчетной кольцевой модели для определения воздухораспределения от поршневого действия поездов в метрополитене с однопутным тоннелем при декомпозиции протяженной линии для различных эксплуатационных условий. Определено минимально необходимое количество станций и перегонов в кольцевых моделях расхождение результатов расчета воздухораспределения на линейных и кольцевых моделях при разной интенсивности движения поездов не превысило 10%.

### ***Благодарности***

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ номер гос. регистрации №121052500147-6 и проекта АР0926084/2 «Исследование, разработка и внедрение инновационной технологии пылеудаления в метрополитене Алматы на основе использования циркуляционных потоков от поршневого действия движущихся поездов».

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Лугин, И. В. Взаимосвязность режимов вентиляции станций метрополитена / И. В. Лугин, А. М. Красюк // ГИАБ. – М.: Изд-во МГГУ, 2003. – № 4. – С. 199–202
2. Красюк, А. М. Взаимное влияние режимов вентиляции станций линии метрополитена / А. М. Красюк, И. В. Лугин, А. Н. Чигишев // Метро и тоннели. – 2002. – № 2
3. Improvement of shallow subway tunnel ventilation procedures / N. A. Popov, A. M. Krasnyuk, I. V. Lugin [et al.] // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50. – No 5. – P. 943-952. – DOI 10.1134/S1062739114050147.
4. Красюк А.М. Математическое моделирование воздухораспределения в вентиляционной сети метрополитена с учетом поршневого действия поездов / А.М. Красюк, И.В. Лугин, С.А. Павлов. Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение. Аэрология. – М.: МГГУ. – 2009. – С. 48-57.
5. Павлов, С. А. О способах регулирования воздухораспределения, вызванного поршневым действием поездов в системе тоннельной вентиляции метрополитенов мелкого заложения / С. А. Павлов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 7. – С. 212-220.
6. Krasnyuk, A. M. Circulatory air rings and their influence on air distribution in shallow subways / A. M. Krasnyuk, I. V. Lugin, S. A. Pavlov // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46. – No 4. – P. 431-437. – DOI 10.1007/s10913-010-0054-1.
7. Цой С., Принцип минимума мощности и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями / С. Цой, Г.К. Рязанцев // Алма-Ата: Наука, 1968. – 259 с.
8. Шепелев С.Ф., Слепых В.Ф., Вязниковцев Е.В. Методические указания по составлению, упрощению, расчету и проектированию рудников. Алма-Ата, Академия наук Казахской ССР, Институт горного дела, Казахская комиссия по борьбе с силикозом, 1973, – 160 с.

9. Кузнецов, А. С. О применении потоковых алгоритмов для расчета воздухораспределения в вентиляционных сетях / А. С. Кузнецов, С. М. Лукин // ФТПРПИ. – 1989. – № 5.
10. Красюк, А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов / А. М. Красюк. – Новосибирск: Наука, 2006.
11. C. Di Perna, A. Carbonari, R. Ansuini, M. Casals, Empirical approach for real-time estimation of air flow rates in a subway station, *Tunn. Undergr. Space Technol.* 42 (2014) 25–39.
13. Huang, Y.-D.; Gong, X.-L.; Peng, Y.-J.; Lin, X.-Y.; Kim, C.-N. Effects of the ventilation duct arrangement and duct geometry on ventilation performance in a subway tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2011, 26, 725–733.
14. Juraeva, M.; Ryu, K.J.; Jeong, S.-H.; Song, D.J. Numerical optimization study to install air curtain in a subway tunnel by using design of experiment. *J. Mech. Sci. Technol.* 2014, 28, 183–190.
15. Kim, J.-Y.; Kim, K.-Y. Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2009, 97, 174–179.
16. López González, M.; Galdo Vega, M.; Fernández Oro, J.M.; Blanco Marigorta, E. Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 40, 22–37.
17. Ma, J.; Zhang, X.; Li, A.; Deng, B.; Lv, W.; Guo, Y.; Zhang, W.; Huang, L. Analyses of the improvement of subway station thermal environment in northern severe cold regions. *Build. Environ.* 2018, 143, 579–590.
18. Khaleghi, M.; Talaei, M.R. Analysis of unsteady air flow in the subway station influenced by train movement. *Sci. Technol. Built Environ.* 2019, 1–10.
19. Pan, S.; Fan, L.; Liu, J.; Xie, J.; Sun, Y.; Cui, N.; Zhang, L.; Zheng, B. A Review of the Piston Effect in Subway Stations. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 5, 950205.
20. X. Zhang, J. Ma, A. Li, W. Lv, W. Zhang, C. Yang, B. Deng, Train-induced unsteady air-flow effect analysis on a subway station using field experiments and numerical modelling, *Energy Build.* 174 (2018) 228–238.
21. X. Zhang, J. Ma, A. Li, W. Lv, W. Zhang, D. Li, Ventilation for subway stations with adjustable platform doors created by train-induced unsteady airflow, *Build. Environ.* 152 (2019) 87–104.
22. X. Zhang, A. Li, R. Gao, S. Yu, J. Ma, C. Yang, D. Li, Y. Guo, W. Du, Effect of operational modes on the train-induced airflow and thermal environment in a subway station with full-height platform bailout doors, *Build. Environ.* 194 (2021), 107671.
23. Xue, P.; You, S.; Chao, J.; Ye, T. Numerical investigation of unsteady airflow in subway influenced by piston effect based on dynamic mesh. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014, 40, 174–181.
24. Yan, W.; Naiping, G.; Lihui, W.; Xiping, W. A numerical analysis of airflows caused by train-motion and performance evaluation of a subway ventilation system. *Indoor Built Environ.* 2014, 23, 854–863.
25. Yang, W.C.; Peng, L.M.; Shi, C.H.; Hu, Z.L. Numerical Simulation on Ventilation Effect of Train-Induced Wind in Subway. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 444–445, 450–454.
26. Lugin, I. V. Circular models of air distribution due to piston effect in subways / I. V. Lugin, L. A. Kiyaniitsa, T. S. Oshchepkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Novosibirsk, 30 сентября – 04 2019 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012046. – DOI 10.1088/1755-1315/773/1/012046.
27. Ощепков, Т. С. К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линии метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции / Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница, И. В. Лугин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 2. – С. 129-137. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-2-129-137.

© И. В. Лугин, С. А. Павлов, Т. И. Иргубаев, 2022