

*Т. С. Ощепков\**

## **Определение параметров кольцевой модели линии метрополитена для расчета воздухораспределения**

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИГД СО РАН),  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

**Аннотация.** Метрополитен в настоящее время является наиболее перспективным и быстро развивающимся видом городского общественного транспорта, которым ежегодно пользуются миллионы пассажиров во всем мире. Одной из основных проблем в современных метрополитенах является содержание взвешенной пыли в воздухе, которое превышает значения предельно допустимой концентрации. Для снижения значения концентрации взвешенной пыли в воздухе метрополитена необходимо использовать специальное оборудование – воздушные фильтры. Применение данного оборудования очевидно приведет к увеличению аэродинамического сопротивления участка, на котором оно установлено, что в свою очередь повлияет на процесс воздухораспределения в тоннелях и станциях метрополитена. В настоящей статье приведено обоснование параметров кольцевой модели линии метрополитена для расчета воздухораспределения. Определение воздухораспределения в расчетной модели в дальнейшем производится с помощью компьютерного моделирования методом конечных объемов.

**Ключевые слова:** метрополитен, запыленный воздух, многофазные потоки, мелкодисперсная пыль, кольцевая модель, компьютерное моделирование

*T. S. Oshchepkov\**

## **Parameters definition of the ring model subway line for calculating the air distribution**

Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: timofeyoshchepkov@gmail.com

**Abstract.** The metro is currently the most promising and rapidly developing type of urban public transport, which is used annually by millions of passengers around the world. One of the main problems in modern subways is the content of suspended dust in the air, which exceeds the maximum permissible concentration. To reduce the concentration of suspended dust in the subway air, it is necessary to use special equipment – air filters. The use of this equipment will obviously lead to an increase in the aerodynamic drag of the section where it is installed, which in turn will affect the process of air distribution in tunnels and metro stations. In this article, the justification of the parameters of the ring model of the metro line for the calculation of air distribution is given. The determination of air distribution in the calculation model is further carried out using computer modeling by the finite volume method.

**Keywords:** subway, dusty air, multiphase flows, fine dust, circular model, computer modeling

## ***Введение***

Одна из основных задач тоннельной вентиляции, возникающая в ходе эксплуатации метрополитена – это поддержание микроклимата и качества внутреннего воздуха в рамках действующих нормативных и санитарных требований [1, 2]. В частности, содержание взвешенной пыли в воздухе не должно превышать значения предельно допустимой концентрации (ПДК), установленное нормативными документами [2-4]. К сожалению, исследования, проведенные в различных странах, показали, что концентрация твердых частицы во взвешенном состоянии в воздухе метрополитена во много раз превышает ПДК [5-13], что в свою очередь ведет к развитию респираторных заболеваний у сотрудников метрополитена [14, 15]. Очевидно, что для снижения концентрации взвешенной пыли следует прибегнуть к дополнительной фильтрации и обеспыливанию воздуха в сооружениях метрополитенов.

При размещении оборудования, предназначенного для очистки воздуха от пыли, необходимо учитывать тот факт, что значительная часть тоннельного воздуха проходит через пристанционные вентиляционные сбойки, образуя циркуляционное кольцо, причем расход воздуха через вентсбойку зависит прямопропорционально от количества встреч поездов [16-18]. В связи с этим в работах [19, 20] предлагается место установки устройств для очистки воздуха в пристанционных вентсбойках, что вероятно повлияет на воздухораспределение в тоннелях и на станциях линии метрополитена.

Цель данной работы – обосновать параметры кольцевой модели линии метрополитена для расчета воздухораспределения в зависимости от эксплуатационных параметров метрополитена.

### ***Обоснование параметров расчетной модели***

Для исследования аэродинамических процессов, происходящих в тоннельных сооружениях линии метрополитена и станциях, в работе [21] проведен анализ способов, реализуемых в ANSYS и применимых для расчета методом конечных объемов. В свою очередь в работе [18] на основе проведенного анализа в работе [21] обоснован новый способ топологической декомпозиции, заключающийся в применении кольцевых моделей, принятый как основной способ для исследования параметров воздушных потоков в подземных сооружениях линии метрополитена.

Для получения достоверных данных, полученных в ходе расчета воздухораспределения, необходимо чтобы геометрические характеристики расчетной модели были приближены к реальным геометрическим характеристикам линии метрополитена. Поскольку исследование проводится на кольцевой модели, то в данном случае речь идет о радиусе кривизны тоннеля и станции метрополитена. На основании п.5.4.1.1 [1] минимальный радиус кривизны тоннеля и станции для кольцевой модели следует принимать не менее 800 м. Так же увеличение минимального радиуса кривизны позволит снизить значение центробежной силы, то есть уменьшить смещение потока воздуха к наружным стенкам тоннеля и, соот-

ветственно, получать более реальную картину движения воздушных потоков в тоннелях метрополитена.

В работе [22] определено минимальное количество станций на расчетном участке линии метрополитена, позволяющее учесть взаимное влияние этих станций относительно друг друга. Для обеспечения погрешности расчетов воздухо-распределения в диапазоне 10 – 15% в расчетную кольцевую модель линии метрополитена следует включать не менее трех станций.

Таким образом, минимальное число станций, включенное в кольцевую модель линии метрополитена, следует определять по формуле (1), но не менее трех.

$$N = \frac{2\pi R_{\min}}{L}, \quad (1)$$

где  $R_{\min}$  – минимальный радиус кривизны тоннеля согласно [1], м;  $L$  – расстояние между станциями, м.

### *Расчетная модель*

Расчетная модель представляет собой кольцо, включающее в себя четыре станции островного типа и четыре перегона с однопутными тоннелями. Расстояние между станциями принято 1250 м, что соответствует среднему расстоянию между станциями на Дзержинской линии Новосибирского метрополитена. На расчетном участке располагаются два поезда, которые движутся от одной станции к другой, в разных направлениях с максимальной скоростью 20 м/с. Время стоянки на станции составляет 20 секунд. При данных эксплуатационных параметрах частота движения поездов составит 9 пар/час, а интервал движения – 390 с, что соответствует интервалу движения в вечернее время.

Движение поезда описывается циклом: разгон (10с) – движение с постоянной скоростью (49с) – торможение (20с) – стоянка на станции (20с).

Для определения поля скоростей воздуха в расчетной модели применяется программный комплекс ANSYS Fluent. Постановка задачи – плоская, количество элементов конечно-элементной сетки составило 762689 элемента. Ортогональное качество и степень асимметрии находится в рекомендуемых пределах согласно [23]. Общее время численного эксперимента составляет 1262 с. Прогнозируемое время расчета на кластере мощностью 32 вычислительных ядра составляет около 48 часов, что позволит проводить многовариантные расчеты, в том числе с установленным фильтрационным оборудованием в вентсбойках.

Геометрические характеристики расчетной модели представлены на рисунке 1.

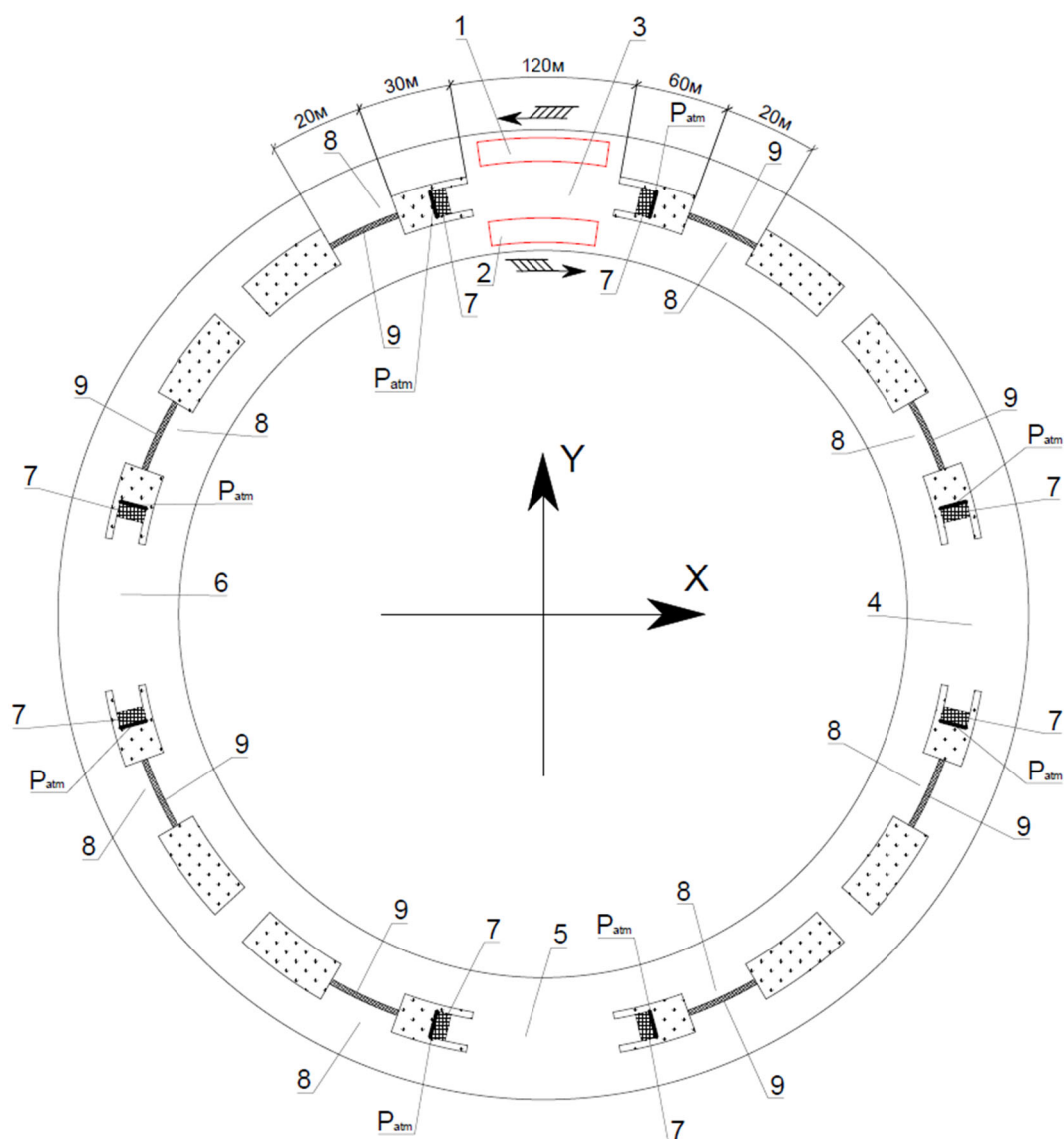


Рис. 1. Геометрические характеристики расчетной модели.

На рисунке: 1 – поезд №1, 2 – поезд №2, 3 – станция №1, 4 – станция №2, 5 – станция №3, 6 – станция №4, 7 – выход к вестибюлю, 8 – вентсбойка №1.1, 8 – вентсбойка, 9 – зона установки фильтра,  $P_{atm}$  – атмосферное давление.

### *Заключение*

В результате проведенного анализа данных, ранее полученных по итогам математического моделирования процессов воздухораспределения в сооружениях метрополитена на кольцевых моделях, включающих в себя две и три станции островного типа, а также на основании действующих нормативных документов произведена доработка расчетной кольцевой модели линии метрополитена. Внесенные изменения, а именно увеличение количества станций в расчетной модели до четырех, позволят увеличить точность данных, получаемых в ходе математического моделирования.

Определена зависимость, позволяющая рассчитать минимальное количество станций кольцевой модели линии метрополитена.

## *Благодарности*

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2013. — 260 с.
2. СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры [Текст] : утв. Пост. Главного государственного санитарного врача РФ от 16.10.2020: дата введ. 01.01.2021. — М.: [б.и.], 2020. — 101 с.
3. ГОСТ Р 59972-2021. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий. Технические требования [Текст]: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2021 г. N 1875-ст: дата введ. 01.02.2022. — М.: ФГБУ "РСТ", 2022 — 50 с.
4. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. 2005 год — Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2006. — 31 с.
5. Хунашвили Н.Г. [и др.] Клинико-гигиенические параллели при исследовании условий труда и состояния здоровья работников тбилисского метрополитена / Н.Г. Хунашвили, Р.Г. Кверенчиладзе, М.П. Цимакуридзе, Л.Ш. Бакрадзе, Майя П. Цимакуридзе // Аллергология и иммунология. — 2010. — том 11. — № 2. — с. 135-136
6. Сазонова А. М. Исследование пылевого фактора производственной среды метрополитена / А.М. Сазонова // Гигиена и охрана труда транспортной отрасли. — 2016. — с. 79-85
7. Winnie Kam, Kalam Cheung, Nancy Daher, Constantinos Sioutas. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro // Atmospheric Environment. Volume 45, 2011, Pages 1506-1516.
8. Senlin Lu, Dingyu Liu, Wenchao Zhang, Pinwei Liu, Yi Fei, Yan Gu, Minghong Wu, Shang Yu, Shinich Yonemochi, Xiaojun Wang, Qingyue Wang. Physico-chemical characterization of PM2.5 in the microenvironment of Shanghai subway // Atmospheric Research. Volume 153, 2015, Pages 543-552.
9. Amit Passi, S.M. Shiva Nagendra, M.P. Maiya. Characteristics of indoor air quality in underground metro stations: A critical review // Building and Environment. Volume 198, 2021, 107907.
10. M.C. Minguillóna, C. Reche, V. Martinsa, F. Amato, E. de Miguel, M. Capdevila, S. Centelles, X. Querol, T. Moreno. Aerosol sources in subway environments // Environmental Research. Volume 167, 2018, Pages 314–328.
11. Vania Martins, Teresa Moreno, María Cruz Minguillon, Barend L. van Drooge, Cristina Reche, Fulvio Amato, Eladio de Miguel, Marta Capdevila, Sonia Centelles, Xavier Querol. Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway stations of Barcelona, Spain // Environmental Pollution. Volume 208, 2016, Pages 125-136.
12. Oriol Font, Teresa Moreno, Xavier Querol, Vania Martins, Daniel Sánchez Rodas, Eladio de Miguel, Marta Capdevila. Origin and speciation of major and trace PM elements in the barcelona subway system // Transportation Research. Part D 72, 2019, Pages 17-35.
13. Wenjing Ji, Chenghao Liu, Zhenzhe Liu, Chunwang Wang, Xiaofeng Li. Concentration, composition, and exposure contributions of fine particulate matter on subway concourses in China // Environmental Pollution. Volume 275, 2021, 116627.
14. Сачкова О.С. [и др.] Разработка мероприятий по оздоровлению условий труда тоннельных рабочих / О.С. Сачкова, Т.В. Матвеева, Н.И. Зубрев, М.В. Устинова, В.Л. Кашинцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. — 2018. — Т. 7. — №3 (43). — с. 145-149

15. Копытенкова О.И., Шилова Е. А., Сазонова А.М. Комплексный подход к оценке биодеструктивных факторов при освоении подземного пространства / О. И. Копытенкова, Е. А. Шилова, А. М. Сазонова // Интернет-журнал «Науковедение». – Том 7. – №1 (январь - февраль 2015). – с. 1-16
16. A. M. Krasnyuk. Circulatory Air Rings and Their Influence on Air Distribution in Shallow Subways // Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. // Journal of Mining Science, 2010. Т. 46. № 4. С. 431-437.
17. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station// Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 85, March 2019, Pages 21-28.
18. Ощепков Т.С., Кияница Л.А., Лугин И.В. К вопросу определения поля скоростей воздуха в тоннельных сооружениях линий метрополитена с использованием кольцевых моделей как способа топологической декомпозиции // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 8 т. Т. 2 : Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – С. 129 – 137.
19. Ощепков, Т. С. Обоснование фильтрационного оборудования для обеспыливания воздуха метрополитенов / Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница, И. В. Лугин // . – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 14-21. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-2-4-14-21. – EDN ERUDDN.
20. Ощепков, Т. С. Влияние установки фильтрационного оборудования в вентиляционной сбойке на величину воздухообмена станции метрополитена / Т. С. Ощепков, Л. А. Кияница // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 210-215. – DOI 10.15372/FPVGN2021080232. – EDN HJIQCU.
21. Кияница Л.А. Исследование динамики давлений на поверхности вагонов поезда в двухпутном тоннеле метрополитена / Л.А. Кияница //ГИАБ. — 2016. — №11. — С. 400 – 407.
22. Красюк, А. М. Взаимосвязность режимов вентиляции станций метрополитена / А. М. Красюк, И. В. Лугин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 4. – С. 199-203. – EDN KXFEMP.
23. Ansys. Fluent, Release 2021 R2, Help System, User's Guide, ANSYS, Inc.

© Т. С. Ощепков, 2023